



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**VIABILIDADE SUSTENTÁVEL:
TRANSFORMANDO ESCOLAS COM ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA
UMA ANÁLISE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL
PARA O CENTRO DE ENSINO MÉDIO 02 CEILÂNDIA**

Anne Caroline Ramos de Matos

Brasília, Dezembro de 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**VIABILIDADE SUSTENTÁVEL:
TRANSFORMANDO ESCOLAS COM ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA
UMA ANÁLISE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL
PARA O CENTRO DE ENSINO MÉDIO 02 CEILÂNDIA**

Anne Caroline Ramos de Matos

*Trabalho de conclusão de curso submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheira Eletricista*

Banca Examinadora

Prof. Rafael Amaral Shayani, Ph.D, FT/UnB
Orientador

Prof. Ivan Marques de Toledo Camargo, Ph.D,
FT/UnB
Examinador Interno

Prof. Jorge Andrés Cormane Angarita, Ph.D,
FGA/UnB
Examinador Interno

FICHA CATALOGRÁFICA

MATOS, ANNE CAROLINE RAMOS

VIABILIDADE SUSTENTÁVEL: TRANSFORMANDO ESCOLAS COM ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA UMA ANÁLISE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL PARA O CENTRO DE ENSINO MÉDIO 02 CEILÂNDIA [Distrito Federal] 2023.

xvi, 120 p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheira, Engenharia Elétrica, 2023).

Trabalho de conclusão de curso - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Viabilidade Sustentável

2. Energia Fotovoltaica

3. Análise Técnica

4. Escolas Sustentáveis

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MATOS, A.C.R. (2023). *VIABILIDADE SUSTENTÁVEL: TRANSFORMANDO ESCOLAS COM ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA UMA ANÁLISE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL PARA O CENTRO DE ENSINO MÉDIO 02 CEILÂNDIA*. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Anne Caroline Ramos de Matos

TÍTULO: VIABILIDADE SUSTENTÁVEL: TRANSFORMANDO ESCOLAS COM ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA UMA ANÁLISE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL PARA O CENTRO DE ENSINO MÉDIO 02 CEILÂNDIA.

GRAU: Engenheira Eletricista ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Projeto Final de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Projeto Final de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Anne Caroline Ramos de Matos

Depto. de Engenharia Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

Dedicatória

Aos meus pais, Lourdes e Carlos, à minha irmã, Maria Eduarda, e ao meu noivo, João Victor, por me ouvir, encorajar e apoiar em toda a jornada da graduação e na vida.

Anne Caroline Ramos de Matos

Agradecimentos

Agradeço a Deus, que me amparou em diversos momentos durante a graduação, sendo o principal alicerce para que eu não desistisse da minha jornada.

Aos meus pais, que nunca mediram esforços para possibilitar essa conquista, agradeço imensamente. Se cheguei até aqui, é por mérito deles, que sacrificaram seus sonhos e vontades para realizar o meu sonho de ter um diploma e proporcionar uma vida melhor a eles. Agradeço por cumprirem a promessa de nunca deixar faltar o estudo na minha vida.

À minha irmã, que sempre acreditou em mim e, com seu jeito único, forneceu o carinho necessário para me impulsionar nessa jornada, suportando todas as minhas insônias e delírios.

Ao meu noivo, que sempre me apoiou e encorajou a cada novo desafio. Obrigada por nunca medir esforços para ajudar na rotina pesada de morar sozinha, estudar e trabalhar. Agradeço toda dedicação, incentivo e, acima de tudo, pela compreensão diante da minha ausência enquanto me dedicava a este trabalho.

Ao meu orientador, professor Dr. Rafael Shayani, agradeço pelas discussões provocadas ao longo do curso. Graças às suas indagações, desenvolvi uma consciência ambiental e o inconformismo necessários para a busca de soluções com impacto para a sociedade. Obrigada por toda compreensão aos desafios que surgiram durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Davi Silva, do CEM02, e demais docentes envolvidos, agradeço pela prestatividade e ânimo no desenvolvimento deste trabalho. Tanto no fornecimento das informações necessárias quanto nas discussões acerca das inúmeras possibilidades para a abordagem sustentável. Obrigada à ENETEC, que foi a minha primeira família aqui em Brasília e me proporcionou experiências essenciais para minha formação profissional. Graças a essa iniciativa, pude conhecer os meus melhores amigos e me apaixonar ainda mais pela minha profissão. Em especial, agradeço à Direx, Helena, Laura, Brenno e Victor, que estiveram comigo durante todo o desafio de liderança.

Agradeço às amizades que fiz durante os quatro anos de empresa que, direta e indiretamente, contribuíram para o sucesso da minha jornada. Citando em especial Ferreira, Vôvô, Guto, Leão, Ana Júlia, Santana, Jequiti, Marcelo, Verão, Naretto, Rafíssima, que sempre me acolheram, forneceram um ombro amigo e me incentivaram a cada etapa dessa jornada.

Aos eletrobiomigos, que iniciaram essa jornada ao meu lado, Thiaguinho, Hossoe, Japonês, Lusca, Breno, e em especial o nosso bala de prata, Thiagão, que foi o meu primeiro amigo no curso e nunca mediu esforços para me ajudar, independente da situação. Ao Vinícius, que sempre esteve presente e, mesmo na minha ausência, sempre buscou estender a mão em momentos difíceis. À Julha, que sempre compartilhou comigo os melhores e piores momentos da graduação, trazendo o conforto da sua presença e amizade. E ao Railson, que além de compartilhar o mesmo sobrenome, compartilhou comigo o desafio mais difícil, sair da sua cidade natal para estudar em outra cidade. Obrigada por todos os conselhos, carinho e fé depositada em mim durante toda a caminhada.

Ao Clã, por ter sido o meu apoio e lar em meio ao caos de morar num pensionato. Ana Lúcia, Isabella, Malu, Péthalla, Giulliana, Laysla e Tanize, obrigada por terem facilitado a jornada e proporcionado uma rede de apoio. Sou grata às minhas amigas Denise, Nathália e Thainá, que há mais de 10 anos me encorajam e impulsionam a alçar voos cada vez maiores. Obrigada por chamarem atenção nas minhas falhas e por nunca terem deixado a distância diminuir ou atrapalhar o nosso laço de amizade.

Às polarigatas, Gabizinha, Ingrid, Helô, Bel, Julia's, muito obrigada por terem ressignificado o final da minha graduação. Tenho certeza de que foi graças ao apoio de vocês que cheguei até este momento.

À minha família, tios, tias, primos, primas e demais familiares, agradeço por terem feito de tudo para possibilitar a realização do meu sonho. Seja na mudança para Brasília, seja num carinho ou numa palavra amiga, ou até mesmo naquela comidinha que me fazia lembrar de casa. Obrigada por nunca terem soltado a minha mão e por sempre confiarem no meu potencial. Em especial, agradeço à Fernanda, Dailton e Marcelo, que foram a minha família aqui em Brasília e sempre me ampararam com o maior amor do mundo. Eu sempre serei grata.

Agradeço aos professores e colaboradores da Universidade Brasília, em especial os professores Anésio e João Luiz, e o técnico de laboratório Carlos, que diversas vezes me estenderam a mão em momentos difíceis e que tornaram essa jornada mais tranquila e fácil.

Por fim agradecer principalmente a seguintes pessoas que foram um divisor de água nesse processo, Hanae, obrigada por me ouvir e me apoiar desde a pandemia e por me estender a mão em tantos momentos de dificuldade. Ao Lessa, que com todo seu jeito particular, me ajudou e foi um verdadeiro amigo em diversas situações ao longo dos anos, sobretudo oferecendo suporte psicológico e compartilhando todo o seu conhecimento para o desenvolvimento deste trabalho.

À Hêmilly que me acompanha desde o ensino médio, e que é a pessoa com o coração mais bondoso que encontrei em toda trajetória, obrigada pela sua amizade e companheirismo de sempre. À Gabriela, que em diversos cenários foi o meu porto seguro e, particularmente me auxiliou em meus tratamentos. À Ingrid que tanto suportou os momentos em que eu duvidei da minha capacidade e me encorajou entendendo a minha realidade e me lembrando do quanto sou capaz. E à minha psicóloga Andréa, que me acompanhou nessa reta final e me ajudou a superar todo e qualquer desafio que surgiu, obrigada por sempre acreditar em mim.

Aos demais colegas de curso, o meu muito obrigada, por terem sido presentes e pelo auxílio em qualquer circunstância.

RESUMO

As sucessivas preocupações acerca das mudanças climáticas e a necessidade de implantação de medidas que transformem esse cenário, tem-se tornado uma prioridade global. Nesse contexto, surge nas instituições de ensino um incentivo a projetos que vislumbrem um impacto significativo para a temática. Aliado a iniciativa, este trabalho de conclusão de curso visa auxiliar o Distrito Federal na mitigação de CO₂ por meio de um projeto técnico para implementação de um sistema fotovoltaico em uma escola pública modelo. A metodologia do estudo envolve uma abordagem técnica para duas possibilidades de sistemas On-Grid, incorporando uma análise econômica que ateste a viabilidade de cada investimento, um diagnóstico ambiental que demonstre os impactos associados a instalação do arranjo fotovoltaico e uma proposta educacional que proporcione uma maior consciência ambiental na formação base da comunidade local. O objetivo é superar os desafios pertinentes ao processo de desenvolvimento de um projeto fotovoltaico em instituições públicas, abordando a sua larga cooperação com as inquietações acerca do meio ambiente. O estudo considerou o Centro de Ensino Médio 02 da Ceilândia, e as propostas levantadas são concebidas a partir do consumo energético da escola e das ideias discutidas em conjunto com o corpo docente da escola. A situação de projeto 1 propõe um SFV de 60,63 kWp, a ser instalado no telhado da própria edificação, com o intuito de reduzir o consumo total do CEM02 e a situação 2 propõe um SFV de 367,57 kWp, instalado no solo, na área disponível indicada pelos responsáveis da escola, visando reduzir o consumo de 6 escolas incluindo o CEM02. Para ambos os projetos, o tempo de retorno do investimento foi estimado em menos de 3 anos e o lucro obtido após o período de garantia de 25 anos, entre 270% e 215%, o que demonstra claramente a vantagem de execução do investimento. Ao identificar as oportunidades atreladas ao sistema solar na escola modelo, a pesquisa incentiva a aplicação de capital em energias renováveis em demais instituições de ensino, inspirando futuros estudos e iniciativas.

Palavras-chave: mudanças climáticas, projeto fotovoltaico, sustentabilidade, sistema On-Grid, viabilidade econômica, energias renováveis.

ABSTRACT

Concerns about climate change and the need to implement measures that transform this scenario have become a global priority. In this context, educational institutions are encouraging projects that envision a significant impact on the subject. In line with this initiative, this undergraduate thesis aims to assist the Federal District in mitigating CO₂ through a technical project for the implementation of a photovoltaic system in a model public school. The study's methodology involves a technical approach to two possibilities of On-Grid systems, incorporating an economic analysis to confirm the feasibility of each investment, an environmental diagnosis demonstrating the impacts associated with the installation of the photovoltaic array, and an educational proposal providing greater environmental awareness in the basic education of the local community. The goal is to overcome the challenges related to the development of a photovoltaic project in public institutions, addressing its broad cooperation with concerns about the environment. The study considered the Centro de Ensino Médio 02 in Ceilândia, and the proposals are based on the school's energy consumption and ideas discussed in collaboration with the school's faculty. Project situation 1 proposes a PV system of 60,63 kWp, to be installed on the roof of the building, with the aim of reducing the total consumption of CEM02. Project situation 2 proposes a PV system of 367,57 kWp, installed on the ground, in the available area indicated by the school authorities, aiming to reduce the consumption of 6 schools, including CEM02. For both projects, the payback period was estimated to be less than 3 years, and the profit obtained after the 25-year warranty period ranges between 270% and 215%, clearly demonstrating the advantage of executing the investment. By identifying opportunities associated with solar power in the model school, the research encourages the investment in renewable energy in other educational institutions, inspiring future studies and initiatives.

Keywords: climate change, photovoltaic project, sustainability, On-Grid system, economic viability, renewable energy.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Motivação	1
1.3	Objetivos do Estudo	2
1.3.1	Objetivo Geral	2
1.3.2	Objetivos Específicos	2
1.4	Estrutura do Trabalho	2
2	Revisão Bibliográfica	4
2.1	Mudanças Climáticas no Brasil e no Mundo	4
2.2	Mudanças Climáticas no DF e RIDE	8
2.3	Plano de Mitigação do Distrito Federal	9
2.4	Promoção de Energia Solar no Distrito Federal	10
2.5	Legislação e Incentivos	11
2.6	Visão Geral do Sistema Fotovoltaico	13
2.7	Desenvolvimento Sustentável e Objetivos da ONU	16
3	Materiais e Métodos	18
3.1	Centro de Ensino Médio 02 Ceilândia DF	20
3.1.1	Programa de Formação dos Comitês Jovens para a Sustentabilidade	20
3.1.2	Plano de Gerenciamento dos Resíduos Sólidos produzidos na Escola	21
3.1.3	Educação Ambiental: Trilhas para a Sustentabilidade na Escola	22
3.1.4	Programa de Neutralização do Carbono	23
3.2	Requisitos Educacionais do Projeto	24
3.2.1	Educação e Engajamento da Comunidade	24
3.3	Requisitos Técnicos do Projeto	24
3.3.1	Módulos Fotovoltaicos	26
3.3.2	Inversores Solares	27

3.3.3	Conector Solar	28
3.3.4	Cabos Elétricos	29
3.3.5	Proteções	30
3.3.6	Eletrodutos e Eletrocalhas	33
3.3.7	<i>String Box</i>	34
3.3.8	Aterramento das Instalações	34
3.3.9	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)	35
3.4	Etapas Iniciais do Projeto	35
3.4.1	Levantamento de Informações	35
3.4.2	Consumo Energético CEM02	36
3.4.3	Avaliação do Recurso Solar	36
3.5	Materiais Utilizados	37
3.5.1	PVsys	38
3.5.2	SketchUp	38
3.5.3	AutoCAD	39
3.5.4	Excel	39
3.6	Dimensionamento do Sistema	39
3.6.1	Performance Ratio	39
3.6.2	Potência do Sistema	40
3.6.3	Escolha e Distribuição dos Módulos Fotovoltaicos	40
3.6.3.1	Correção dos Dados Técnicos do Módulo	41
3.6.4	Estrutura de Fixação dos Módulos Fotovoltaicos	42
3.6.5	Escolha dos Inversores Solar	43
3.6.6	Dimensionamento do Arranjo	43
3.6.7	Projeto Elétrico	45
3.6.7.1	Dimensionamento de Condutores	45
3.6.7.2	Dispositivos de Proteção	49
3.7	Requisitos Econômicos do Projeto	49
3.7.1	Investimento Inicial	50
3.7.2	Geração de Energia	51

3.7.3	Custos Operacionais	51
3.7.4	Análises de Retorno do Investimento	52
3.7.4.1	Payback	52
3.7.4.2	Valor Presente Líquido (VLP) e Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	52
3.7.4.3	Taxa Interna de Retorno (TIR)	53
3.7.4.4	Retorno sobre o Investimento (ROI)	53
3.7.5	Análise de sensibilidade	54
3.7.6	Fluxo de Caixa	54
3.7.7	Custo Nivelado de Energia	56
3.8	Requisitos Ambientais do Projeto	57
3.8.1	Mitigação de Emissões de Carbono	57
4	Resultados e Discussão	58
4.1	Requisitos Educacionais do Projeto	58
4.1.1	Educação e Engajamento da Comunidade	58
4.2	Requisitos Técnicos do Projeto	59
4.2.1	Levantamento de Informações CEM 02	59
4.2.2	Consumo Energético CEM02	60
4.2.3	Avaliação do Recurso Solar	61
4.2.4	Definição do Local das Instalações	62
4.3	Dimensionamento do Sistema	65
4.3.1	Potência do Sistema	65
4.3.2	Escolha e Distribuição dos Módulos Fotovoltaicos	65
4.3.2.1	Correção dos Dados Técnicos do Módulo	67
4.3.3	Estrutura de Fixação dos Módulos Fotovoltaicos	67
4.3.4	Escolha do Inversor	71
4.3.5	Dimensionamento do Arranjo	72
4.3.6	Projeto Fotovoltaico	73
4.3.6.1	Dimensionamento Condutores CA	73
4.3.6.2	Dimensionamento Condutores CC	74
4.3.6.3	Diagrama Unifilar	75

4.4	Requisitos Econômicos do Projeto	76
4.4.1	Investimento Inicial	76
4.4.2	Geração de Energia	76
4.4.3	Fluxo de Caixa	78
4.4.4	Análises de Retorno do Investimento	82
4.4.4.1	Caso 1	82
4.4.4.2	Caso 2	83
4.4.5	Análise de Sensibilidade	83
4.4.5.1	Caso 1	85
4.4.5.2	Caso 2	87
4.4.5.3	Considerações Sensibilidade	89
4.4.6	LCOE	90
4.5	Requisitos Ambientais do Projeto	90
4.5.1	Mitigação de Emissões de Carbono	90
5	Conclusão	94
5.1	Sugestão para Trabalhos Futuros	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
A	Diagrama Unifilar 1	101
B	Diagrama Unifilar 2	103
C	Simulação PVsyst 1	105
D	Simulação PVsyst 2	113

LISTA DE FIGURAS

2.1	Mudanças observadas (1900-2020) e projetadas (2021-2100) na temperatura da superfície global (em relação a 1850-1900).....	4
2.2	Estrutura de oferta interna de energia elétrica no Brasil em 2022.	6
2.3	Análise de tendência de temperaturas máxima no Brasil.	7
2.4	Recorde de Temperatura Brasil 2023.	7
2.5	Anomalias de temperatura esperadas para o DF e a RIDE.	8
2.6	Contribuição relativa das emissões de Gases de Efeito Estufa dos diferentes setores no Distrito Federal: Emissões totais em 2018.....	9
2.7	Lista de Ações de Mitigação ordenada pelo respectivo impacto de redução de emissões de GEE.	10
2.8	Representação do funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício cristalizado.	13
2.9	Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.	14
2.10	Curva $I \times V$ em um painel solar.....	15
3.1	Vista aérea Centro de Ensino Médio 02 Ceilândia - Distrito Federal.	19
3.2	Interface do site do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S.Brito (CRESESB).....	37
3.3	Levantamento preços dos Sistemas FV	51
4.1	Dados de irradiação solar para a localização do CEM 02 Ceilândia.	62
4.2	Vista aérea do CEM02 - Ceilândia.	63
4.3	Vista aérea do telhado do CEM02 - Ceilândia escolhido para o caso 1.	64
4.4	Vista aérea do CEM02 - Ceilândia com indicação do local escolhido para o caso 2.	65
4.5	Vista lateral do Centro de Ensino Médio 02 Ceilândia.	68
4.6	Vista aproximada do telhado do Centro de Ensino Médio 02 Ceilândia.	68
4.7	Estruturas utilizadas do telhado do Centro de Ensino Médio 02 Ceilândia.....	69
4.8	Visão geral da estrutura de monoposte.	70
4.9	Detalhamento da presilhas e demais elementos de fixação na montagem da estrutura.	70
4.10	Visão detalhada dos trilhos longitudinais e presilhas de fixação.	70
4.11	Visão geração do alinhamento das placas e detalhamento da fixação necessária.	71
4.12	Estimativa de geração - Sistema 1.	77
4.13	Estimativa de geração - Sistema 2.	78
4.14	Variação da TLP para a definição da TMA.....	83
4.15	Variação da Inflação.....	84
4.16	Variação do Aumento Tarifário.....	84
4.17	Projeção da variação do VPL à TLP - Caso 1.	85
4.18	Projeção da variação da TIR à Inflação - Caso 1.....	85
4.19	Projeção da variação do VPL à Inflação - Caso 1.....	86

4.20	Projeção da variação da TIR ao Aumento Tarifário - Caso 1.	86
4.21	Projeção da variação do VPL ao Aumento Tarifário - Caso 1.	87
4.22	Projeção da variação do VPL à TLP - Caso 2.	87
4.23	Projeção da variação da TIR à Inflação - Caso 2.	88
4.24	Projeção da variação do VPL à Inflação - Caso 2.	88
4.25	Projeção da variação da TIR ao Aumento Tarifário - Caso 2.	89
4.26	Projeção da variação do VPL ao Aumento Tarifário - Caso 2.	89
4.27	Estimativa de emissão de CO ₂ ao longo de 25 anos para o sistema fotovoltaico e o sistema convencional.	92

LISTA DE TABELAS

3.1	Modelo de fluxo de caixa inicial - Payback Descontado.....	55
4.1	Média de Consumo calculada para os anos de 2018 a 2022.....	60
4.2	Média de Consumo calculada para os anos de 2018, 2019 e 2022.	61
4.3	Dados Elétricos do módulo fotovoltaico da Canadian Solar.	66
4.4	Características de temperatura módulo fotovoltaico da Canadian Solar.....	67
4.5	Dados Técnicos do inversor escolhido.	71
4.6	Resumo do arranjo fotovoltaico do sistema 1.....	72
4.7	Resumo do arranjo fotovoltaico do sistema 2.....	73
4.8	Resumo do dimensionamento dos condutores CA, segundo a ABNT NBR 5410:2008.	74
4.9	Parâmetros para o dimensionamento dos cabos CC - Sistema 1.	74
4.10	Parâmetros para o dimensionamento dos cabos CC - Sistema 2.	75
4.11	Resumo do dimensionamento dos condutores CC, segundo a ABNT NBR 16612:2017.	75
4.12	Orçamento Sistema 1.	76
4.13	Estimativa de geração - Sistema 1.....	77
4.14	Estimativa de geração - Sistema 2.....	77
4.15	Parâmetros considerados no Fluxo de Caixa - Sistema 1.	78
4.16	Parâmetros considerados no Fluxo de Caixa - Sistema 2.	79
4.17	Parâmetros considerados no Fluxo de Caixa - Payback Descontado Sistema 1.	79
4.18	Parâmetros considerados no Fluxo de Caixa - Payback Descontado Sistema 2.	79
4.19	Fluxo de caixa - Payback Descontado caso 1 (Parte 3).....	80
4.20	Fluxo de caixa - Payback Descontado caso 1 (Parte 4).....	80
4.21	Fluxo de caixa - Payback Descontado caso 1 (Parte 5).....	81
4.22	Fluxo de caixa - Payback Descontado caso 2 (Parte 2).....	81
4.23	Fluxo de caixa - Payback Descontado caso 2 (Parte 3).....	81
4.24	Fluxo de caixa - Payback Descontado caso 2 (Parte 4).....	82
4.25	Fluxo de caixa - Payback Descontado caso 2 (Parte 5).....	82
4.26	Resultados obtidos das análises de retorno do investimento - Caso 1.....	82
4.27	Resultados obtidos das análises de retorno do investimento - Caso 2.....	83
4.28	Fatores de Emissão de CO ₂ pela geração de energia elétrica no SIN.	91
4.29	Estimativa de Emissão de CO ₂ ao longo de 25 anos.	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL:	Agência Nacional de Energia Elétrica
AR5:	Quinto Relatório de Avaliação (do IPCC)
AR6:	Sexto Relatório de Avaliação (do IPCC)
BEP:	Barramento de Equipotencialização Principal
BEL:	Barramento de Equipotencialização Local
BEN:	Balço Energético Nacional
CA:	Corrente Alternada
CC:	Corrente Contínua
CE:	Consumo Energético
CEM02:	Centro de Ensino Médio 02 Ceilândia
COP:	Conferência das Partes (da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima)
COP26:	Conferência das Partes sobre Mudança Climática - Edição 26
CRESESB:	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
DPS:	Dispositivo de Proteção contra Surtos
DF:	Distrito Federal
ETI:	Equipamento de Tecnologia de Informação
EN:	Energia Natural
FAPESP:	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FNMC:	Fundo Nacional de Mudança do Clima
GDF:	Governo do Distrito Federal
GEE:	Gases de Efeito Estufa
GF:	Geração Fotovoltaica
GLOBE:	<i>Global Learning and Observations to Benefit the Environment</i>
GPS:	<i>Global Positioning System</i>
GPRS:	<i>General Packet Radio Service</i>
HSP:	Horas de Sol Pleno
IBGE:	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEC:	Comissão Eletrotécnica Internacional
INMET:	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO:	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INPE:	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC:	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LCOE:	<i>Levelized Cost of Energy</i>
MCTI:	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MDL:	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MMA:	Ministério do Meio Ambiente

MME:	Ministério de Minas e Energia
NASA:	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NBR:	Norma Brasileira
NDC:	Contribuições Nacionalmente Determinadas
NMOT:	<i>Nominal Module Operating Temperature</i>
NBR:	Norma Brasileira
NR:	Norma Regulamentadora
OM:	Operação e Manutenção
ONU:	Organização das Nações Unidas
ODS:	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PTE:	Plano de Transição Energética
Pmáx:	Potência Máxima
PV:	Energia Fotovoltaica
PID:	<i>Potential Induced Degradation</i>
PR:	<i>Performance Ratio</i>
Procel:	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PRODIST:	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QGBT:	Quadro Geral de Baixa Tensão
Qtd:	Quantidade
RIDE:	Região Integrada de Desenvolvimento Econômico
ROI:	<i>Return on Investment</i>
SFV:	Sistema Fotovoltaico
SEMA:	Secretaria do Meio Ambiente
SIN:	Sistema Interligado Nacional
SPDA:	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas
STC:	<i>Standard Test Conditions</i>
TIR:	Taxa Interna de Retorno
TMA:	Taxa Mínima de Atratividade
Tmax:	Temperatura Máxima
Tmin:	Temperatura Mínima
UCP:	Unidade de Controle de Produção
UNESCO:	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UNFCCC:	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
UNO:	Unidade de Negócios e Operações
UV:	Ultravioleta
VLP:	Valor Líquido Presente
VMP:	Tensão no ponto de Máxima Potência

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Desde meados do século IX, o debate sobre o contexto climático tem avançado para uma esfera global, que cresce a cada ano. As mudanças climáticas e as suas consequências como o derretimento das geleiras e as alterações nas estações do ano, acompanham o aumento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). De acordo com os dados do sexto relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), o aumento de temperatura pode gerar eventos climáticos extremos cada vez mais recorrentes, gerando desastres naturais e óbitos (WRI 2023).

Abordando a temática em um contexto local, tem-se a implementação de iniciativas no Distrito Federal, que buscam contribuir significativamente para o cenário atual. O foco a ser discutido será os pontos levantados no Plano de Mitigação do Distrito Federal, que busca desenvolver atividades em diversos setores com a finalidade de reduzir as emissões de GEE. E alinhado com as propostas do documento desenvolvido pelo governo do Distrito Federal, o mesmo instituiu a Política de Mudança Climática (Lei nº 4.797), que estabeleceu preceitos para a cumprimento dos acordos estabelecidos nas convenções das Nações Unidas (GDF 2012) (SEMA-DF 2021).

A partir do pilar de Energia levantado pelo Plano de Mitigação, é possível entender a participação da energia fotovoltaica no enfrentamento dos desafios citados anteriormente. E, reconhecendo a capacidade solar da capital do país com uma das melhores, há uma possibilidade muito atrativa para ser explorada. Sendo assim, o presente trabalho aborda a elaboração e a viabilidade de um sistema fotovoltaico para geração de energia renovável, ao passo que analisa a sua contribuição para as metas estipuladas pelo governo federal (SEMA-DF 2021).

1.2 MOTIVAÇÃO

Diante dessas provocações, a redução das emissões de GEE torna-se uma prioridade para as entidades governamentais, empresariais e a sociedade civil como um todo, para que seja reduzido os impactos negativos em prol de um futuro mais sustentável. Do mesmo modo, entende-se o papel crucial de formar jovens com uma consciência ambiental, para que sejam os futuros agentes da mudança necessária para reverter o quadro atual do mundo.

No estudo realizado pela *World Wildlife Fund Brasil* (WWF) e pela Universidade de Brasília (UnB), denominado “Potencial da Energia Solar Fotovoltaica de Brasília”, tem-se o vislumbre acerca da instalação de energia solar em prédios públicos. As análises em diversos cenários revelam que a área necessária para a implementação destes sistemas é consideravelmente pequena, se consideramos a área total disponível (WWF 2016).

Sendo assim, o propósito do estudo é viabilizar e efetivar a instalação de um projeto fotovoltaico em uma escola pública, visando as contribuições para as metas de mitigação atuais, ao passo que se insere um quesito educacional no processo, podendo se tornar o ponto chave para uma evolução exponencial. À medida que se tem um modelo funcional na capital do país, a escalabilidade é facilitada.

1.3 OBJETIVOS DO ESTUDO

1.3.1 Objetivo Geral

Com o presente trabalho objetiva-se promover uma iniciativa sustentável no Centro de Ensino Médio 02 Ceilândia, por meio do projeto técnico e viabilização de um sistema fotovoltaico, que alinhado com as premissas do Plano de Mitigação de CO₂ do Distrito Federal, seja um modelo de contribuição significativa para as metas mundiais relacionadas com as mudanças climática eminentes.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para nortear as demandas necessárias para o alcance do objetivo geral, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a irradiação solar da localização da escola;
- Desenvolver dois estudos de caso, um que englobe apenas o CEM 02, e outro que englobe 6 escolas com o mesmo perfil;
- Avaliar o investimento para execução de cada projeto;
- Calcular as emissões de CO₂ evitadas com a implementação de cada sistema;
- Tratar a inserção dos alunos na execução do projeto, por meio das disciplinas do currículo;
- Associar as contribuições com o Plano de Mitigação do DF.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do trabalho foi pensada para detalhar cada passo envolvido na concepção de um projeto fotovoltaico. Por se tratar de um projeto que terá a inserção de alunos da escola modelo buscou-se facilitar o entendimento da base até o projeto final. Desse modo, a organização foi realizada da seguinte forma:

1. Introdução: Nesse capítulo são abordados o contexto do tema, e a motivação por trás do estudo, assim como os objetivos geral e específicos de todo o estudo.

2. Revisão Bibliográfica: Para revisão utilizou-se de literaturas, normas e artigos científicos, que abordassem a temática das mudanças climática e da situação atual do Brasil e do Distrito Federal. E por fim, foram abordados os temas desenvolvidos pela escola modelo e as iniciativas em execução.

3. Materiais e Métodos: Para o capítulo tem-se o registro de todos os requisitos técnicos utilizados para concepção do projeto, e as suas respectivas normas. São descritas também, todas as etapas do projeto e os materiais e ferramentas utilizadas, desde o levantamento de informações até o projeto elétrico enviado para aprovação da concessionária. Além de abordar os passos utilizados para definição da análise econômica e da análise ambiental e educacional.

4. Resultados e Discussão: Estão presentes no capítulo todos os resultados obtidos nas etapas de projeto, assim como as decisões de projeto adotadas no processo. E a cada finalização de etapa é descrita uma discussão de resultados. São anexados diagramas, tabelas e simulações que compõem o projeto final.

5. Conclusão: Na conclusão tem-se uma síntese de todos os resultados obtidos no estudo. São discretizados os pareceres a respeito da viabilidade técnica, financeira e ambiental do projeto. E apresentado uma lista de sugestões para trabalhos futuros que sigam a mesma vertente de estudo.

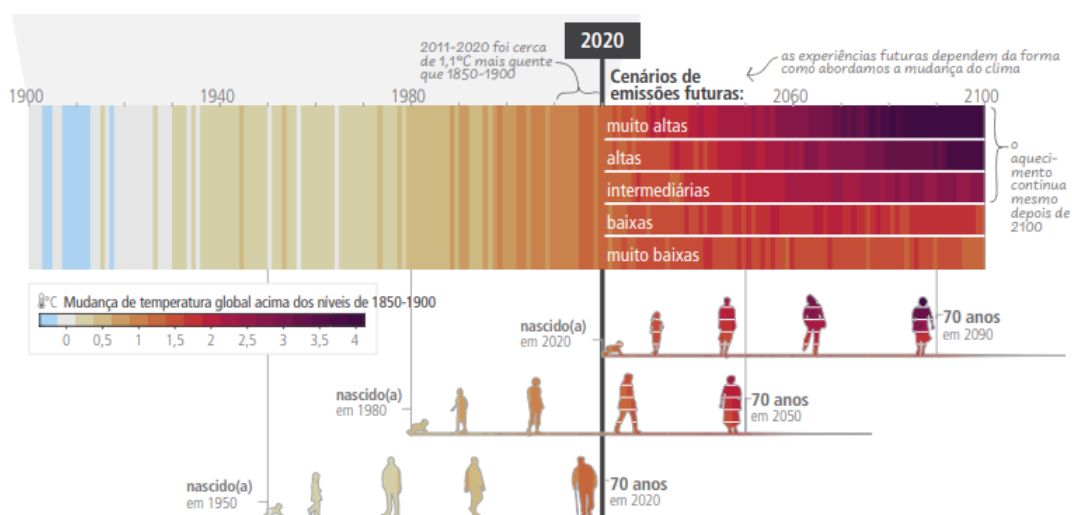
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL E NO MUNDO

É de conhecimento geral que o cronograma de adaptação do clima é de prioridade inconteste. Avaliando o contexto atual com incidência de elevadas ondas de calor e focos de incêndio na Amazônia, a discussão acerca das mudanças climáticas torna-se essencial para minimizar os impactos provocados à biodiversidade e a saúde humana. Como demonstrado pelo relatório do *Global Forest Watch* em 2010, o Brasil possuía uma extensão de 492 milhões de hectares de floresta natural, representando 59% do seu território. Porém, em uma análise recente foi constatado que em 2022, a perda foi de 3,23 milhões de hectares de floresta natural, representando 2 gigatoneladas de emissões de CO₂ (Global Forest Watch, 2023).

No contexto brasileiro, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) avalia que as mudanças climáticas podem atingir 40% da biodiversidade do Nordeste brasileiro até 2060. Esse e outros estudos salientam a suscetibilidade do ecossistema brasileiro diante das mudanças climáticas eminentes. Abordando a temática para um contexto global podemos observar através da projeção abaixo do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), as mudanças e impactos observados ao longo do tempo (FAPESP 2023) (IPCC 2023).

Figura 2.1: Mudanças observadas (1900-2020) e projetadas (2021-2100) na temperatura da superfície global (em relação a 1850-1900).



Fonte: Relatório Síntese que conclui o Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC (IPCC 2023).

Diante desses cenários, para minimizar os futuros impactos, as lideranças de cada país participam de conferências climáticas periódicas (*Conference of the Parties - COP*), que visam a discussão do clima e a elaboração de planos de ação para o combate aos problemas ambientais.

Além disso, são firmados acordos que forçam os países integrantes a reduzir suas emissões de gases do efeito estufa (GEE's). Para tratar especificamente a temática acerca das mudanças climáticas, tem-se o Acordo de Paris, que direciona as atenções dos países para limitar o aumento da temperatura da Terra até o final do século XXI para padrões seguros.

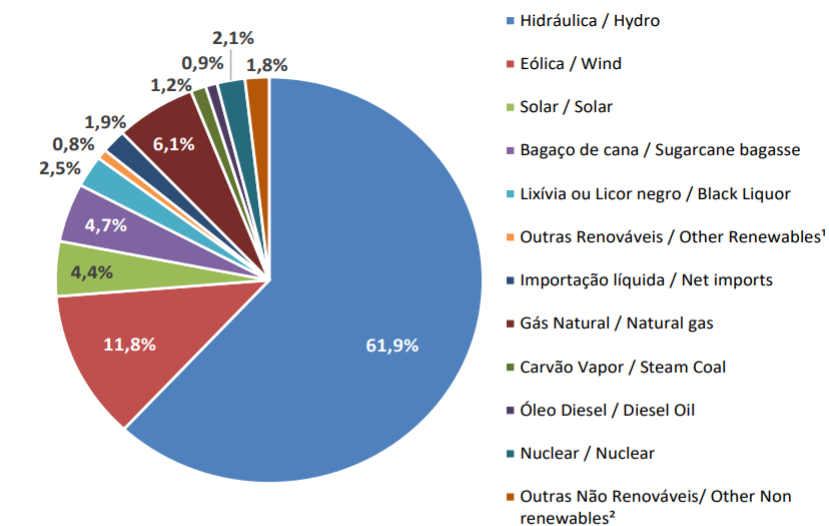
E, na busca pelos limites adequados, cada país apresentou neste acordo seus planos de ações internas, para reduzirem as suas respectivas emissões, através da concepção da Contribuição Nacionalmente Determinada (Nationally Determined Contribution - NDC), que envolve todos os compromissos voluntários frente aos desafios discutidos.

De acordo com o encarte “Acordo de Paris” desenvolvido pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) do governo federal brasileiro, os compromissos firmados na NDC brasileira determinam a redução das emissões dos GEE's em 37% em 2025, somados a contribuição posterior de 43% em 2030, em relação aos níveis registrados em 2005 (MCTI 2017).

Tendo em vista as premissas firmadas pelo Brasil, é importante ressaltar a publicação realizada pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), que afirma o distanciamento do país com as metas estabelecidas no Acordo de Paris. Expondo a afirmação em dados, temos a constatação de que o Brasil é o 5º maior emissor de GEE do mundo, alcançando em emissões brutas no ano de 2021, cerca de 2,4 giga (bilhões) de toneladas de carbono equivalente, sendo o setor energético a terceira área do país que mais contribui para as emissões (IEMA 2022).

Na abordagem do setor energético tem-se algumas frentes de análise, podendo estas englobar a queima de combustíveis fósseis até uma transição energética para fontes de energia renovável. Apesar do Brasil ser um país com uma matriz elétrica predominantemente renovável, como mostra o gráfico 2.2 do Balanço Energético (BEN) de 2023 do Ministério de Minas e Energia, o Programa BID-CEBRI-EPE de Transição Energética (PTE) aponta as dificuldades que o Brasil pleiteia para alcançar a neutralidade de carbono até 2050 por meio da transição energética (MME 2023) (CEBRI 2023).

Figura 2.2: Estrutura de oferta interna de energia elétrica no Brasil em 2022.



Notas / Notes:

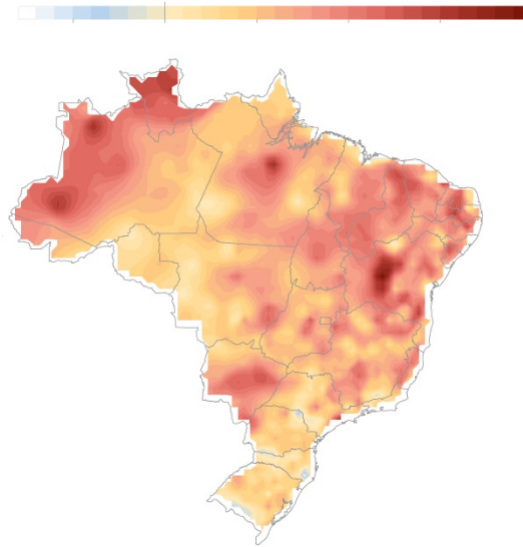
1. Inclui Lenha, Biodiesel e Outras renováveis / Includes Firewood, Biodiesel and Other Renewables

2. Inclui Óleo Combustível, Gás de Coqueria, Outras Secundárias e Outras Não-Renováveis / Includes Fuel Oil, Coke Oven Gas, Other Secondaries and Other Non-Renewables

Fonte: BEN 2023 - Ministério de Minas e Energia (MME 2023).

Embora existam empecilhos para transformação do setor brasileiro de energia, buscar alternativas para superá-los é uma tarefa crucial para provocar contribuições significativas na mitigação de CO₂. A sociedade brasileira como um todo vem sofrendo drasticamente com as mudanças climáticas atuais, seja através de desastres naturais ou pelos óbitos recorrentes, é uma corrida contra o tempo. O gráfico abaixo do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) fornece uma visualização facilitada do que foi dito anteriormente, indicando o Norte, Nordeste e Centro-Oeste como regiões que apresentam um maior aumento de temperatura (MCTI 2023).

Figura 2.3: Análise de tendência de temperaturas máxima no Brasil.



Fonte: Adapta Brasil MCTI, estudo realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (MCTI 2023).

De forma análoga o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) registrou um recorde de aumento das temperaturas médias no Brasil, pelo quarto mês seguido, avaliando os meses de Julho a Outubro de 2023. Os resultados apresentados na figura 2.4 corroboram com a definição de que o ano de 2023 será o mais quente desde as últimas décadas (INMET 2023).

Figura 2.4: Recorde de Temperatura Brasil 2023.

Temperatura média atinge recorde no Brasil pelo quarto mês seguido			
	Temperatura observada	Temperatura média	Desvio
JULHO	23,0°C	21,9°C	1,0°C
AGOSTO	24,3°C	22,9°C	1,4°C
SETEMBRO	25,8°C	24,2°C	1,6°C
OUTUBRO	26,4°C	25,2°C	1,2°C

INMET

Fonte: INMET - Instituto Nacional de Meteorologia (INMET 2023).

2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO DF E RIDE

As Mudanças Climáticas aplicadas no contexto do Distrito Federal (DF) e sua região integrada de desenvolvimento do DF e entorno (RIDE) ganham forma de modo particular, justificados pela sua localização geográfica e atributos específicos.

Analisando os índices de monitoramento fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para composição do relatório "Mudanças Climáticas do DF e RIDE", é possível constatar uma diminuição crescente nos dias com umidade relativa do ar abaixo de 30%, além de destacar o aumento de quase 2% na temperatura mínima média da região e uma projeção de redução nas precipitações. E mesmo que seja um relatório produzido em 2016, é notável que os eventos climáticos estão sendo evidenciados ao passar dos anos, perturbando não apenas o meio ambiente, mas também a saúde pública e a infraestrutura local (SEMA-DF 2016).

Como observado na figura 2.4, as máximas de aquecimento se concentram na região Centro-Oeste que confirmam o estudo realizado na nota técnica da Secretaria do Meio Ambiente (SEMA). Sendo de grande relevância, as projeções abordadas para os diferentes períodos que continuam a indicar uma aumento crescente e preocupante, como é possível verificar na figura 2.5 retirada do relatório citado (SEMA-DF 2016).

Figura 2.5: Anomalias de temperatura esperadas para o DF e a RIDE.

Tabela 4 - Projeção de Intervalos de aumentos de temperaturas para o DF e RIDE (°C)

PERÍODO	VERÃO (DJF)		OUTONO (MAM)		INVERNO (JJA)		PRIMAVERA (SON)	
	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX
2011-2040	1 a 1.5	2.5 a 3	1 a 1.5	2.5 a 3	1 a 1.5	2.5 a 3	2 a 2.5	2.5 a 3
2041-2070	2 a 2.5	4 a 4.5	2 a 2.5	4 a 4.5	2 a 2.5	4 a 4.5	2.5 a 3	4 a 4.5
2071-2100	2 a 2.5	6 a 7	2 a 2.5	7 a 8	2 a 2.5	7 a 8	3 a 3.5	7 a 8

Fonte: Nota Técnica: Mudanças Climáticas no DF e RIDE, 2016 (SEMA-DF 2016).

E conduzindo para uma abordagem voltada ao setor energético, temos o “Inventário do Distrito Federal de Emissões de GEE”, elaborado pela SEMA para avaliação dos anos 2005-2018. Este inventário aponta que as emissões de CO₂ constituem 97% de toda a emissão dos gases no setor de energia para o período analisado, além de atestar que para as emissões de GEE no DF, o setor energético representa 53,39% das emissões totais de energia para 2018 (SEMA-DF 2021).

Considerando o cenário como um todo e de posse dos dados do censo 2022, em que constatou que Brasília é a 3ª maior cidade do país, torna o processo de transição energética essencial para garantir os direitos fundamentais para a população e uma qualidade de vida adequada frente às mudanças climáticas (IBGE 2022).

E para assegurar o cumprimento das medidas determinadas na Convenção - Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC em inglês), o governo do Distrito Federal sancionou

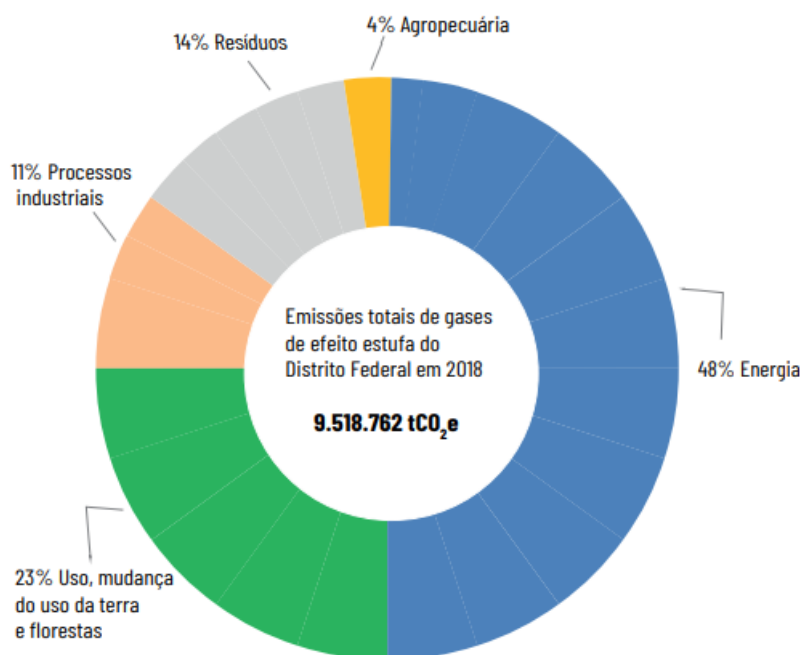
a lei nº 4.797, que institui a Política de Mudança Climática do DF com o intuito de formular estratégias para a redução das emissões advindas das queimadas e do desmatamento (GDF 2012).

2.3 PLANO DE MITIGAÇÃO DO DISTRITO FEDERAL

Visando amenizar as circunstâncias apresentadas, a Secretaria do Meio Ambiente (SEMA) desenvolveu o “Plano de Mitigação - Para redução da emissão de GEE das principais fontes emissoras no território do Distrito Federal”. O documento propõe modelos para contribuição distrital acerca do enfrentamento das mudanças climáticas globais no contexto do acordo de Paris (SEMA-DF 2021).

Além de levantar medidas para a finalidade citada, o Plano de Mitigação do DF aborda políticas públicas para oportunizar a educação ambiental. E com base no gráfico relacionado abaixo, referente a contribuição de emissões de GEE dos diversos setores do Distrito Federal, o documento traz consigo um desdobramento de cada setor e sugere um conjunto de ações que podem ser adotadas (SEMA-DF 2021).

Figura 2.6: Contribuição relativa das emissões de Gases de Efeito Estufa dos diferentes setores no Distrito Federal: Emissões totais em 2018.



Fonte: Plano de Mitigação (SEMA-DF 2021).

Por meio do intermédio das análises realizadas em todo o plano de ações, é possível constatar que com uma instalação potencial de 100 MW de GF, a geração de energia do DF seria integralmente estabelecida por fontes renováveis. Apesar disso, a estimativa a respeito da redução das

emissões de CO₂, ainda não representariam uma parcela significativa, sendo esta de 485 toneladas de CO₂. Porém garante uma geração de energia totalmente sustentável frente as metas que precisam ser cumpridas em 2030. As demais contribuições analisadas no “Plano de Mitigação” encontram-se na lista abaixo (SEMA-DF 2021).

Figura 2.7: Lista de Ações de Mitigação ordenada pelo respectivo impacto de redução de emissões de GEE.

LISTA DE AÇÕES DE MITIGAÇÃO ORDENADA PELO RESPECTIVO IMPACTO DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GEE	Emissões (t CO ₂ e)
PROGRAMA DE REDUÇÃO DE TRANSIÇÕES DE USO DA TERRA - REDUÇÕES ANUAIS DE CO2 EM 2030	1.849.100
QUEIMA (FLARE OU GERAÇÃO DE ELETRICIDADE) DO METANO DE ATERRO SANITÁRIO E PARTE DO LIXÃO DA ESTRUTURAL (MDL)	566.916
INCENTIVO AO USO DE BIOCOMBUSTÍVEL, EM PARTICULAR ETANOL	533.800
criação do programa de proteção florestal via código florestal: validação do CAR-DF e recuperação florestal de APPS e RLS, com o apoio do CRA	528.000
BIODIGESTÃO	469.920
AMPLIAÇÃO DO SISTEMA BRT COM SUBSTITUIÇÃO DE 30%	338.000
USO DO COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR)(INDÚSTRIA DE CIMENTO)	218.317
RECICLAGEM	79.411
SISTEMAS DE TRÁFEGO INTELIGENTE PARA VEÍCULOS E RODOVIAS	71.700
IMPLANTAÇÃO DO VLT	55.700
PROGRAMA DE FLORESTAS URBANAS - REMOÇÕES ANUAIS DE CO2	33.132
COMPOSTAGEM	30.797
USO DO TELETRABALHO PARA 20% DA FORÇA DE TRABALHO DO GDF	22.200
REDUÇÃO DA DISTÂNCIA PERCORRIDA PELOS VEÍCULOS PARA RETORNOS	22.000
REDUÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS	7.800
USO DE ETANOL HIDRATADO NA FROTA PRÓPRIA DO GDF	4.201
USO DE TRANSPORTE NÃO MOTORIZADO	610
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA DESCENTRALIZADA	485
EFICIENTIZAÇÃO DOS PRÉDIOS PÚBLICOS DO GDF	54
SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO	-
EXPANSÃO DO METRÔ	-
AGRICULTURA DE BAIXO CARBONO NO DF	-
EDUCAÇÃO AMBIENTAL	-
TOTAL	4.832.143

Fonte: Plano de Mitigação (SEMA-DF 2021).

2.4 PROMOÇÃO DE ENERGIA SOLAR NO DISTRITO FEDERAL

A promoção de energia solar no Distrito Federal (DF) é uma forte frente das ações governamentais, uma vez que no seu “Plano Estratégico” de 2019 a 2060 é apresentado um desafio de consolidação da matriz de energia limpa como base, aumentando em 25% a geração através de fontes renováveis. Além de considerar que Brasília é a capital Federal, com o papel de im-

pulsionar a inovação e sustentabilidade em todo país, há a constatação de que possui uma das melhores irradiações solar do Centro - Oeste, propiciando a geração solar em toda sua extensão (GDF 2019).

Para corroborar a rentabilidade da diversificação da matriz energética por meio de geração fotovoltaica, tem-se o estudo concebido pela WWF Brasil (*World Wildlife Fun*) e a Universidade de Brasília (UnB), “Potencial da Energia Solar Fotovoltaica de Brasília”, que revela que 0,41% a área do DF é necessária para gerar toda a necessidade energética da região com energia solar fotovoltaica. A análise ainda evidencia a utilização de edificações do setor público para implantação dos sistemas e cita principalmente o ganho educacional atrelado a instalação de um sistema fotovoltaico em escolas, enfatizando as contribuições para os professores, alunos e comunidades (WWF 2016).

Aliado as premissas e análises acerca da viabilização de energia solar no Distrito Federal (DF), existe em execução na região o projeto CITInova, um planejamento integrado realizado pelo MCTI para desenvolver soluções inovadoras que forneçam métodos e ferramentas para a promoção de cidades mais sustentáveis. A partir da componente 2 do projeto, que trata sobre os benefícios dos investimentos integrados em infraestrutura na adoção de novas tecnologias, tem-se o desenrolar de estudos para elaboração de um plano para a execução efetiva da energia solar no DF (SEMA-DF 2023).

Em 2023, através do CITInova, foi instalada uma usina central no Parque Ecológico de Águas Claras com um total de 962,77 MWh de energia gerada. Existindo uma expectativa de instalação de mais sistemas de menores dimensões em alguns parques ecológicos da capital. Ademais o objetivo dessas ações é inserir essas novas tecnologias no DF, além de tornar esses projetos uma referência para a educação sustentável promovida nas escolas (SEMA-DF 2023).

2.5 LEGISLAÇÃO E INCENTIVOS

Na busca por legislação e incentivos que justifiquem a viabilidade da transição energética, temos a lei nº 6.274, que concebe indicações para Política Distrital de Incentivo à Geração e ao Aproveitamento de Energia Solar, Eólica e de Biomassa e à Cogeração. Ao passo que a lei apoia a execução de sistemas derivados de energia renovável é estimulado a promoção de estudos que projetem a aplicação e ampliação dos mesmos. Sendo o principal motivador deste trabalho o Art. 4º, que aponta para o Poder Executivo a demanda de desenvolver projetos voltados para instalação de sistemas fotovoltaicos em escolas e demais vertentes (GDF 2019).

Para dar início ao marco regulatório que estimulou à expansão da energia solar no Brasil, tem-se a Resolução 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que criou um conjunto de regras e a estrutura de compensação da energia injetada na rede, necessárias para atrair o consumidor para esse tipo de investimento. Um dos principais pontos abordados pela normativa é a compressão acerca dos tipos de geração, que compreende-se entre microgeração e minigeração,

sendo definidos pela (ANEEL 2012):

- Microgeração: unidade geradora de energia elétrica, com potência instalada inferior ou igual a 100 kW (considerando a revisão atual) e que utilize das fontes limpas de energia;
- Minigeração: unidade geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW (considerando a revisão atual) e que utilize das fontes limpas de energia.

Conjuntamente existem resoluções normativas da ANEEL, que estabelecem critérios para garantir a correta conexão, instalação e faturamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica. A resolução nº 1.000 de 2021, estabelece direitos e deveres do consumidor e demais clientes da empreitada, e indica no Art. 290 o custo de disponibilidade ¹ do sistema elétrico de acordo com o tipo de fornecimento, dado importante para avaliação correta do faturamento de um sistema fotovoltaico. Sendo o seu valor em espécie determinado pela (ANEEL, 2021):

- 30 kWh, se monofásico ou bifásico a dois condutores;
- 50 kWh, se bifásico a três condutores; ou
- 100 kWh, se trifásico.

Nesse contexto é preferível que o Poder Público adote medidas de viabilização de geração de energia fotovoltaica em seus próprios empreendimentos, visando a taxa de economia para os cofres públicos. Com essa justificativa foi criado o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), que garante diretrizes de ampliação da geração distribuída em edifícios públicos, como escolas e universidades. Os princípios abordados orientam os quesitos de viabilidade econômico-financeira, modalidade tarifária e a capacidade reduzida do poder público em investir em novas tecnologias com próprio recurso (MME 2021).

Do mesmo modo, o governo brasileiro reconhece a importância do incentivo a implementação de energia solar no seu território através do Convênio ICMS 16/2015, do Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ), que celebra a isenção do imposto que é cobrado pela geração de energia. Ademais, o convênio explica detalhadamente as regras para enquadramento da isenção, limitando a aplicação somente à compensação de energia elétrica produzida por microgeração e minigeração, não considerando custo de disponibilidade, energia reativa e outros encargos (CONFAZ 2015).

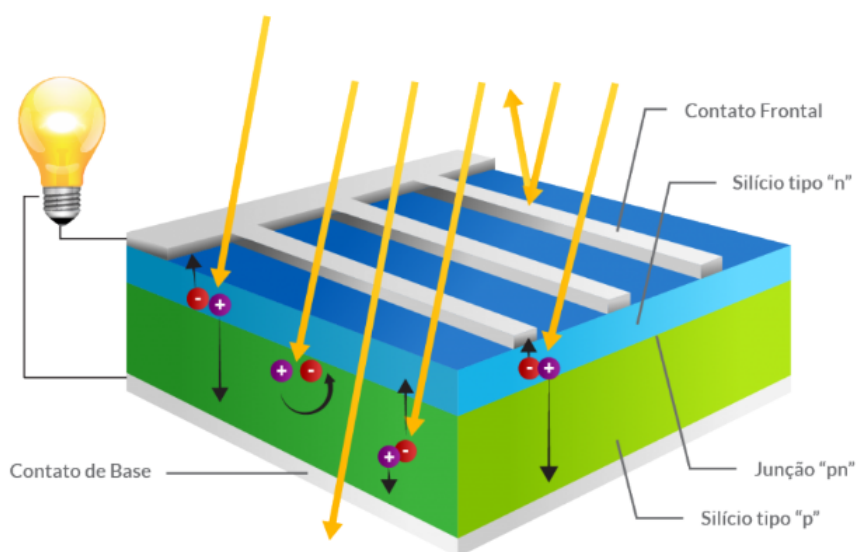
Tratando de incentivos financeiros tem-se o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima (FNMC), criado pela Lei nº 12.114 e regulamentado pelos decretos nº 9.578 e nº 10.143, que é um instrumento da política nacional com intuito de subsidiar projetos e empreendimentos cujo objetivos sejam a redução das emissões de GEE e adaptação em decorrência da mudança do clima. A operação dos recursos relacionados ao reembolso são de responsabilidade do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) (MMA, 2023).

¹Taxa mínima cobrada pelas distribuidoras de energia, referente ao transporte do serviço de eletricidade até os consumidores.

2.6 VISÃO GERAL DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

A grande inserção dos sistemas fotovoltaicos (SFV) no mercado, se justifica pela necessidade levantada pelos acordos e conferências que apontam para a demanda de energia sustentável. O princípio de funcionamento dos sistemas fotovoltaicos é baseado na conversão direta da luz em eletricidade, através do efeito fotovoltaico. O módulo fotovoltaico é composto de pequenas unidades de células fotovoltaicas, e a sua operação ocorre através da absorção de fótons presente nos raios solares, os fótons que por sua vez são absorvidos geram uma excitação nos elétrons que percorrem por meio das células fotovoltaicas, gerando assim a energia elétrica.

Figura 2.8: Representação do funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício cristalizado.

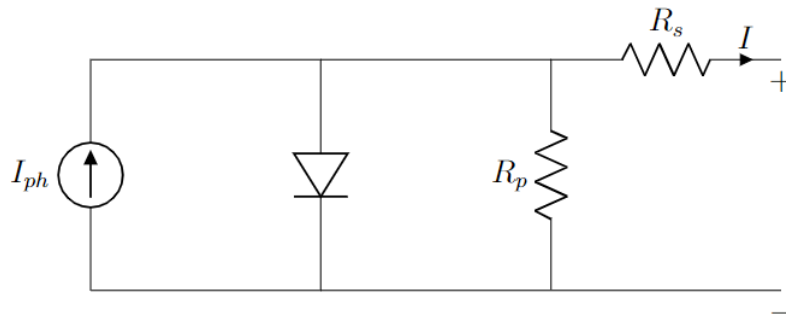


Fonte: Blue Sol, Agosto de 2023. Disponível em <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>.

O desmembramento da célula em duas bandas de energia de um material semicondutor é da ordem de 1 eV, durante a sua concepção o material é dopado de impurezas² para que cada banda possua uma carga elétrica positiva e outra negativa, uma vez que essa diferença de polaridade dá origem ao campo elétrico, essencial para o funcionamento adequado da célula fotovoltaica.

²Adição de impurezas em um material semicondutor com o intuito de alterar suas características elétricas.

Figura 2.9: Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.



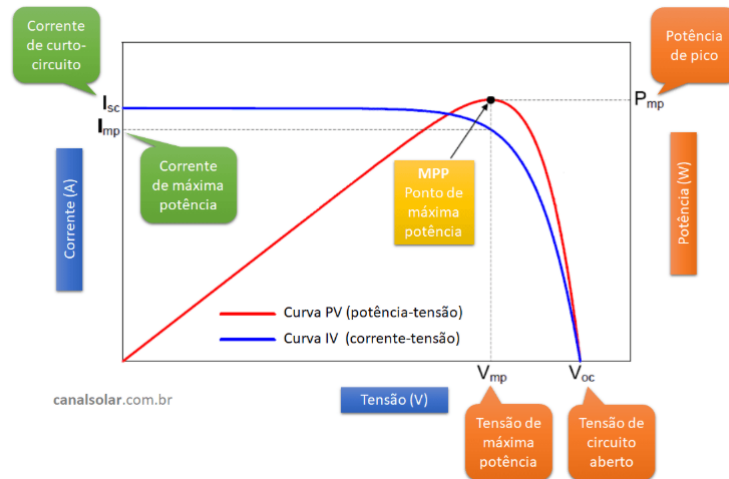
Fonte: *Conexão de um Sistema Solar Fotovoltaico na rede de distribuição de energia elétrica.* (RIBEIRO 2015).

Na Figura 2.9, as siglas indicadas no diagrama são respectivamente:

- I_{ph} - Fotocorrente gerada pela luz na célula fotovoltaica;
- D - Diodo equivalente (junção p-n);
- R_p - Resistência em paralelo da célula fotovoltaica;
- I - Corrente de saída da célula fotovoltaica;
- R_s - Resistência em série da célula fotovoltaica.

Prosseguindo com a análise dos parâmetros da célula solar, temos o fator de preenchimento que é a razão entre a potência máxima de saída do módulo (P_{MP}) real e a potência de saída para uma curva retangular ($P_{MÁX}$). O intuito é medir o quão distante a curva $I \times V$ está de um formato ideal. No mais, cabe a atenção nos *datasheets* a respeito da potência de pico, eficiência e os coeficientes térmicos do módulo fotovoltaico escolhido.

Figura 2.10: Curva $I \times V$ em um painel solar.



Fonte: Canal solar. Acessado em: 10 de Outubro de 2023.

Das vantagens pertinentes ao sistema fotovoltaico, tem-se o fato de conceber energia elétrica através de uma fonte de energia limpa, renovável e inesgotável, proporcionando para o ecossistema uma geração de baixo impacto ambiental e para os consumidores uma alternativa à rede elétrica convencional, que ocasiona uma maior independência.

Cada sistema fotovoltaico possui as suas particularidades, que variam de acordo com a necessidade da unidade consumidora e os fatores locais. A depender da demanda de projeto tem-se a aplicação específica dos componentes, no geral segundo o (Balfour 2016) um sistema FV, possui os seguintes elementos:

- **Células fotovoltaicas** - Dispositivos elétricos capazes de converter a luz em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico, que gera uma tensão e uma corrente;
- **Módulo fotovoltaico** - Conjunto de células fotovoltaicas conectadas em série ou em paralelo, em que se fornece tensão e corrente para o sistema;
- **Arranjo** - Agrupamento de módulos fotovoltaicos, conectados em série ou em paralelo, de acordo com a necessidade do projeto. Tem-se o arranjo disposto em estruturas de fixação;
- **Bateria** - Dispositivo responsável pelo armazenamento da energia solar produzida, energia esta que será utilizada em situações que não há a geração de energia, o que acontece normalmente a noite ou em dias nublados;
- **Inversor** - Elemento encarregado de converter a energia em corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), sendo a energia comumente utilizada nos equipamentos residenciais;
- **Controlador de carga** - Dispositivo obrigatório em sistemas que utilizam baterias, incumbido de regular, carregar e controlar a voltagem de entrada nelas;

- **Cabeamento** - Componente do sistema responsável por interligar todos os componentes;
- **Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS)** - Incumbido de proteger o sistema contra sobretensões transitórias na rede elétrica, fazendo o desvio das correntes de surto.

Tratando das particularidades dos sistema fotovoltaicos, tem-se a divisão em três tipos, conectados à rede (*On Grid*), isolados (*Off Grid*) ou híbridos. Ambos geram a energia de modo similar, através dos módulos fotovoltaicos, o que diferencia é a ligação com a rede elétrica.

1. **Sistema On Grid ou Grid Tie (Geração Distribuída - GD):** São os sistemas conectados à rede elétrica das concessionárias, sendo o seu uso justificado para gerar uma economia na fatura de energia, por intermédio do consumo de uma energia renovável. Para esse sistema tem-se os painéis solares, o inversor *On Grid* e os dispositivos de proteção;
2. **Sistema Off Grid (Geração Isolada):** É um sistema isolado, sem quaisquer conexão com a rede elétrica da concessionária, sendo uma solução indicada para lugares remotos com dificuldade de acesso à energia. Para este caso são inseridas as baterias que armazenam a energia produzida, somadas ao inversor solar Off Grid, as placas solares e o controlador de carga;
3. **Sistema Híbrido:** Refere-se ao sistema misto de geração, que pode conter as fontes On Grid e Off Grid. Pode contar outras fontes de energia como complemento para o abastecimento requerido.

2.7 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E OBJETIVOS DA ONU

É notável a busca pelo alinhamento adequado das necessidades mundiais com as decisões tomadas pelos governos. Em conformidade, o Plano Estratégico Distrital de 2019-2060, sintetiza o seu foco nas considerações dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) e ainda aborda o comprometimento em implementar a Agenda 2030 (GDF 2019) (ONU 2015).

Globalmente, os 17 ODS integram um panorama de desenvolvimento e execução de políticas públicas que guiam a humanidade até 2030. Eles abordam temáticas essenciais para o progresso humano, e definem quatro pilares de desenvolvimento, social, ambiental, econômico e institucional. A Agenda 2030 traz consigo o desafio de envolver profundamente os variados setores da sociedade para a busca por resultados reais e alinhados com as expectativas envolvidas na temática. Estamos num momento delicado que exige a integração de todos para o cumprimento dos ODS, e isso requer a definição dos compromissos, o investimento de recursos e de uma atuação colaborativa dos setores envolvidos (ONU 2015).

Elucidando acerca do conceito de Desenvolvimento Sustentável, a definição do WWF Brasil é a que mais se alinha para o presente trabalho:

"A definição mais aceita para desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro."(WWF Brasil, 2023).

O projeto concebido neste trabalho, aborda energia sustentável, ações climáticas, parcerias de execução e ainda engloba um viés educacional. Sendo assim, o intuito dessa seção é explorar a conexão do estudo proposto com os ODS, evidenciando as contribuições para se alcançar um desenvolvimento sustentável.

1. **Energia Acessível e Limpa (ODS 7):** O ODS almeja um acesso à energia barata, confiável, sustentável e renovável de modo igualitário para todos. O estudo contribui diretamente para o alcance da meta 7.2 que busca manter a participação ativa de energias renováveis na matriz energética brasileira, além de ser uma forma de expandir e aprimorar os recursos empregados para um fornecimento de energia elétrica sustentável, conforme indica a meta 7.b (IPEA, 2023).
2. **Educação de Qualidade (ODS 4):** O ODS 4 busca assegurar uma educação inclusiva e equitativa, ao passo que promove oportunidade para todos ao longo da vida. O estudo através do seu viés educacional, busca a implantação de uma educação sustentável em uma escola modelo, para que posteriormente sirva de exemplo às demais escolas da rede do Distrito Federal, assim como as escolas do país. O objetivo principal é que os alunos tenham a oportunidade de desenvolver uma consciência ambiental e sejam disseminadores das práticas sustentáveis para a comunidade (IPEA, 2023).
3. **Ação Contra a Mudança Global do Clima (ODS 13):** Dada a urgência em garantir limites seguros para conter as mudanças do clima, o ODS 13 indica a necessidade de tomar medidas urgentes para o combate às mudanças climáticas. O projeto no geral, visa a redução das emissões de GEE ao passo que promove hábitos mais sustentáveis na comunidade, o que diretamente vai de encontro às premissas e indicadores do ODS 13 (IPEA, 2023).
4. **Parcerias e Meios de Implementação (ODS 17):** O ODS 17 legitima a carência em fortalecer os meios de aplicação das medidas sugeridas e revitalizar a parceria global para a busca da sustentabilidade. O trabalho desenvolvido, promove a colaboração entre setores, público e privado, além do governo, para a integração da energia com a escola base. Do mesmo modo, são abertos espaços para demais parcerias que busquem a implementação de iniciativas sustentáveis (IPEA, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Tratando da definição do objeto de estudo, o Centro de Ensino Médio 02 da Ceilândia, tem-se a sua escolha definida pelo contato realizado com a Universidade de Brasília em busca de desenvolver um SFV aliado à frente de energias renováveis do seu currículo. Partindo das iniciativas em andamento do Projeto Político e Pedagógico da escola, buscou-se estabelecer critérios para a elaboração de uma proposta educacional que se adequasse à realidade da comunidade escolar e que integrasse o sistema projetado.

Apresentando um resumo da escola, tem-se os seguintes dados informados pela coordenação no dia 18 de Outubro de 2023 acerca do seu ambiente pedagógico:

- Possuem 1.987 estudantes;
- São 56 turmas no diurno;
- Tem-se 30 salas que são usadas para as aulas;
- 03 laboratórios (Química, Física e Biologia);
- 01 sala de informática;
- 01 Centro Cultural;
- 01 Auditório com capacidade para 300 pessoas;
- 01 sala de segunda língua - libras;
- 01 sala de recursos para área de Humanas;
- 01 sala de recursos para área de Ciências;
- 01 sala de recursos para Códigos e Linguagem; e
- 01 sala de itinerância - para Coordenação dos Orientadores Educacionais.

A seguir, tem-se uma vista aérea do CEM02, obtida através do *Google Earth*:

Figura 3.1: Vista aérea Centro de Ensino Médio 02 Ceilândia - Distrito Federal.



Fonte: Google Earth.

No presente capítulo, serão apresentados os critérios e métodos adotados para o desenvolvimento do Projeto Fotovoltaico na escola modelo, assim como as ferramentas que foram utilizadas para complementar os resultados.

Para garantir uma abordagem lógica, inicialmente serão descritas as atividades sustentáveis da escola, seguido da abordagem utilizada para definição dos requisitos educacionais do projeto. Na continuidade, serão abordados os requisitos técnicos, financeiros e ambientais atrelados a execução da proposta.

Para melhor detalhamento e avaliação da viabilidade do investimento, serão abordadas duas situações de projeto distintas:

Caso 1 - Projeto Fotovoltaico de Microgeração: Este projeto tem como objetivo principal a economia de energia em todo o consumo do Centro de Ensino Médio 02 Ceilândia. Trata-se do cenário que será de fato executado na escola.

Caso 2 - Projeto Fotovoltaico de Minigeração: Neste caso, o projeto será desenvolvido para compensar a energia consumida por seis escolas, incluindo o Centro de Ensino Médio 02 Ceilândia. Trata-se de um estudo para verificação da contribuição do sistema para a redução da emissão de CO₂, o sistema será desenvolvido de forma simples e não serão abordadas todas as características pertinentes aos projetos deste porte.

Apesar de muitos critérios serem comuns a ambos os casos, eventuais divergências serão

explicitamente mencionadas em cada etapa de projeto.

3.1 CENTRO DE ENSINO MÉDIO 02 CEILÂNDIA DF

Partindo do princípio de Educação Sustentável é necessário abordar as iniciativas realizadas na escola que é o objeto principal de estudo para esse trabalho. O Centro de Ensino Médio 02 da Ceilândia, localizada no Distrito Federal surge como um modelo de promoção ativa de educação ambiental, e tem um notório destaque na inclusão de temas ambientais no currículo escolar. As iniciativas foco englobam programas de gerenciamento de resíduos, reciclagem, horta escolar, neutralização de carbono e muito mais.

Aliado às suas atividades, a implementação de um sistema fotovoltaico proporciona uma ferramenta educacional que abrange tanto os alunos, quanto os professores e a comunidade em temáticas acerca de hábitos sustentáveis e energias renováveis. Além de possibilitar um aprimoramento das iniciativas já desenvolvidas pela escola, uma vez que os alunos desenvolvem uma compreensão geral do sistema, ao passo que assimila as implicações ambientais da substituição da energia convencional pela energia solar.

3.1.1 Programa de Formação dos Comitês Jovens para a Sustentabilidade

O Comitê Jovens para a Sustentabilidade é um compromisso do Centro de Ensino Médio 02 para consumação da sustentabilidade no ambiente escolar, é uma demonstração que além de cumprir as regulamentações ou predisposições atuais, há uma busca para desenvolver uma consciência ambiental nos estudantes. Dessa forma, a iniciativa parte como um estímulo para a formação de novos líderes, ao passo que proporciona o trabalho em equipe e a responsabilidade social dos alunos.

Na elaboração do Comitê de Jovens pela Sustentabilidade, participou integrantes das seguintes entidades, Programa CITInova e SEMA - DF, com o intuito de coordenar as orientações acerca da atuação do comitê para que seja garantido a sustentabilidade socioambiental. Desse modo, foram definidos os seguintes grupos focais:

- **Recursos Hídricos - Governança e Cidadania Hídrica:** A discussão neste grupo circunda as deliberações em fóruns mundiais e distritais, a fim de analisar direta e indiretamente as suas influências nos cursos d'água da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto;
- **Mudanças Climáticas:** Tratando da observação sobre a mitigação do clima no Distrito Federal, através da iniciativa de produção de crédito de carbono na escola, analisando os cenários atuais de extremo calor e poluição e projetando o seus impactos para a comunidade;
- **Resíduos Sólidos:** Estudo direcionado pelo próprio gerenciamento de resíduos da escola, associado ao Plano Nacional de Resíduos Sólidos, e ainda buscando o desenvolvimento

da compostagem e a produção do minhocário nas dependências da escola. Abordando as iniciativas do fórum distrital de resíduos sólidos e reciclagem no DF;

- **Defesa do Cerrado:** Discussão voltada para o plantio de mudas do cerrado na própria escola, partindo da identificação das espécies e reconhecimento das mesmas com o intuito de criar uma trilha pedagógica, que será envolvida no currículo acadêmico;
- **Conferências Infante Juvenil sobre o Meio Ambiente:** Parte do incentivo e inserção dos próprios alunos nas conferências nacionais e internacionais, para participação de discussões voltadas para o meio ambiente. Além de ser envolvido nas disciplinas curriculares para confecção de documentos que alertem e cobrem as governanças locais os seus compromissos sustentáveis;
- **Cidades Sustentáveis:** O grupo busca fortalecer as características de uma cidade sustentável através da inserção das metodologias no ambiente escolar. Buscam o desenvolvimento de um telhado verde para a redução do clima, painéis solares para os gastos energéticos e para reduzir as emissões de CO₂, e muito mais.

De forma concisa, o Comitê reflete uma convenção importante em capacitar os jovens para os desafios inerentes ao século XXI, os tornando os agentes das mudanças ambientais, tanto em sua comunidade como na sociedade.

3.1.2 Plano de Gerenciamento dos Resíduos Sólidos produzidos na Escola

Em caráter permanente, o CEM 02 implementou a partir de 2023 o plano de gerenciamento de resíduos sólidos na escola, em parceria com o SEMA - DF, o Programa CITInova, a Secretaria de Meio Ambiente (SEMA) da UnB e a Associação Recicle a Vida (Ceilândia Norte). O gerenciamento abraça sistematicamente a coleta, a separação e destinação correta dos resíduos produzidos na escola. Direcionado pela busca de atividades sustentáveis, o seu propósito está alinhado com as concepções abordadas na Carta da Terra do Ministério do Meio Ambiente (MMA) e os ODS, e menciona os padrões determinados pela Agenda 21 em suas variadas proporções (MMA, 2023) (MMA, 2023).

Acerca dos seus objetivos, podemos citar:

- Realização de um inventário da quantidade dos resíduos concebidos na escola e a sua devida classificação (papel, vidro, restos orgânicos e demais);
- Identificação dos melhores pontos para recolhimento dos resíduos produzidos na escola;
- Armazenamento designado em lixeiras localizadas em pontos de fácil acesso dos discentes, docentes e colaboradores, para facilitar a atividade para os funcionários da limpeza, responsáveis pela coleta e separação;

- Implantação do programa de geração de energia limpa (biogás/bioenergia), em cooperação com a Embaixada de Israel ou Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação do Distrito Federal;
- Promoção de atividades sócio-educativo-culturais, como, manejo, gincanas de limpeza, seminários, palestras e análogos.

A iniciativa parte do princípio colaborativo com os códigos internacionais, nacionais e distritais e envolve toda a comunidade escolar, professores, auxiliares, estudantes e a equipe de limpeza. Sua pretensão se resume a contribuir para o progresso do debate acadêmico e a propagação de boas práticas, no âmbito do gerenciamento de resíduos no ambientes escolar.

3.1.3 Educação Ambiental: Trilhas para a Sustentabilidade na Escola

A iniciativa Trilhas para a Sustentabilidade na Escola desenvolvida no CEM 02, parte do princípio de intersecção entre três conjuntos, ecológico, social e econômico, focando nos pilares viável, suportável e equitativo para se alcançar o pilar principal de sustentabilidade. Os seus princípios estão alinhados com todos os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estipulados pela ONU.

A proposta se baseia na promoção de iniciativas sustentáveis para a comunidade escolar e a sociedade, entendendo que esse é o papel que as instituições de ensino devem cumprir. O intuito dos idealizadores é executar o projeto em conjunto com o Projeto Político Pedagógico do CEM 02. Alguns dos seus objetivos são:

- Desenvolver um processo pedagógico que inclua programas que incentive uma consciência sustentável em todos os ambientes da escola;
- Plantio de verduras e legumes no próprio canteiro construído na escola, para que os alunos possam consumir nos lanches oferecidos na escola. E desse modo, evoluir para uma produção que gere renda à comunidade escolar;
- Ampliação das áreas verdes da escola, principalmente nos pomares, horta e jardim;
- Contabilização do oxigênio gerado pelas áreas verdes da escola, para sua posterior utilização em créditos de carbono;
- Inserção do CEM 02 em atividades nacionais e internacionais, voltadas para a promoção da sustentabilidade.

Tratando do processo pedagógico, foram desenvolvidas disciplinas eletivas que associa as disciplinas padrões com a temática sustentável. Cabe ressaltar que as eletivas compõem o Novo Ensino Médio, com a intenção de completar a formação dos estudantes de forma flexiva, uma vez que eles escolhem as disciplinas eletivas que querem cursar. Abaixo são relacionadas as disciplinas eletivas em execução no CEM 02 que desenvolvem a abordagem sustentável.

- Meio Ambiente e Sustentabilidade;
- Compostagem;
- Engenhando o mundo: Pesquisa e Ciência na Era Digital;
- “Let’s Go”;
- Jogos Matemáticos;
- Pensando Cinema;
- Protagonismo Juvenil;
- Cálculos Matemáticos.

3.1.4 Programa de Neutralização do Carbono

A origem do Programa de Neutralização do Carbono do CEM 02 Ceilândia é embasada pelo Programa Decarbonize, promovido pelo *CGE - The Centre for Global Education*, o qual a escola faz parte. A discussão central de todas as atividades desenvolvidas no projeto circunda as questões climáticas e os seus impactos na sociedade. Do mesmo modo, os discentes e docentes da escola estão inseridos no Programa GLOBE (*Global Learning and Observations to Benefit the Environment*) da NASA (Agência Espacial Norte Americana) que tem como objetivo a extração de dados científicos sobre o ambiente e principalmente sobre o clima.

Ao analisar os dados referentes ao clima, tanto localmente como globalmente, o projeto possui uma fundamentação direcionada para o desenvolvimento de todas as ações pertinentes à neutralização. Por se tratar de uma situação de preocupação extrema, as demandas carregam uma certa urgência para aplicação, e é com essa justificativa que o CEM 02 desenvolve seus objetivos para esta iniciativa. Dos objetivos específicos estabelecidos, temos:

- Elaboração de uma agenda climática permanente para o CEM 02, levando essas discussões para além da escola, mas para os poderes executivos;
- Atualizar e expandir o sistema de captação da água da chuva na escola;
- Elaborar estudos e buscar parceria para a implementação de biodigestor na escola;
- Desenvolver um levantamento de gastos com energia elétrica da escola nos últimos 5 anos;
- Desenvolver um levantamento de gastos com água da escola nos últimos 5 anos;
- Envolver discentes e docentes nas iniciativas Decarbonize e GLOBE;
- Iniciar estudo para construção de estação meteorológica através da impressão 3D;
- Busca de parcerias locais e internacionais;
- Aquisição de créditos de carbono.

3.2 REQUISITOS EDUCACIONAIS DO PROJETO

3.2.1 Educação e Engajamento da Comunidade

Tratando do desenvolvimento de atividades educacionais que possam envolver a comunidade em geral, inicialmente se faz necessário um diagnóstico para avaliação da comunidade escolar, de modo a entender a realidade a qual estão inseridos e assim, direcionar os conteúdos e iniciativas.

Procurando uma abordagem voltada para o sistema fotovoltaico, busca-se dinâmicas que introduzam os alunos e a comunidade nos processos desenvolvidos na execução do projeto, desde a concepção inicial, até o monitoramento contínuo da energia gerada pelos painéis solares.

São estabelecidos dois objetivos para direcionar o foco da proposta, sendo inicialmente conceber a compreensão a respeito das energias renováveis para posteriormente expandir a consciência ambiental de cada um dos envolvidos no processo.

Importante ressaltar que, a quantificação dos resultados inerentes às orientações e sugestões propostas, só podem ser de fato analisadas quando o projeto for executado, e durante o processo de execução, as atividades podem ser elaboradas e os seus responsáveis designados de acordo com o planejamento pedagógico da escola modelo.

3.3 REQUISITOS TÉCNICOS DO PROJETO

Em resumo os principais componentes que serão abordados no projeto fotovoltaico são:

- Módulos fotovoltaicos;
- Inversores solares;
- Conector solar;
- Cabos elétricos;
- Proteções;
- Eletrodutos e eletrocalhas;
- *String box*;
- Aterramento;
- Sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

Para garantir o desenvolvimento e uma execução correta do arranjo fotovoltaico, é importante seguir um conjunto de normas que estabelecem critérios técnicos. Pois proporcionam os melhores resultados e minimiza os riscos atrelados ao projeto.

As normas utilizadas como referência para o avanço de todo projeto são listadas a seguir:

- **ABNT NBR 5410:2004 (Atualizada em 2008)** - Instalações Elétricas de Baixa Tensão;
- **ABNT NBR 5419:2015** - Proteção contra descargas atmosféricas;
- **ABNT NBR 16149:2013** - Sistemas Fotovoltaicos – Características de interface de conexão com a rede elétrica de distribuição;
- **ABNT NBR 16150:2013** - Sistemas Fotovoltaicos – Características de interface de conexão com a rede elétrica de distribuição – Procedimento de ensaio e conformidade;
- **ABNT NBR 16274:2014** - Sistemas fotovoltaicos conectados à rede - Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho;
- **ABNT NBR 16612:2020** - Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura, para tensão de até 1,8 kV C.C. entre condutores - Requisitos de desempenho;
- **ABNT NBR 16690:2019** - Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto;
- **IEC 61215-1:2021** - *Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements*;
- **IEC 61727:2004** - *Photovoltaic (PV) systems - Characteristics of the utility interface*;
- **IEC 61730-1:2016** - *Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 1: Requirements for construction*;
- **IEC 61730-2:2016** - *Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 2: Requirements for testing*;
- **IEC 62116:2014** - *Utility-interconnected photovoltaic inverters - Test procedure of islanding prevention measures*;
- **IEC 62979:2017** - *Photovoltaic modules - Bypass diode - Thermal runaway test*;
- **IEC TS 62804-1-1:2020** - *Photovoltaic (PV) modules - Test methods for the detection of potential-induced degradation - Part 1-1: Crystalline silicon - Delamination*;
- **IEC TS 62916:2017** - *Photovoltaic modules - Bypass diode electrostatic discharge susceptibility testing*;
- **NR 10** - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade;
- **NR 35** - Trabalho em Altura;
- **Portaria INMETRO/MDIC nº 004, de 04 de janeiro de 2011** - Requisitos de avaliação da conformidade para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica.

3.3.1 Módulos Fotovoltaicos

No Brasil, não existem normas específicas que versem sobre a qualificação de segurança de módulos fotovoltaicos. Desse modo, são utilizadas as normas da IEC (*International Electrotechnical Commission*) que normatizam e certificam os equipamentos que compõem o sistema fotovoltaico.

As normas IEC 61730 e IEC 61215 tratam dos requisitos de construção e testes para qualificação e aprovação dos módulos fotovoltaicos. Esta última apresenta ao todo 21 testes que o módulo deve ser submetido para atestar a sua qualidade.

Há no Brasil a Portaria nº 004, de 04 de Janeiro de 2011 do INMETRO que estabelece alguns requisitos mínimos, porém esta apresenta apenas 4 testes que já são mencionados na norma IEC. Logo, para garantir o cumprimento de todos os requisitos, ambas serão consideradas.

Para aplicação neste projeto os módulos fotovoltaicos devem seguir as seguintes especificações técnicas:

- Os módulos devem dispor dos requisitos abordados pelas normas IEC 61730:2016 e IEC 61215:2021;
- Os módulos devem dispor da certificação do INMETRO;
- Os módulos devem dispor da certificação do selo PROCEL;
- Os módulos precisam apresentar características de suportabilidade à degradação induzida por potencial (PID - *Potential Induced Degradation*). Que são garantidas pelos testes abordados nas normas IEC 61215:2021, IEC 62979:2017, IEC TS 62804:2020, e IEC TS 62916:2017;
- Para se adequar as condições do local de instalação os módulos utilizados neste projeto devem ser submetidos as condições de teste padrão (STC - *Standard Test Condition*);
- Os módulos a serem instalados não devem apresentar fissuras, rachaduras, bolhas, delaminação ou descoloração;
- Os módulos não devem apresentar pontos quentes em sua extensão.
- **Precauções acerca da desembalagem e armazenamento dos módulos:**
 - é comum a indicação de que os módulos devem ser armazenados em um ambiente seco e ventilado, sem a presença de luz solar direta e umidade. Para casos que apresentem situações adversas o manual do fabricante deverá ser analisado para adequação; e
 - além das características de manuseio dos módulos o manual de instalação contém indicações relacionadas à segurança dos profissionais responsáveis pela instalação. Todos os itens pertinentes devem ser considerados e atendidos.

- **Os módulos devem atender alguns requisitos de instalação:**

- devem apresentar a conexão em paralelo para casos em que é necessário aumentar a corrente, e conexão em série caso haja a necessidade de aumentar a tensão; e
- apenas módulos fotovoltaicos com saídas elétricas semelhantes devem ser conectados na mesma string para impossibilitar ou reduzir os efeitos de incompatibilidade (*mismatch*) nos arranjos.

- **Sobre a garantia dos módulos fotovoltaicos:**

- a garantia contra defeitos de fabricação é de no mínimo 10 anos, variando para cada fabricante; e
- a sua garantia de performance é de no mínimo 25 anos com eficiência de até 80% de geração.

3.3.2 Inversores Solares

Como citado anteriormente para os módulos fotovoltaicos, o INMETRO determina alguns critérios para conformidade dos equipamentos empregados num sistema fotovoltaico.

A Portaria nº 004:2011 indica quais ensaios os inversores solares devem ser submetidos. E para esse trabalho serão considerados apenas os requisitos dos inversores *grid-tie* (para conexão à rede).

De modo geral, cada fornecedor possui um manual com especificidades do seu equipamento, sendo necessárias adaptações para cada caso. São condições normatizadas dos inversores:

- **Características gerais de operação:**

- de acordo com a ABNT NBR 16149:2013 os inversores devem estar aptos para receber sinais de comando à distância sobre limitação de potência ativa, comando de potência reativa e desconexão/reconexão do SFV da rede;
- o inversor deve contar com um sistema de monitoramento que inspecione constantemente a tensão da rede para garantir valores de tensão e frequência adequados à operação;
- os inversores devem dispor da proteção IP 65 para instalação em áreas internas ou externas;
- a temperatura ambiente deve permanecer entre 10°C e 50°C. Para temperaturas fora do intervalo, as condições de operação do inversor são reduzidas;
- para quaisquer casos de conexão do inversor com a rede, a conexão à terra deve ser obrigatória;
- os inversores devem atender as diretrizes das certificações IEC 62116:2014 e IEC 61727:2004; e

- devem atender as diretrizes dispostas pelas normas ABNT NBR 16149:2013 e ABNT NBR 16150:2013.

- **Requisitos para o lado de corrente alternada:**

- previamente a conexão à rede, deve-se verificar a tensão e a frequência da rede, para que sejam adequadas aos requisitos de saída do inversor;
- deverá ser instalado um disjuntor no lado de saída do inversor para assegurar uma desconexão segura do equipamento;
- a caixa de fiação CA deve ser munida de descarregadores de sobretenção CA; e
- para os cabos CA, a secção deve ser escolhida de modo a impedir que a perda nos cabos ultrapasse o limite de 1% da potência nominal.

- **Requisitos para o lado de corrente contínua:**

- os cabos CC a começar das strings devem ser providos de conectores CC. E para se manter o grau de proteção IP 65, os conectores utilizados deverão possuir o mesmo grau de proteção;
- a caixa de fiação CC deve ser munida de descarregadores de sobretenção CC; e
- por decisão de projeto opta-se por definir a escolha de um inversor com no mínimo 2 entradas MPPT.

3.3.3 Conector Solar

A ABNT NBR 16690:2019 aborda um conjunto de requisitos para a seleção e instalação de componentes elétricos em arranjos fotovoltaicos. No que se refere a conectores solares tem-se na norma os seguintes apontamentos:

- para conectores de encaixe, empregados em uma mesma junção no sistema fotovoltaico, devem ser do mesmo modelo e fabricante;
- ser adequados para utilização em corrente contínua;
- possuir tensão nominal semelhante ou superior à tensão máxima do sistema;
- deve-se proporcionar proteção contra o contato com partes vivas, nas condições de conectado ou desconectado;
- possuir corrente nominal semelhante ou superior à capacidade de condução de corrente para o circuito que está sendo empregado;
- devem ser aptos a abrigar o condutor utilizado no circuito que está sendo empregado;
- ser estimados para a temperatura do local de utilização;

- cumprir com a Classe II para sistemas que operam acima do limite das tensões DVC-A;
- para situações de exposição ao meio ambiente, devem ser calculados de acordo com as intempéries pertinentes, possuindo índice de proteção (IP) adequado para a sua finalidade;
- sua instalação deve visar a redução dos esforços mecânicos sobre o material;
- plugues e tomadas não devem ser utilizados nos arranjos fotovoltaicos; e
- a junção dos cabos aos conectores deve ser realizada com instrumento adequado para este objetivo.
- **Requisitos adicionais:**
 - os conectores de encaixe devem atender as especificações da EN 50521 ou IEC 62852;
 - devem ser polarizados, para casos de múltiplas conexões;
 - possuir proteção adequada para situações de acesso por pessoas não qualificadas; e
 - devem exigir força proposital para sua separação.

3.3.4 Cabos Elétricos

Na definição dos cabos elétricos, utiliza-se como parâmetro a ABNT NBR 16612:2020 que aborda os requisitos de desempenho dos cabos de potência para sistemas fotovoltaicos. Na seção 4 da norma tem-se especificado as condições mínimas para a instalação e definição dos cabos, condutores, separadores e isolação adequada a finalidade.

É importante pontuar alguns critérios, como:

- os cabos devem ser apropriados para operação em temperatura ambiente de -15°C até 90°C;
- sua temperatura em regime permanente não deve exceder 90°C;
- em regime de curto-circuito a sua temperatura não deve exceder 250°C;
- o seu condutor deve ser de cobre estanhado e têmpera mole, estando de acordo com a ABNT NBR NM 280;
- os fios dos seus componentes não podem exibir rebarbas, fissuras, escamas, aspereza, estrias ou inclusões;
- a critério do fabricante escolhido, pode ser utilizado um separador no condutor para propiciar a remoção da isolação, impossibilitando a sua aderência. Deve-se atender os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6251.

Adicionalmente tem-se a ABNT NBR 16690:2019 que aborda mais condições para os condutores e levanta a necessidade de se analisar também os requisitos especificados pela ABNT NBR 5410:2004

3.3.5 Proteções

Para o dimensionamento das proteções do sistema fotovoltaico a ABNT NBR 16690:2019 define os dispositivos de segurança necessários para assegurar o funcionamento adequado de toda a instalação. E são estes:

- **Proteção contra choque elétrico:** sendo dimensionada por risco vinculado ao contato acidental com alguma parte viva da instalação, ou ainda por falhas que possam ocorrer colocando um elemento da instalação sob tensão;
- **Proteção contra sobrecorrentes:** necessária para assegurar a proteção contra os impactos nocivos causados pelo calor intenso ou pelas cargas elétricas fortes que podem sobrecarregar os condutores;
- **Proteção contra sobretensões:** com o intuito de anular as descargas indiretas que podem recair sobre a rede elétrica afetando diretamente a instalação elétrica;
- **Proteção contra efeitos térmicos e incêndios:** a fim de que não haja risco de incêndio de materiais inflamáveis, ocasionados por altas temperaturas ou arcos elétricos;
- **Capacidade de seccionamento:** característica essencial, a instalação deve possuir um seccionamento adequado dos seus dispositivos de segurança e equipamentos para fins de manutenção, possíveis reparos e para uma identificação correta dos elementos.

Na definição do dispositivo de proteção contra choque elétricos há a indicação de seguir os requisitos especificados na ABNT NBR 5410:2004. Logo, tem-se a designação das seguintes metodologias de proteção:

- **Equipotencialização:** técnica baseada na interligação de elementos específicos para obter a equipotencialidade para os fins esperados;
- **Barramento de equipotencialização principal (BEP):** barramento que visa a interligação de todos os elementos inclusos na equipotencialização principal;
- **Barramento de equipotencialização local (BEL):** barramento que visa a interligação de todos os elementos inclusos na equipotencialização suplementar ou local;
- **Equipamento de tecnologia da informação (ETI):** equipamento que recebe dados de uma fonte externa, processa e fornece dados de saída.

Posteriormente são destacados o princípio fundamental e as regras gerais que devem ser seguidas para proteção contra choques elétricos:

- deve-se garantir a proteção de parte vivas que ofereçam perigo e que não possam ser acessadas;

- do mesmo cabe a aplicação para massas ou partes condutivas acessíveis, uma vez que estas não devem oferecer risco independente das suas condições de operação;
- para aplicação tem-se a proteção básica designada para contatos diretos com elementos de risco da instalação;
- há a proteção supletiva designada para contatos indiretos com elementos de risco da instalação;
- os conceitos adotados e destacados pela ABNT NBR 5410:2004 seguem os requisitos levantados pela IEC 61140;
- para proteções adicionais os requisitos especificados no item 5.1.3 da seção 9 da ABNT NBR 5410:2004 devem ser atendidos; e
- demais aplicações e especificidades devem ser verificadas na seção 5.1 da ABNT NBR 5410:2004.

Para o dimensionamento da proteção contra sobrecorrente no circuito, a ABNT NBR 16690:2019 define os seguintes pontos específicos:

- as proteções de sobrecorrente dos módulos fotovoltaicos devem atender os requisitos especificados pelo fabricante e os demais itens apontados pela norma;
- os equipamentos utilizados para proteção de sobrecorrente dos módulos devem ser indicados para atuar em até 2h quando uma sobrecorrente de 135% da corrente nominal for aplicada;
- **Para proteção em séries fotovoltaicas:**
 - para aplicação do lado em corrente contínua a proteção poderá ser garantida através de dispositivos fusíveis com fusíveis tipo gPV, de acordo com a IEC 60269-6, ou por meio de disjuntores, de acordo com a IEC 60947-2 ou IEC 60898-2;
 - os dispositivos indicados pela ABNT NBR NM 60898 não podem ser utilizados nesta aplicação, pois não foram projetados para operação em corrente contínua; e
 - o dimensionamento da proteção contra sobrecorrente em séries fotovoltaicas deve atender aos requisitos do item 5.3.11.1 da ABNT NBR 16690:2019.
- **Para proteção em subarranjos fotovoltaicos:**
 - em casos de mais de dois subarranjos ligados a uma única UCP a proteção contra sobrecorrentes deve ser garantida; e
 - para o dimensionamento da proteção contra sobrecorrente em subarranjos fotovoltaicos deve atender aos requisitos do item 5.3.12 da ABNT NBR 16690:2019.

- para dimensionamento da proteção para arranjos fotovoltaicos deverá ser verificada a adequação aos requisitos do item 5.3.11.3 da ABNT NBR 16690:2019; e
- para adequar a localização do dispositivo deve-se certificar os apontamentos do item 5.3.13 da ABNT NBR 16690:2019.

No geral, a ABNT NBR 16690:2019 trata da proteção contra sobretensões causadas pelas descargas atmosféricas indiretas nos arranjos fotovoltaicos. Sobre o dimensionamento e adaptação aos critérios de proteção contra descargas atmosféricas a ABNT NBR 5419:2015 deve ser seguida.

Para a proteção contra sobretensão transitória a ABNT NBR 16690:2019 determina que:

- todos os condutores CC sejam instalados de modo a agrupar os cabos positivos e negativos da mesma série fotovoltaica e ainda o cabo principal do arranjo;
- os condutores longos devem ser protegidos por um equipamento de proteção contra surtos (DPS);
- podem ainda ser instalados em conduto metálico aterrado, ou diretamente enterrados, ou com proteção mecânica que proporcione uma blindagem;
- a instalação de dispositivos de proteção contra surtos e o memorial de cálculo para análise de risco devem seguir os critérios abordados na ABNT NBR 5419:2015; e
- o DPS deve dispor de autoproteção ao fim da sua vida útil, para assegurar a sua desconexão em qualquer condição de trabalho do arranjo fotovoltaico.

Com a finalidade de proteger o arranjo fotovoltaico contra efeitos térmicos, a ABNT NBR 16690:2019 determina a aplicação dos critérios apontados pela ABNT NBR 5410:2004.

Ela indica que a instalação elétrica deve ser desenvolvida e construída de modo a suprimir quaisquer riscos de incêndio devido às altas temperaturas e aos arcos elétricos produzidos na instalação. Do mesmo modo, objetiva-se garantir a segurança de terceiros.

Para elucidação dos atributos necessários para proteção contra efeitos térmicos a seção 5.2 da ABNT NBR 5410:2004 deve ser considerada por completo.

Na definição do seccionamento e comando da instalação fotovoltaica a ABNT NBR 16690:2019 indica a aplicação dos requisitos relacionados na ABNT NBR 5410:2004. Portanto tem-se algumas premissas como os seguintes critérios:

- no que se refere a seccionamento, os condutores vivos, em todos os circuitos, devem possibilitar o seu seccionamento. Com exceção do condutor de proteção;
- um dispositivo de seccionamento pode ser em comum a um grupo de circuitos, desde que o modo de serviço permita o seccionamento comum;

- providências devem ser tomadas para inibir a energização inadvertida de qualquer equipamento;
- quando necessário, deve ser previsto medidas que assegurem a descarga de energia elétrica armazenada;
- para adoção de seccionamento para manutenção mecânica, os critérios da seção 5.6.4 da ABNT NBR 5410:2004 devem ser atendidos;
- para adoção de seccionamento de emergência e parada de emergência, os critérios da seção 5.6.5 da ABNT NBR 5410:2004 devem ser atendidos;
- no que se refere a comando funcional, todo o circuito ou parte dele que necessite ser comandado independentemente deve ser equipado com um dispositivo de comando funcional;
- estes dispositivos de comando funcional não carecem seccionar todos os condutores vivos do circuito em questão; e
- para todo equipamento utilizado deve ser designado um dispositivo de comando funcional, havendo a possibilidade de funcionarem simultaneamente com um único dispositivo de comando.

3.3.6 Eletrodutos e Eletrocalhas

Para um sistema fotovoltaico os eletrodutos e eletrocalhas servem para o encaminhamento seguro dos condutores do circuito. A sua utilização é definida após o dimensionamento dos cabos.

De acordo com a ABNT NBR 16690:2019, assim como os demais elementos do arranjo fotovoltaico, os eletrodutos ou eletrocalhas devem utilizar materiais que suportem a exposição à radiação UV e sejam adequados para o tempo de vida útil de todo o sistema.

As prescrições para dimensionamento e instalação dos eletrodutos estão elencadas na ABNT NBR 5410:2004, e os principais pontos são descritos abaixo:

- as medidas internas do eletroduto devem possibilitar a instalação e recolhimento dos condutores, sem que hajam dificuldades;
- a taxa de ocupação do eletroduto, dada pelo quociente entre a soma das áreas das seções transversais dos condutores previstos, calculadas com base no diâmetro externo, e a área útil da seção transversal do eletroduto, não deve ser superior a:
 - 53% no caso de um condutor;
 - 31% no caso de dois condutores;
 - 40% no caso de três ou mais condutores;

- os trechos contínuos de tubulação, sem interposição de caixas ou equipamentos, não devem exceder 15 m de comprimento para linhas internas às edificações e 30 m para as linhas em áreas externas às edificações, se os trechos forem retilíneos. Se os trechos incluírem curvas, o limite de 15 m e o de 30 m devem ser reduzidos em 3 m para cada curva de 90°.

Os demais requisitos técnicos pertinentes podem ser avaliados na seção 6.2.11 da ABNT NBR 5410:2004.

3.3.7 String Box

A String box é um elemento muito importante para a proteção do arranjo fotovoltaico. Trata-se de uma caixa de junção que liga o inversor solar ao quadro de proteção, protegendo tanto o sistema quanto os módulos fotovoltaicos.

É uma caixa com a finalidade de acomodar os dispositivos de proteção e as suas conexões dimensionadas para a instalação. São eles:

- dispositivo de proteção contra sobrecorrente;
- dispositivo de proteção contra sobretensões;
- dispositivo de seccionamento;
- cabos CC.

Para este componente a IEC 60529 indica as classificações de graus de proteção (IP) adequados aos invólucros, promovendo a regularidade com os métodos internacionais aplicados para a proteção dos elementos do sistema fotovoltaico.

3.3.8 Aterramento das Instalações

A ABNT NBR 16690:2019 apresenta quatro opções para aterramento ou equipotencialização dos arranjos fotovoltaicos:

- aterramento funcional de peças metálicas não energizadas (por exemplo, para permitir uma melhor detecção de correntes de fuga para a terra);
- aterramento para proteção contra descargas atmosféricas;
- barramento de equipotencialização, para evitar diferentes potenciais elétricos em uma instalação;
- aterramento funcional de um polo do arranjo fotovoltaico, chamado aterramento funcional do arranjo fotovoltaico;

Para fins de dimensionamento do aterramento, os requisitos abordados na ABNT NBR 5410:2004 deverão ser utilizados como referência para definição dos eletrodos e condutores de aterramento.

E assim como citado nos requisitos técnicos dos elementos anteriores, cada peça metálica do conjunto fotovoltaico deve ser protegida e isolada de modo a conectar à malha de aterramento presente na edificação. E para quaisquer procedimento envolvendo o aterramento, as diretrizes da ABNT NBR 5410:2004 e da ABNT NBR 5419:2015 devem ser consideradas.

3.3.9 Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)

Um componente essencial para garantir a segurança e a operação do sistema fotovoltaico é o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), uma vez que os arranjos são posicionados em locais sensíveis da instalação e deve-se garantir o seu melhor desempenho.

Para definição dos critérios aceitáveis acerca do sistema de proteção contra raios é utilizada a ABNT NBR 5419:2015, que trata especificamente da aplicação e dimensionamento do conjunto de proteção.

Importante considerar que o não cumprimento dos requisitos especificados na norma inferem numa ampla exposição a riscos, que podem levar a interrupção da operação do sistema fotovoltaico e até mesmo uma consequente perda de geração.

3.4 ETAPAS INICIAIS DO PROJETO

3.4.1 Levantamento de Informações

Tratando do início do desenvolvimento do projeto, o levantamento de informações pertinentes sobre o local de instalação, determina as decisões de projeto que serão tomadas.

Para a concepção do sistema foram coletados e avaliados *in loco* os seguintes dados do Centro de Ensino Médio 02 - Ceilândia:

- dados de consumo de energia dos últimos 5 anos;
- análise das últimas 3 faturas de energia;
- padrão de entrada de energia;
- possíveis locais de instalação dos módulos fotovoltaicos para as duas situações de projeto;
- sala disponível para alocação do inversor e demais equipamentos da instalação fotovoltaica;

3.4.2 Consumo Energético CEM02

Para que o sistema fotovoltaico atenda a demanda de consumo para os dois casos abordados neste estudo é necessário a definição correta do consumo de energia elétrica do consumidor.

Desse modo, torna-se possível determinar a capacidade e a quantidade ideal de módulos fotovoltaicos exigidos para suprir a demanda energética de cada simulação.

O CEM 02 possui um documento que relaciona o histórico dos gastos com energia elétrica da escola para um período compreendido entre os anos de 2018 a 2022. Tem-se como dados o consumo em kWh e o valor da fatura, para cada mês dos anos considerados.

Após a definição do consumo médio por mês define-se o consumo diário. Com o intuito de empregar métodos de cálculo mais rigorosos, definiu-se uma média para os dias do mês, uma vez que no calendário há meses com 28, 30 e 31 dias.

$$\text{Média (dias)} = \frac{365 \text{ (dias)}}{12 \text{ (meses)}} = 30,42 \text{ (dias/mês)} \quad (3.1)$$

Por fim, é possível estimar o consumo médio diário para cada caso. As decisões de projeto pertinentes serão abordadas na seção ??.

3.4.3 Avaliação do Recurso Solar

Para determinação da quantidade de painéis empregados para suprir a demanda energética do consumidor é necessário ter o conhecimento sobre a irradiação solar do local em que será instalado o sistema fotovoltaico. Esse dado é utilizado como referência para medir a eficiência dos painéis, uma vez que esta depende diretamente da intensidade da irradiação solar.

Para ter o conhecimento sobre o potencial solar de qualquer cidade brasileira convém utilizar o site do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S.Brito (CRESESB), que fornece essas informações de forma gratuita e detalhada.

Figura 3.2: Interface do site do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB)



Fonte: Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB). Acessado em: 17 de Outubro de 2023.

Para a aquisição dos dados buscou-se no painel a opção "potencial energético" e em seguida a opção "potencial solar", para serem inseridas as coordenadas geográficas do local. As coordenadas por sua vez, são facilmente encontradas através de qualquer ferramenta de GPS, como por exemplo o *Google Maps*.

Após o preenchimento de todas as informações pertinentes, o CRESESB fornece alguns dados de irradiação da localidade por mês. Para o desenvolvimento do projeto utiliza-se os parâmetros de cálculo no plano inclinado, mais especificamente o dador de maior média anual.

Outro dado que requer atenção nessa análise é o indicativo da inclinação para o norte. Ele recomenda a orientação que os painéis fotovoltaicos devem ter nesse exato local de instalação, para fim de obter a máxima incidência de luz solar. Durante a instalação, obedecer a essa inclinação é necessário para que os raios solares incidam mais perpendicularmente na superfície dos painéis, pois quanto mais perpendicular for a incidência, maior será o rendimento dos painéis.

3.5 MATERIAIS UTILIZADOS

Esta seção discute os materiais aplicados para desenvolver as simulações de projeto que são o foco deste trabalho.

Foram utilizados softwares que envolvem uma modelagem 3D da edificação em que serão instalados os painéis para uma visualização completa e real do arranjo fotovoltaico final. O que agrega significativamente o resultado final proporcionando um projeto mais seguro.

O programas aplicados, que serão detalhados a seguir, apresentam alguns recursos que servem

de referência para o dimensionamento do sistema, para tomadas de decisões de projeto e até mesmo para a elaboração de estimativas de projeto de modo mais rápido, prático e de qualidade.

Os seguintes pontos serão contemplados nas ferramentas:

- Modelagem 3D das instalações;
- Definição do local das instalações;
- Estudo de sombreamento;
- Detalhamento dos equipamentos do sistema para aprovação da Neoenergia;
- Análise financeira do sistema.

3.5.1 PVsyst

O *PVsyst* é um software de simulação amplamente utilizado para dimensionar e desenvolver análises acerca de um sistema fotovoltaico. Com os seus recursos é possível calcular as perdas por sombreamento e sujeira nos módulos, além de medir a produção de energia do arranjo fotovoltaico definido para o projeto.

Para o desenvolvimento da simulação serão utilizados os dados meteorológicos da base de dados do próprio software, sendo inseridos apenas os componentes dos fornecedores escolhidos para a simulação de ambos os casos. Além dos efeitos causados por sombreamento, serão considerados os efeitos de temperatura para a análise final dos resultados da simulação.

Por fim, espera-se obter a modelagem 3D do sistema para o caso 1 e para o caso 2, com os dados finais de cada relatório possibilitando sua posterior execução.

3.5.2 SketchUp

O *SketchUp* trata-se de um software simplificado e intuitivo para concepção e desenvolvimento de projetos 3D. O seu principal objetivo é criar uma visualização do projeto similar com a realidade.

Para um projeto fotovoltaico é possível utilizar o seu recurso "Sombras", utilizado para projetar sombras reais ou analisar os efeitos do sol no sombreamento do projeto.

Com a finalidade de fazer uma simulação próxima a realidade da edificação, para este projeto serão simuladas sombras reais com base na latitude, longitude, e orientação da unidade em questão.

3.5.3 AutoCAD

Para a elaboração de projetos em 2D o AutoCAD é um software muito utilizado. Tratando de instalações elétricas ele é largamente utilizado para detalhamento dos projetos.

O software será utilizado para desenvolver o diagrama unifilar da instalação, contemplando as especificações requeridas pela concessionária para aprovação do projeto fotovoltaico.

3.5.4 Excel

No que se trata da elaboração da análise financeira de um projeto fotovoltaico, o Excel é acionado como uma ferramenta dinâmica que possibilita os cálculos matemáticos de forma automática. Além de ser utilizado neste projeto como um instrumento de visualização das análises que serão abordadas na próxima seção, por meio dos gráficos e projeções produzidos pelo mesmo.

3.6 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

3.6.1 Performance Ratio

Para o dimensionamento adequado de um sistema fotovoltaico é necessário calcular a Performance Ratio (PR) do sistema, para definição exata da energia gerada, considerando a avaliação da sua eficiência. Alguns fatores inerentes à energia solar precisam ser considerados para que se otimize o rendimento esperado para o consumo calculado. As condições que precisam ser contabilizadas são:

- **Condições de Teste padrão:** Embora possua condições aproximadas para os sistemas fotovoltaicos implementados no Brasil, o método STC apresenta algumas diferenciações se considerarmos a situação real da região, o que pode influenciar os resultados;
- **Temperatura:** Entender as condições reais do local de instalação do arranjo é fundamental para determinar a sua eficiência, uma vez que ao ser condicionado a altas temperaturas o módulo fotovoltaico diminui o seu rendimento;
- **Poeira e Sujeira:** Por se tratar de um sistema exposto ao tempo, a probabilidade de sujeira nos módulos é considerável ao ponto de influenciar as perdas no sistema. E é devido a esse fator que são necessárias limpezas periódicas que estão inclusas no custo de operação e manutenção (OM);
- **Cabeamento:** Assim como todo projeto elétrico, é de conhecimento geral a perda de eficiência dos cabos durante a condução de energia. Logo, é necessário se atentar a distância dos módulos às strings para reduzir as perdas envolvidas;
- **Inclinação do telhado:** A respeito da inclinação, é indicada que esta esteja voltada para

o norte, visto que é a direção em que o sol nasce. Porém, não são todos os casos que essa recomendação pode ser atendida, o que resulta num mau aproveitamento da incidência solar. Para esses casos é necessário realizar o estudo de sombreamento para otimizar o máximo o rendimento do sistema.

Para os cálculos finais desenvolvidos no Capítulo 4, adotou-se um PR de 80%, valor tipicamente utilizado para considerar as perdas envolvidas no sistema.

3.6.2 Potência do Sistema

Para o devido dimensionamento do gerador fotovoltaico utiliza-se o dado levantado acerca do consumo médio diário anual da edificação, conforme descrito na seção 3.4.2. Sendo necessário descontar a taxa mínima referente ao custo de disponibilidade da instalação do local (CRESESB 2014).

A potência do microgerador pode ser definida pela equação apresentada em (CRESESB 2014):

$$P_{FV}(Wp) = \frac{(E/TD)}{HSP_{MA}} \quad (3.2)$$

Em que,

- P_{FV} (Wp): potência de pico do painel FV;
- E (Wh/dia): consumo diário médio anual do consumidor;
- HSP_{MA} (h): média diária anual das horas de sol pleno incidentes no plano do módulo fotovoltaico; e
- TD (adimensional): taxa de desempenho ou performance ratio (PR).

Para definição da HSP_{MA} utiliza-se os dados de irradiação solar diária média mensal ($kWh/m^2 \cdot dia$) fornecida

3.6.3 Escolha e Distribuição dos Módulos Fotovoltaicos

Seguindo o cálculo da potência do sistema, para definir a quantidade de painéis que o sistema vai demandar é necessário considerar a especificação de potência dos módulos fotovoltaicos. Pois, cada módulo possui sua especificação e potência, que define a sua produção de energia.

Atualmente no mercado há uma vasta lista de painéis que apresentam potências diferentes. Dependendo de qual painel for escolhido haverá uma variação na sua quantidade. O que define essa escolha é a área disponível para instalação.

Para casos em que há pouca área disponível é interessante optar por painéis mais potentes, reduzindo a quantidade de painéis. Para situações em que esse não ocorre esse empecilho é comum optar por uma quantidade maior de painéis que apresentam uma baixa potência.

Após determinar a potência do módulo, é essencial consultar os dados técnicos fornecidos pelos fabricantes para confirmar sua adequação ao projeto. Os dados elétricos do módulo fotovoltaico que devem ser observados são:

- **Potência nominal (Nominal Power Watt Pmax):** é a energia máxima que o módulo fotovoltaico produz sob as condições de teste STC (Irradiação solar de 1000 W/m^2 , massa de ar 1,5, temperatura da célula de 25° e velocidade do vento de 1 m/s);
- **Tensão do ponto de máxima potência (Vmp):** tensão máxima em que é extraída a potência máxima do módulo;
- **Corrente no ponto de máxima potência (I_{mp}):** corrente que corresponde ao ponto de tensão máxima do módulo;
- **Tensão de circuito aberto (Voc):** tensão máxima que o módulo pode fornecer;
- **Corrente de curto-circuito (Isc):** corrente máxima que o módulo pode fornecer.

Atualmente, os datasheets das placas solares apresentam valores obtidos em dois tipos de teste: o STC (Standard Test Condition) e o NMOT (Nominal Module Operating Temperatures), ambos com condições diferentes.

O teste STC inclui condições de teste que correspondem melhor à incidência solar no Brasil e às temperaturas máximas das regiões do país. Embora o Brasil tenha particularidades climáticas em algumas regiões, é comum utilizar os parâmetros influenciados pela temperatura fornecidos nos datasheets para uma possível adaptação dos cálculos. São eles:

- **NMOT:** caracteriza a temperatura da célula quando submetida ao teste NMOT (Irradiação solar de 800 W/m^2 , massa de ar 1,5, temperatura da célula de 20°C e velocidade do vento de 1 m/s);
- **Coefficiente de P_{max} :** coeficiente de variação percentual ($\%/^\circ\text{C}$) da energia máxima do módulo;
- **Coefficiente de V_{oc} :** coeficiente de variação percentual ($\%/^\circ\text{C}$) da tensão máxima do módulo;
- **Coefficiente de I_{sc} :** coeficiente de variação percentual ($\%/^\circ\text{C}$) da corrente máxima do módulo.

3.6.3.1 Correção dos Dados Técnicos do Módulo

Para a definição de módulos por string no inversor fotovoltaico inicia-se com a correção dos parâmetros de corrente do módulo.

Para a corrente I_{sc} :

$$I_{sc,m\acute{a}x} = I_{sc} \cdot \left(1 + \left((T_{m\acute{a}x} - 25) \cdot \left(\frac{I_{sc}(\%/C)}{100} \right) \right) \right) \quad (3.3)$$

Em que $T_{m\acute{a}x}$ representa a temperatura máxima registrada no local em que será instalada a célula, e $I_{sc}(\%/C)$ o coeficiente de temperatura para I_{sc} .

Do mesmo modo pode-se corrigir a I_{mp} .

Para a corrente I_{mp} :

$$I_{mp,m\acute{a}x} = I_{mp} \cdot \left(1 + \left((T_{m\acute{a}x} - 25) \cdot \left(\frac{I_{sc}(\%/C)}{100} \right) \right) \right) \quad (3.4)$$

Em seguida, corrige-se as tensões do módulo.

Para a tensão V_{oc} :

$$V_{oc,m\acute{a}x} = V_{oc} \cdot \left(1 + \left((T_{m\acute{a}x} - 25) \cdot \left(\frac{V_{oc}(\%/C)}{100} \right) \right) \right) \quad (3.5)$$

Em que $T_{m\acute{a}x}$ representa a temperatura máxima registrada no local em que será instalada a célula, e $V_{oc}(\%/C)$ o coeficiente de temperatura para V_{oc} .

Por fim, é realizada a correao da tensão no ponto de máxima potência (V_{mp}). Neste caso não é usado um coeficiente de temperatura específico, utiliza-se o princípio básico da Lei de Ohm. Para uma corrente constante a variaao de potência é proporcional a variaao de tensão.

Desse modo, utiliza-se o coeficiente de potência de máximo pico:

$$V_{mp,m\acute{a}x} = V_{mp} \cdot \left(1 + \left((T_{m\acute{a}x} - 25) \cdot \left(\frac{V_{oc}(\%/C)}{100} \right) \right) \right) \quad (3.6)$$

Após as correoes é possível dimensionar a quantidade de elementos por string considerando as características do inversor escolhido.

3.6.4 Estrutura de Fixaao dos Módulos Fotovoltaicos

As estruturas de fixaao dos módulos fotovoltaicos são essenciais para garantir o posicionamento e a segurança dos equipamentos do sistema. É requerido atender as especificaoes no manual do fabricante para garantir um bom desempenho dos suportes.

É importante ressaltar que a designaao do tipo de estrutura tem influência direta do local de instalaao. Para montagens em telhado é comum utilizar ganchos, não havendo necessidade de furar o telhado. Há casos de montagem em laje, coberturas metálicas, estacionamento, solo e demais.

3.6.5 Escolha dos Inversores Solar

O inversor é um dos equipamentos essenciais para arranjo fotovoltaico. Ele é o responsável por converter a energia gerada em corrente contínua (CC) pelo painéis em corrente alternada (CA) que pode ser utilizada efetivamente pelos demais equipamentos.

Tratando mais especificamente, os módulos fotovoltaicos geram apenas corrente contínua, porém a maioria dos equipamentos, assim como a rede das concessionárias, opera em corrente alternada. Portanto, é imprescindível que o sistema tenha o inversor para cumprir esse papel.

Existem vários modelos de inversor solar, logo é necessário verificar algumas informações para definir o equipamento mais adequado para a instalação, tais como:

- **Característica da Rede:** é importante considerar se a rede é monofásica, bifásica ou trifásica. Pois é necessário escolher um modelo de inversor compatível com o tipo de rede, uma vez que não é possível conectar um inversor trifásico em redes monofásicas ou bifásicas;
- **Tensão de Fornecimento da Concessionária:** em diferentes regiões do Brasil existem diversas tensões de fornecimento. Desse modo, é necessário validar a tensão de fornecimento do local da instalação para assegurar que a faixa de tensão de saída do inversor seja compatível com a rede elétrica;
- **Quantidade de MPPT:** o MPPT (Maximum Power Point Tracking) é um sistema do inversor capaz de rastrear o ponto de maior potência do arranjo fotovoltaico ao qual ele está conectado. A quantidade de MPPT está associada às possibilidades de orientação do sistema. Desse modo, o equipamento consegue ter um maior aproveitamento da geração solar incidente nos módulos fotovoltaicos;
- **Sinal de Comunicação:** há dois sistemas de comunicação possível, Wi-Fi ou GPRS. Identificar o sistema do local de instalação é importante para implementar o monitoramento do arranjo fotovoltaico. Nesse caso, o inversor precisa ser compatível com a comunicação disponível;
- **Durabilidade e Eficiência:** assim como na definição dos painéis solares, a qualidade e a eficiência do inversor solar são fundamentais para garantir um retorno eficaz do investimento. É indispensável que o equipamento possua o grau de proteção adequado e as características específicas para o local de acomodação.

3.6.6 Dimensionamento do Arranjo

Para o dimensionamento do arranjo é necessário considerar alguns parâmetros importantes no datasheet do inversor escolhido, são eles:

- **Potência Máxima de Entrada:** a potência máxima dos módulos que o inversor suporta é

um valor muito importante que deve ser considerado no arranjo das strings. Se esse valor for extrapolado, a garantia do equipamento pode ser perdida;

- **Tensão Máxima de Entrada:** tensão máxima que pode ser induzida nos terminais do inversor. Através dela é possível calcular quantos módulos podem ser posicionados em série;
- **Tensão de Inicialização:** tensão mínima para que o inversor esteja em pleno funcionamento;
- **Corrente Máxima de Entrada:** corrente máxima de operação do inversor, é ideal respeitá-la para garantir uma boa eficiência do inversor;
- **Corrente Máxima de Curto-Circuito:** corrente que o inversor suporta. Em alguns modelos, quando se ultrapassa essa corrente o equipamento acusa falha e interrompe o funcionamento para sua proteção.

Para analisar a quantidade de módulos que o inversor suporta deve-se utilizar o seguinte cálculo:

$$Quantidade\ máx. = \frac{P_{máx} (inversor)}{P_{máx} (módulo)} \quad (3.7)$$

Para definir a quantidade de módulos em série:

$$Quantidade\ série = \frac{V_{máx} (inversor)}{V_{oc\ máx} (inversor)} \quad (3.8)$$

Por fim, define-se a quantidade mínima de módulos para o funcionamento do inversor:

$$Quantidade\ mín. = \frac{V_{mín} (inversor)}{V_{mp\ mín} (módulo)} \quad (3.9)$$

Para a definição do número máximo de módulos em série utiliza-se a seguinte relação descrita no (CRESESB 2014):

$$N_{mo,\ série} < \frac{V_{oc\ máx,inv}}{V_{oc,mód}} \quad (3.10)$$

Sendo:

- $N_{mo,\ série}$: número de módulos em série;
- $V_{oc\ máx,inv}$: tensão máxima de circuito aberto do inversor; e
- $V_{oc,mód}$: tensão em circuito aberto V_{oc} do módulo fotovoltaico na menor temperatura de operação considerada.

Por fim, para dimensionar a quantidade de módulos em paralelos deve-se considerar a corrente máxima de curto-circuito na entrada de cada MPPT. Desse modo, a relação descrita no (CRESESB 2014) deverá ser atendida:

$$N_{\text{mo, paralelo}} < \frac{I_{\text{máx,inv}}}{I_{\text{sc,mód}}} \quad (3.11)$$

- $N_{\text{mo, paralelo}}$: número de módulos em paralelo;
- $I_{\text{máx,inv}}$: corrente máxima por MPPT; e
- $I_{\text{sc,mód}}$: corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico sob condições do STC.

3.6.7 Projeto Elétrico

Para a submissão do projeto à concessionária faz-se necessário que todos os pontos anteriores estejam definidos. Adicionalmente ao projeto elétrico e ao memorial descritivo, deve ser enviado um diagrama unifilar que contemple não somente a geração, mas também as proteções utilizadas no arranjo. Os cabearios e proteções são relacionados na documentação e precisam ser dimensionados.

Os dimensionamentos que se seguem compõem o projeto elétrico de um sistema fotovoltaico e devem ser incluídos no esboço do arranjo desenvolvido no software AutoCAD. O conjunto dos resultados são posteriormente submetidos à concessionária de energia para obter a aprovação de execução.

3.6.7.1 Dimensionamento de Condutores

Para o cálculo adequado da bitola dos condutores em um arranjo fotovoltaico é necessário ter a definição do inversor fotovoltaico. Uma vez que o dimensionamento deve ser baseado na corrente que circulará no cabeamento de ligação dos módulos.

Pela ABNT NBR 16690:2019 dispõe-se o indicativo para realizar esse estudo dos condutores de acordo com as orientações específicas das normas ABNT NBR 5410:2004 e ABNT NBR 16612:2020.

Desse modo, os condutores são dimensionados para minimizar as chances de danos por superaquecimento, sendo consideradas algumas grandezas, tais como:

- **Corrente de Projeto (I_b):** para o dimensionamento ideal dos condutores do projeto fotovoltaico, deve-se atender a corrente de projeto do circuito, ou seja a corrente consumida pelo circuito deverá ser igual à corrente mínima do condutor escolhido;
- **Corrente Nominal (I_n):** trata-se da corrente utilizada para projetar um cabo ou uma proteção, garantindo a sua operação sem riscos;

- **Capacidade de Condução de Corrente (I_z):** é a capacidade de condução de um cabo sem que ele ultrapasse os limites de aquecimento indicados na Tabela 35 da NBR 5410:2004;
- **Corrente de Curto-Circuito (I_{cc}):** é uma corrente repentina que surge quando há um curto-circuito na instalação;
- **Corrente de Sobrecarga:** corrente de um circuito em operação ininterrupta acima da sua capacidade nominal ou da sua capacidade de condução de corrente.

Pela ABNT NBR 5410:2004 quanto ao dimensionamento de cabos tem-se a definição de três métodos que serão descritos na subseções seguintes, o método da seção mínima, o método da capacidade de condução de corrente e o método da queda de tensão. Sendo a seção escolhida para os condutores a máxima obtida entre as seções.

A seção dos condutores devem atender todas as características de segurança citadas anteriormente, acrescentando-se os seguintes critérios:

- a) $I_z \geq I_b$;
- b) os limites de queda de tensão que serão discretizados na seção referente ao método;
- c) as seções mínimas que serão indicadas na próxima seção.

1. **Método da Seção Mínima:** Para o método da seção mínima dos condutores têm-se a Tabela 47 da ABNT NBR 5410:2004, que determina o limite mínimo da seção dos condutores para cada utilização do circuito.

Simultaneamente são utilizadas as Tabelas 48 e 58 da mesma norma, que indicam a seção adequada para os condutores neutro e de proteção, respectivamente.

2. **Método da Capacidade de Condução de Corrente:** A capacidade de condução de corrente de um condutor trata-se da corrente máxima que o condutor suporta na sua operação, mantendo seus parâmetros ideais. Nesse caso a corrente que circula pelo condutor deve ser igual ou inferior a sua capacidade de condução de corrente, garantindo a sua durabilidade e a segurança da instalação.

Para o dimensionamento dos cabos do arranjo fotovoltaico que operam em corrente alternada deve-se seguir os indicativos da ABNT NBR 16690:2019, que para exemplificar o dimensionamento da corrente de projeto aborda cinco casos de proteção, sendo eles:

- Série fotovoltaica sem proteção contra sobrecorrente;
- Série fotovoltaica com proteção contra sobrecorrente;
- Subarranjo fotovoltaico sem proteção contra sobrecorrente;
- Subarranjo fotovoltaico com proteção contra sobrecorrente;
- Arranjo fotovoltaico sem proteção contra sobrecorrente;

- Arranjo fotovoltaico com proteção contra sobrecorrente.

Desse modo, é utilizado a Tabela 5 da ABNT NBR 16690:2019 que trata da capacidade mínima de corrente dos circuitos, e que exemplifica a corrente de projeto a ser considerada para cada caso de proteção dos circuitos pertinentes. Em conjunto utiliza-se as tabelas de capacidade de condução de corrente da ABNT NBR 5410:2004, para definição da seção mínima nesse método.

O próximo passo é calcular a corrente de projeto corrigida (I'_b) definida por:

$$I'_b = \frac{I_p}{K_1 * K_2 * K_3} \quad (3.12)$$

Sendo:

- K_1 : Fator de correção para temperatura, obtido na Tabela 40 da ABNT NBR 5410:2004;
- K_2 : Fator de correção para resistividade do solo, obtido na Tabela 41 da ABNT NBR 5410:2004;
- K_3 : Fator de correção para agrupamento de circuitos, obtido nas Tabelas 42 a 45 da ABNT NBR 5410:2004;

Em seguida, determina-se o método de referência de instalação que seja mais adequado para o circuito que está sendo dimensionado. Na Tabela 33 da ABNT NBR 5410:2004 é possível analisar os diferentes padrões de instalações.

Por fim, com o valor calculado para I'_b e a definição do método de referência é possível indicar a seção mais adequada do condutor por meio das tabelas 36 a 39 da ABNT NBR 5410:2004.

E para os condutores que operam em corrente contínua tem-se o mesmo passo a passo, define-se a corrente de projeto pelo indicativo de proteção da Tabela 5 da ABNT NBR 16690:2019, o método de referência de instalação pela NBR 5410:2004 e a temperatura de operação. E para a definição da seção mínima utiliza-se as tabelas de capacidade de condução de corrente do Anexo C da ABNT NBR 16612:2020.

Adicionalmente, a ABNT NBR 16690:2019 afirma que para o método de capacidade de condução de corrente os condutores de sistemas fotovoltaicos devem atender também às especificações da ABNT NBR 16612:2020 para os condutores de corrente contínua, que são expostos à radiação UV e a temperaturas elevadas.

Portanto, é necessário avaliar inicialmente o local de instalação do trecho do condutor para adequar aos critérios mínimos de capacidade de condução de corrente. Para realizar o cálculo por meio da ABNT NBR 16612:2020 há algumas divergências que serão apresentadas a seguir.

Pelo anexo C a ABNT NBR 16612:2020 define alguns métodos de instalação:

C.1 Cabo Instalado ao ar livre

- **Modo de Instalação 1:** dois cabos unipolares encostados um ao outro, na horizontal;
- **Modo de Instalação 2:** dois cabos unipolares encostados um ao outro, na vertical;
- **Modo de Instalação 3:** dois cabos unipolares espaçados em, pelo menos 0,75 x diâmetro externo, na horizontal;
- **Modo de Instalação 4:** dois cabos unipolares espaçados em, pelo menos um diâmetro externo, na vertical.

Os cabos que estiverem sob as condições citadas anteriormente devem seguir a capacidade de condução de corrente das Tabelas C.1 e C.2 do anexo C da ABNT NBR 16612:2020.

Para o fator de agrupamento em casos de agrupamentos de circuitos, há a indicação de seguir os dados informados na ABNT NBR 5410:2004. E para maiores temperaturas ou diferentes métodos de instalação devem ser utilizadas as demais tabelas que constam no anexo C da ABNT NBR 16612:2020.

Após a adequação para cada situação, o cálculo de correção para capacidade de condução de corrente se mantém para ambos os casos e é obtido de forma similar à corrente de projeto corrigida, aplicando os fatores de correção K_1 , K_2 , K_3 . Como pode ser vista na fórmula:

$$I'_z = I_z * K_1 * K_2 * K_3 \quad (3.13)$$

Em que:

- I_z : Capacidade condução de corrente do condutor obtido nas Tabelas 36 a 39 da ABNT NBR 5410:2004.

3. **Método da Queda de Tensão:** O critério da queda de tensão é utilizado para adequar a resistência elétrica de um cabo ao seu comprimento. Desse modo, define-se a seção mínima necessária para que a queda de tensão ao longo do percurso do circuito esteja dentro dos limites máximos definidos na ABNT NBR 5410:2004.

De acordo com a ABNT NBR 16690:2019 o limite admitido para queda de tensão num arranjo fotovoltaico não deve ultrapassar a 3% da tensão do arranjo em seu ponto de máxima potência. No mais, calcula-se a seção mínima que o condutor deve ter para suportar a queda de tensão percentual através da expressão abaixo, indicada pelo (Cobrecom 2020):

$$S = \frac{L \cdot I_b}{\sigma \cdot e} \quad (3.14)$$

Em que:

- S: seção nominal do condutor (mm²);
- L: é o comprimento do condutor (positivo + negativo) (m) que está sendo dimensionado para o pior caso;
- I_b : corrente de projeto (A) do circuito em questão;

- σ : condutividade do material do cabo a 90°C (condição mais desvantajosa a ser considerada);
- e : queda de tensão máxima (V) para o trecho analisado.

3.6.7.2 Dispositivos de Proteção

Como citado anteriormente, no desenvolvimento de um projeto fotovoltaico é necessário dimensionar para a instalação dispositivos de segurança que garantam a funcionalidade e durabilidade do arranjo fotovoltaico.

Para a proteção contra sobrecorrente nas séries fotovoltaicas a ABNT NBR 16690:2019 define alguns requisitos de dimensionamento, aplicados quando há a necessidade de proteção, são eles:

a) A série deve estar segura por um dispositivo de proteção contra sobrecorrente, com sua corrente nominal (I_n) atendendo as seguintes condições conjuntamente:

$$1,5 \cdot I_{sc,mód} < I_n < 2,4 \cdot I_{sc,mód}$$

$$I_n \leq I_{mód\ máx,OCPR}$$

ou

b) As séries fotovoltaicas podem ser agrupadas em paralelo, de modo que sejam resguardadas por apenas uma única proteção contra sobrecorrente, desde que sejam atendidas as condições abaixo:

$$I_n > 1,5 \times S_G \times I_{sc,mód}$$

$$I_n < I_{mód\ máx,OCPR} - [(S_G - 1) \times I_{sc,mód}]$$

Em que:

- $I_{sc,mód}$: é a corrente de curto-circuito do arranjo fotovoltaico;
- $I_{mód\ máx,OCPR}$: corrente máxima reversa do arranjo fotovoltaico;
- S_G : número de série fotovoltaicas agrupadas com a proteção assegurada por um único mecanismo de proteção contra sobrecorrentes.

As demais proteções envolvidas na composição fotovoltaica devem atender aos requisitos citados na seção anterior que trata sobre os requisitos técnicos do projeto.

3.7 REQUISITOS ECONÔMICOS DO PROJETO

Um dos principais empecilhos para a concepção final de um projeto fotovoltaico é o custo econômico envolvido na sua execução. Apesar de existir diversos facilitadores na atualidade, não são todos que podem usufruir desse recurso.

Tratando especificamente do cliente foco desse trabalho a viabilização econômica de ambos os projetos torna-se um fator limitante para a execução do sistema solar. Desse modo, o intuito desta seção é apresentar a análise de viabilidade econômica para os dois casos levantados, a fim de verificar a atratividade do investimento para sua posterior implementação.

Serão considerados todos os aspectos que podem influenciar na economia gerada pelo sistema fotovoltaicos, desde o clima na região que foi verificado durante o dimensionamento, até as políticas governamentais de incentivo.

De todo modo, o intuito desse trabalho é mostrar o quão vantajoso é reduzir os custos com energia elétrica por meio de um projeto fotovoltaico, além de ser uma iniciativa que contribui significativamente para a transição energética do país, promovendo inúmeros benefícios ao meio ambiente.

3.7.1 Investimento Inicial

O custo inicial para implantação do sistema fotovoltaico é diretamente influenciado pelas individualidades do imóvel em questão. Para exemplificar, se temos um consumo energético elevado na propriedade, maior será a potência do sistema, o que encarece os custos com a implementação do projeto.

Além de considerar as características da propriedade, é necessário verificar o local de instalação do arranjo fotovoltaico e o tipo de sistema que será instalado. Ao definir o sistema entre On-Grid e Off-Grid há um aumento ou redução de custos de projeto.

É indicado ter conhecimento sobre a oscilação de preços no mercado de fornecimento de equipamentos de energia solar para que os custos da implantação do sistema seja de acordo com o esperado. É possível separar os custos totais da geração fotovoltaica com relação aos seguintes itens:

- Kit Fotovoltaico: painéis solares, inversor solar, string box, cabeamentos e proteções;
- Instalação dos equipamentos: incluindo os custos com a estrutura de fixação dos módulos;
- Manutenção do sistema.

Obedecendo as necessidades de um projeto fotovoltaico, o investimento inicial para este estudo foi levantado analisando dois cenários, o primeiro mediante os orçamentos solicitados às empresas que atuam no ramo de energia solar. E o segundo, através dos dados registrados no Estudo Estratégico para Geração Distribuída desenvolvido pela *Greener*, referente ao 1º semestre de 2023.

Para a segunda situação utiliza-se o preço médio do sistema fotovoltaico, estimado pela *Greener*, para os meses de Janeiro e Junho nos anos de 2021 a 2023 e para capacidades de potência específicas do sistema. Conforme figura abaixo:

Figura 3.3: Levantamento preços dos Sistemas FV .



Fonte: Greener, Estudo Estratégico 1º semestre de 2023 - Geração Distribuída.

Esta estimativa pondera a queda dos preços dos módulos fotovoltaicos, assim como a cotação do dólar e o estoque dos fornecedores. Dessa forma, aplica-se o custo indicado na faixa de potência calculada para o projeto e obtém-se o investimento estimado em reais.

3.7.2 Geração de Energia

A geração de energia considerada para a análise financeira é derivada do consumo médio de energia elétrica obtido para a definição da potência do sistema fotovoltaico.

São consideradas no estudo a energia gerada por mês e por ano, para estabelecer um comparativo entre a conta de energia sem a geração fotovoltaica e com a geração fotovoltaica. Possibilitando uma melhor visualização da economia mensal e anual de todo o sistema.

Para mensurar a energia gerada com o sistema solar adota-se a seguinte expressão para cada mês:

$$\text{Energia (kWh)} = \text{Pot}_{\text{mód}} \cdot \text{Quant}_{\text{mód}} \cdot \text{Irradiação} \quad (3.15)$$

E para obter uma estimativa mensal da energia gerada, deve-se acrescentar à expressão a quantidade de dias por mês.

3.7.3 Custos Operacionais

Os custos operacionais de um projeto fotovoltaico circundam os três principais pontos:

- Manutenção preventiva e corretiva;
- Monitoramento do sistema; e

- Substituição de componentes.

3.7.4 Análises de Retorno do Investimento

Existem vários indicadores que estimam o retorno do investimento em um sistema solar. Buscou-se neste projeto a aplicação de seis parâmetros, o payback simples e descontado, o valor presente líquido (VLP), a taxa mínima de atratividade (TMA) a taxa interna de retorno (TIR) e o retorno sobre o investimento (ROI).

3.7.4.1 Payback

Para confirmar o benefício do investimento em energia solar inicialmente utilizou-se a análise do payback, que é o indicador que evidencia o período necessário para recuperar o investimento designado no projeto. Trata-se de mensurar para o consumidor o tempo em que o investimento realizado para a instalação do sistema fotovoltaico se pague por completo e comece a gerar lucro.

É convencional calcular a partir do custo total do investimento e pela economia equivalente por mês da seguinte forma:

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento (R\$)}}{\text{Energia gerada (kWh/mês)} \cdot \text{Tarifa}} \quad (3.16)$$

Um ponto de atenção neste cálculo refere-se a tarifa aplicada, uma vez que esta varia de acordo com as condições de geração de energia. Outra condição a ser observada é que o payback simples não considera as variações que podem ocorrer no rendimento e no investimento.

Logo, para uma análise mais robusta e condizente com a realidade utiliza-se a metodologia oriunda do payback descontado. Que calcula o tempo de retorno do investimento considerando todas as variações dos rendimentos, através da correção utilizando taxas mensais ou anuais.

Para tal tem-se o mesmo cálculo do payback simples, sendo apenas considerado o valor do dinheiro ao longo do tempo:

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento (R\$)}}{\text{VLP (R\$/mês)}} \quad (3.17)$$

3.7.4.2 Valor Presente Líquido (VLP) e Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

Dando seguimento às análises, com a correção do investimento por meio de taxas, são obtidos valores futuros que são aplicados para o presente. Desse modo, tem-se a aplicação do VPL, que relaciona o valor presente do fluxo de caixa com características do projeto no decorrer da sua vida útil.

Considerando o processo adequado tem-se a necessidade de desenvolver um fluxo de caixa,

que registre todas as entradas e saídas pertinentes ao período de análise do projeto. Para esta aplicação o período a ser considerado será de 25 anos, considerando a garantia habitual fornecida pelos fabricantes dos módulos solares, que são os componentes mais caros do sistema.

Associado ao VLP, há a existência da taxa mínima de atratividade (TMA), que é definida como a taxa em que o consumidor quer investir para ter um retorno mínimo do investimento realizado. A taxa é estimada de modo particular, refletindo na remuneração alcançada com um investimento opcional para um risco análogo. O valor utilizado pode ser baseado na taxa de inflação ou na estimativa de retorno para investimentos similares.

Sua aplicação se dá pela equação:

$$VPL = FC_0 + \sum \frac{FC_i}{(1 + TMA)^i} \quad (3.18)$$

Em que:

- FC_0 : é o investimento inicial do projeto, e deve ser negativo;
- FC_i : somatório do fluxo de caixa esperado;
- TMA : a taxa mínima de atratividade.

3.7.4.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Mínima de Retorno (TIR) de um projeto é um indicador que demonstra o rendimento de um investimento, considerando o mesmo período e fluxo de caixa utilizados nos demais parâmetros. Caracteriza-se como o valor de redução do fluxo de caixa para que se obtenha um VLP igual a zero.

Para a TIR não existe uma fórmula para calcular o seu valor, mas pode ser obtida facilmente com uma função presente no Excel. Esta é uma taxa frequentemente comparada com a TMA para obtenção de conclusões mais acertivas sobre a viabilidade do projeto fotovoltaico, adota-se as seguintes concepções:

- Se a $TIR > TMA$, tem-se um projeto viável;
- Se a $TIR < TMA$, tem-se um projeto inviável;

3.7.4.4 Retorno sobre o Investimento (ROI)

O ROI por sua vez, avalia a lucratividade do investimento ao longo do tempo, tendo como foco, auxiliar investidores nas tomadas de decisões visando bons resultados. Tratando mais especificamente, ele caracteriza no projeto fotovoltaico a conexão entre os ganhos obtidos com a geração de energia solar e o investimento realizado na instalação do sistema.

Em resumo, o ROI pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$ROI(\%) = \frac{(\text{Ganhos Financeiros} - \text{Investimento Inicial})}{\text{Investimento Inicial}} \cdot 100 \quad (3.19)$$

Os ganhos financeiros estão atrelados à economia gerada com o sistema fotovoltaico, e podem ser obtidos no fluxo de caixa desenvolvido para as análises.

3.7.5 Análise de sensibilidade

Cada indicador considerado nas avaliações anteriores precisa representar uma análise complexa e coerente com a realidade. Desse modo, é preciso levantar possíveis cenários dentro das incertezas pertinentes, para assim garantir uma viabilidade financeira adequada aos projetos em questão.

Para o desenvolvimento de toda a análise financeira, serão considerados os seguintes aspectos na análise de sensibilidade:

- **Tarifas de Energia:** A tarifa utilizada para o cálculo do payback será definida através da projeção das últimas tarifas determinadas pela ANEEL. No mais, também serão considerados cenários otimistas e pessimistas que permitam uma aproximação alinhada com a realidade do cenário energético. Importante ressaltar que a ANEEL faz o reajuste tarifário anualmente, para cobrir os custos totais da concessão de energia. (Neoenergia, 2023)
- **Taxa Mínima de Atratividade (TMA):** A taxa utilizada para a análise é fornecida pelo histórico da parcela fixa da Taxa a Longo Prazo (TLP), fornecida pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Para verificação dos vários cenários serão analisadas as parcelas de cada mês do ano de 2023;
- **Taxas de juros:** A projeção da taxa de juros será considerada a partir da projeção da inflação, uma vez que o dinheiro possui um valor diferente com o tempo. A inflação causa impactos em toda a análise financeira, desde os custos de manutenção até o preço pago pela energia elétrica. Nesse caso é necessário ajustar o fluxo de caixa para diferentes situações.

O impacto de cada variação será considerado para os cálculos dos métodos financeiros utilizados para demonstrar a viabilidade de cada situação de projeto.

3.7.6 Fluxo de Caixa

O fluxo de caixa em uma análise financeira é uma ferramenta essencial para que o investidor possa prever as situações que possam ocorrer em torno do investimento. Ele se refere ao fluxo de dinheiro envolvido no processo em que está sendo analisado, sendo caracterizado pelo montante de caixa recolhido e gasto durante o período definido para o balanço.

Se tratando de um sistema fotovoltaico, a ferramenta torna-se imprescindível para justificar o alto investimento desembolsado pelo financiador do projeto, de modo a viabilizar a execução do mesmo. Para a análise financeira das situações de projeto consideradas neste estudo, foram desenvolvidos dois fluxos de caixa, um para o payback simples e outro para o payback descontado. Porém, como o payback simples não considera os cenários reais, acaba não sendo um bom indicador para análise.

Para a sua exploração é necessário a definição dos seguintes parâmetros:

- **Período de Análise:** É o período considerado para a análise do investimento em questão, em que serão consideradas todas as variáveis para verificação da sua atratividade. Para esse caso o período considerado será o período de garantia dos módulos fotovoltaicos;
- **Consumo atual (kWh/mês):** O consumo a ser considerado é aquele estimado inicialmente com as informações da unidade em questão;
- **Custo de disponibilidade (kWh/mês):** Como apresentado na seção 2.5, trata-se da taxa mínima cobrada pelas distribuidoras de energia, considerando o tipo de fornecimento;
- **Energia gerada (kWh/mês):** Considerar o mesmo valor utilizado para o consumo, prevendo uma margem de geração sem considerar o custo de disponibilidade;
- **Investimento (R\$):** O investimento inicial considerado na subseção 3.7.1;
- **Tarifa de Energia (R\$/kWh):** Tarifa atualizada da concessionária local;
- **Taxa de Aumento da Tarifa (%):** Margem de aumento considerada de acordo com o cenário atual, e o seu valor define o estudo como otimista ou conservador;
- **Taxa de Juros do mercado (%):** Informação importante a respeito do mercado para que seja calculada as análises financeiras pertinentes aos métodos adotados.

Prosseguindo com a verificação, utiliza-se a variação do dinheiro ao longo do período analisado. As conclusões acerca do investimento considera as alterações no preço da energia e as taxas ao longo do tempo, conforme modelo indicado:

Tabela 3.1: Modelo de fluxo de caixa inicial - Payback Descontado

	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano ...
Investimento Inicial:					
Geração de Energia (kWh):					
Tarifa (R\$/kWh):					
Receitas:					
Despesas O&M:					
Resultado Líquido:					
Saldo:					
Valor Presente (VPL):					
Fluxo de Caixa Descontado:					

A eficiência dos módulos fotovoltaicos varia do mesmo modo que o preço da energia. Sendo assim, é necessário adequar o sistema para essas estimativas. Cada fabricante possui um modelo de garantia, muitas vezes é considerado uma degradação linear durante os 25 anos de garantia, e normalmente é considerada um decaimento de 1-3% no primeiro ano. E, o seu decaimento anual da geração é definido em 0,7%.

Para desenvolver a análise do fluxo de caixa é preciso compreender inicialmente a dinâmica por traz da metodologia. Após a definição do investimento inicial e do período de tempo a ser analisado, é coerente estimar os custos de operação e manutenção (OM), que comumente é definido como sendo 1% do investimento inicial. Esses custos englobam a variável despesas, em conjunto com a troca do inversor condicionada ao período de garantia do mesmo.

A geração de energia considera a geração de energia anual com o desconto aplicado para o decaimento no primeiro ano e o decaimento anual estipulados para análise. Como resultado tem-se as receitas advindas da geração de energia multiplicada à tarifa aplicada para o período.

O resultado líquido é obtido através da soma das receitas com as despesas. Para o Valor Presente (VPL) tem-se a aplicação da equação 3.18, descrita na subseção 3.7.4.2. E para o valor final do fluxo de caixa descontado tem-se a seguinte variação, no ano zero é considerado o valor do investimento inicial e para os anos seguintes o valor é obtido pela soma do fluxo de caixa do ano anterior com o valor presente obtido para o ano atual.

3.7.7 Custo Nivelado de Energia

Avaliando o custo da geração de energia em um SFV, adota-se uma métrica bastante popular nesse mercado, o Custo Nivelado de Energia (LCOE, em inglês). Esse índice considera uma comparação entre tecnologias de geração de energia, como solar, hídrica, eólica, entre outras e é um modo eficiente de avaliação da viabilidade econômica do sistema que está sendo desenvolvido.

Para a energia solar o LCOE qualifica o custo médio por kWh de energia gerada ao longo da vida útil do sistema, sendo esta de 25 anos. São considerados os seguintes fatores para definição da competitividade econômica:

- **Investimento Inicial (Capex):** Custos atrelados a implementação do sistema, desde os equipamentos necessários até a instalação do arranjo;
- **Custos Operacionais (Opex):** Custos associados à manutenção do sistema;
- **Vida útil do sistema (t);**
- **Energia Produzida (E):** Capacidade de geração do sistema, ao longo do ano; e
- **Taxa de desconto (r):** Utilizada para direcionar o valor do investimento para o valor presente.

Desconsiderando as despesas atreladas ao uso de combustível, utiliza-se a expressão apresentada (GUIMARÃES 2023):

$$\text{LCOE (R\$/kWh)} = \frac{\sum \frac{(\text{Capex} + \text{Opex})}{(1+r)^t}}{\sum \frac{E}{(1+r)^t}} \quad (3.20)$$

Os resultados serão agregados no Capítulo 4.

3.8 REQUISITOS AMBIENTAIS DO PROJETO

3.8.1 Mitigação de Emissões de Carbono

Para verificação das contribuições para mitigação das emissões do carbono utiliza-se os dados do Capítulo 7 do Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), que se refere a energia e aponta as emissões de CO₂ para os módulos fotovoltaicos (IPCC, 2014).

Em conjunto, é estabelecido um comparativo com o Inventário corporativo elaborado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) que indica os fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia no Sistema Interligado Nacional do Brasil (SIN) para o ano de 2023 (MCTI 2023).

Tanto para a estimativa total de emissão de carbono da geração fotovoltaica e para a estimativa de emissão de carbono do sistema de energia convencional, será considerado o consumo mensal da unidade. Para ambas as situações serão realizadas projeções que demonstrem o impacto ambiental provocado pela iniciativa.

Por fim, de posse dos resultados ambientais, será realizado um comparativo com as metas estipuladas pelo Plano de Mitigação do Distrito Federal, e em seguida serão mensuradas as suas respectivas contribuições, tanto no cenário local, quanto no cenário nacional.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na esfera deste estudo, serão traçadas as características técnicas do sistema de geração de energia solar fotovoltaica, para cada um dos casos levantados. O intuito é destinar o desenvolvimento de cada modelo de projeto à conexão à rede de baixa tensão da Neoenergia, com o propósito de obter o Parecer de Acesso e efetuar o registro da unidade geradora junto à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Este projeto adere integralmente ao Sistema de Compensação de Energia, conforme estabelecido pela resolução normativa Nº 687/2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Para viabilizar essa integração, foi desenvolvido e compilado um dossiê técnico, contendo todos os requisitos necessários para a conexão dos sistemas fotovoltaicos de cada cenário à rede de distribuição, bem como a instalação segura e eficiente do sistema.

Todas as etapas de projeto adotadas foram detalhadas a fim de deixar registrada a concordância com as normas utilizadas, e do mesmo modo para esclarecer quaisquer decisões de projeto que foram empregadas considerando a circunstância em questão.

4.1 REQUISITOS EDUCACIONAIS DO PROJETO

4.1.1 Educação e Engajamento da Comunidade

Pensando numa integração dos alunos com o sistema dimensionado, sugere-se a inserção de algumas atividades na ementa de determinadas disciplinas curriculares, para que seja proporcionado o contato desde as etapas iniciais de dimensionamento do SFV até a sua execução. As atribuições podem ser realizadas em paralelo com as eletivas citadas na subseção 3.1.3. Segue a proposta de interação com o sistema solar para as seguintes matérias:

Matemática:

- Desenvolvimento do cálculo do consumo de energia elétrica da escola;
- Estimar o potencial de economia da implantação do SFV;
- Utilizar métodos matemáticos para representar o desempenho do sistema ao longo do tempo;
- Elaboração e análise de gráficos que expressem padrões de geração de energia;
- Desenvolver o cálculo da eficiência do sistema, considerando a conversão de energia solar em energia elétrica.

Biologia:

- Observação da atribuição do sistema solar na redução de emissão de carbono;
- Estabelecer uma relação entre a produção de energia por um SFV e os impactos ambientais;
- Tratar a associação de energia renováveis com a sustentabilidade;
- Debater sobre a colaboração da biodiversidade da região;
- Provocar discussões sobre o empenho da energia solar em conservar o ecossistema como um todo.

Inglês:

- Proporcionar debates acerca da temática de inserção e transição das energias renováveis na matriz energética brasileira, para que seja desenvolvida o discurso oral e escrito;
- Solicitar que os alunos redijam sobre a relevância da energia solar na atualidade;
- Proporcionar simulações de entrevistas com peritos sobre a temática.

Atrelado à execução do arranjo fotovoltaico sugere-se uma apresentação inicial do sistema que será instalado e as suas características, e, até mesmo uma documentação de cada etapa para que os alunos tenham a experiência do projeto que está sendo desenvolvido.

Inicialmente trabalhou-se com a ideia de visitação, caso o projeto fosse implantado em solo, porém, verificou-se no SFV da Faculdade de Tecnologia (FT) da UnB, que proporcionar esse contato tão próximo poderia acarretar em risco para a integridade física dos alunos. Desse modo, sugere-se a execução de um mini projeto, que englobaria um painel fotovoltaico, suas respectivas ligações para funcionamento e um sistema de monitoramento, apenas para que os alunos visualizem como o processo funciona.

Por fim, serão desenvolvidos *workshops* e palestras sobre energia solar, em conjunto com o Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) referente ao estudo de oportunidades no CEM02 atreladas a energia elétrica.

4.2 REQUISITOS TÉCNICOS DO PROJETO

4.2.1 Levantamento de Informações CEM 02

Os dados da unidade consumidora estão descritos a seguir:

Nome: Caixa Escolar do Centro Educacional 02 de Ceilândia Norte.

CNPJ: 02.455.789/0001-09.

Nº do Cliente: 474085-8.

Classificação: B3 Poder Público / Poder Público Estadual ou Distrital.

Consumo Médio: 8.126,944 kWh/mês.

Endereço: St. M QNM 14 LT A- Ceilândia, Brasília - DF, CEP 72210-140.

Latitude: -15.806830704803124.

Longitude: -48.109117182513614.

4.2.2 Consumo Energético CEM02

Caso 1: Com a utilização do relatório de gastos com energia da escola, obteve-se a seguinte média simples de consumo em quilowatts-hora (kWh), para o caso 1:

Tabela 4.1: Média de Consumo calculada para os anos de 2018 a 2022.

Média de Consumo (2018 a 2022)		
Meses	Consumo Médio kWh	Valor Médio da Fatura
Janeiro	2.957,00	R\$ 2.334,89
Fevereiro	5.270,00	R\$ 3.998,69
Março	8.621,20	R\$ 6.697,43
Abril	6.379,00	R\$ 5.047,96
Mai	6.529,00	R\$ 4.971,01
Junho	5.066,40	R\$ 3.891,33
Julho	3.576,20	R\$ 2.735,23
Agosto	5.594,40	R\$ 4.351,73
Setembro	1.1027,40	R\$ 9.081,82
Outubro	8.987,40	R\$ 7.059,96
Novembro	8.379,40	R\$ 6.753,03
Dezembro	5.324,80	R\$ 4.683,37
Média Anual	6.476,02	R\$ 5.133,87

Considerando o cenário incomum da pandemia ocorrido durante o período de análise, a média resultante foi de 6.476,02 kWh/mês.

Devido à expressiva diferença de consumo nos anos de 2020 e 2021, que representa uma diminuição de 50% no consumo, optou-se por excluí-los do cálculo.

Tabela 4.2: Média de Consumo calculada para os anos de 2018, 2019 e 2022.

Média de Consumo (2018/2019/2022)		
Meses	Consumo Médio kWh	Valor Médio da Fatura
Janeiro	2.586,33	R\$ 2.148,83
Fevereiro	5.286,33	R\$ 4.104,93
Março	10.434,67	R\$ 8.306,60
Abril	8.545,67	R\$ 6.906,11
Mai	8.919,33	R\$ 6.847,30
Junho	6.609,33	R\$ 5.111,72
Julho	4.121,67	R\$ 3.150,86
Agosto	7.070,67	R\$ 5.466,68
Setembro	15.126,00	R\$ 12.086,57
Outubro	11.634,33	R\$ 8.990,57
Novembro	11.049,00	R\$ 8.675,02
Dezembro	6.140,00	R\$ 5.275,79
Média Anual	8.126,94	R\$ 6.422,58

Portanto, a média final de consumo é de 8.126,94 kWh/mês. Lembrando que há a necessidade de subtrair o custo de disponibilidade da média de consumo, e por se tratar de uma ligação trifásica com custo de disponibilidade de 100 kWh, tem-se um consumo médio final de 8.026,94 kWh/mês.

A partir do resultado obtido na equação 3.1 para a média de dias. Obtém-se o seguinte consumo médio diário:

$$\text{Consumo diário} = \frac{8.026,94 \text{ (kWh/mês)}}{30,42 \text{ (dias/mês)}} = 263,87 \text{ (kWh/dia)}$$

Caso 2: Para o caso 2, considerou-se o consumo de 6 escolas com perfil semelhante ao Centro de Ensino Médio 02 Ceilândia. Portanto obtém-se como consumo médio por mês:

$$\text{Total (consumo)} = 8.126,94 \text{ (kWh)} \cdot 6 = 48.761,64 \text{ (kWh/mês)}$$

Que subtraindo o custo de disponibilidade, tem-se 48.661,64 (kWh/mês). E um consumo médio diário de:

$$\text{Consumo diário} = \frac{48.661,64 \text{ (kWh)}}{30,42 \text{ (dias/mês)}} = 1.599,66 \text{ (kWh/dia)}$$

4.2.3 Avaliação do Recurso Solar

Utilizando o CRESESB para a obtenção da informação da irradiação solar do local de instalação obtivemos os seguintes dados:

Figura 4.1: Dados de irradiação solar para a localização do CEM 02 Ceilândia.

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Brasília
 Município: Brasília, DF - BRASIL
 Latitude: 15,801° S
 Longitude: 48,149° O
 Distância do ponto de ref. (15,806831° S; 48,109117° O): 4,3 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,33	5,57	5,01	4,98	4,84	4,71	4,90	5,85	5,68	5,53	5,10	5,41	5,24	1,14
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	16° N	4,93	5,34	5,05	5,36	5,57	5,62	5,78	6,56	5,90	5,38	4,77	4,95	5,43	1,79
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	18° N	4,87	5,29	5,04	5,39	5,63	5,71	5,86	6,62	5,90	5,34	4,71	4,88	5,44	1,91
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	5° N	5,23	5,53	5,05	5,13	5,10	5,03	5,21	6,11	5,79	5,51	5,02	5,29	5,33	1,09

Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB). Acessado em: 17/10/2023.

Os dados de Cálculo do Plano Inclinado foram obtidos em três localizações aproximadas das coordenadas geográficas do CEM 02, convencionalmente opta-se por adotar os dados da localização mais próxima. Para este caso a localização mais próxima está a 4,3 km da referência.

Sendo assim, tem-se como a maior média anual o valor de 5,44. Este dado foi considerado para as duas situações de projeto.

4.2.4 Definição do Local das Instalações

O Centro de Ensino Médio 02 Ceilândia conta com uma vasta área, o que facilita a definição do local de instalação dos dois sistemas. Como pode ser observado a seguir, há muitos locais disponíveis. Desse modo, o critério de escolha se restringiu ao local com acesso facilitado à rede.

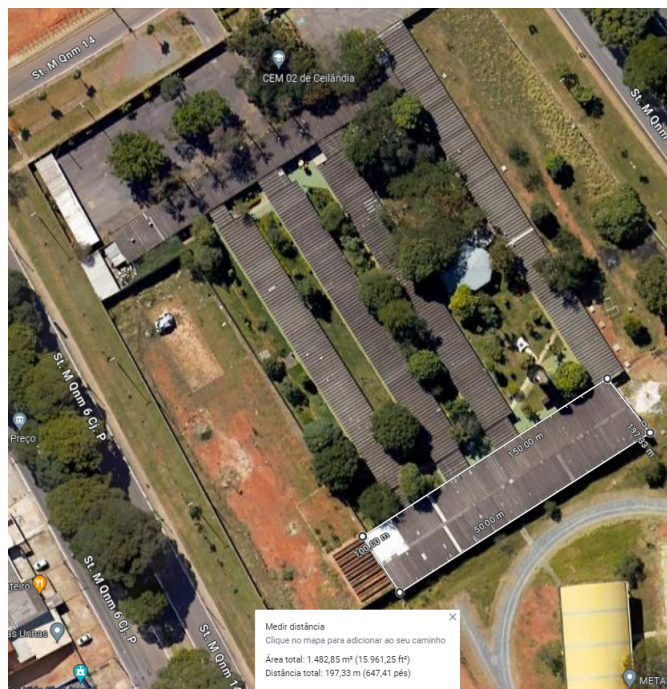
Figura 4.2: Vista aérea do CEM02 - Ceilândia.



Fonte: Imagem obtida no Google Earth Pro.

Considerando o **caso 1**, optou-se por escolher o telhado indicado abaixo, que apresentou uma melhor exposição ao sol considerando a simulação de sombreamento. Além de possuir um quadro na proximidade conectado à rede e com espaço disponível.

Figura 4.3: Vista aérea do telhado do CEM02 - Ceilândia escolhido para o caso 1.



Fonte: Imagem obtida no Google Maps.

Para o **caso 2**, seguindo as recomendações da escola, foi definido um local no chão para que os alunos possam ter uma melhor interação com o sistema. O local exato está indicado abaixo:

Figura 4.4: Vista aérea do CEM02 - Ceilândia com indicação do local escolhido para o caso 2.



Fonte: Imagem obtida no Google Maps.

4.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

4.3.1 Potência do Sistema

Para estimar a potência do sistema solar nos dois casos, utiliza-se os valores encontrados para o consumo diário na seção 3.4.2, a taxa de desempenho de 80% definida anteriormente e a HSP encontrada em 4.2.3. Aplicando a equação 3.2 é possível obter a potência necessária do sistema.

Para o **caso 1**, tem-se:

$$P_{FV} = \frac{(263.870(Wh/dia)/0,8)}{5,44(h)} = 60,63kWp$$

E, para o **caso 2**, tem-se:

$$P_{FV} = \frac{(1.599.660(Wh/dia)/0,8)}{5,44(h)} = 367,57kWp$$

4.3.2 Escolha e Distribuição dos Módulos Fotovoltaicos

Para os dois casos de projeto, considerou-se um módulo de 550 Wp de potência.

Desse modo, para o **caso 1** calcula-se:

$$\text{Quant. placas} = \frac{P_{FV}}{P(\text{placa})} = \frac{60,63(kWp)}{550(Wp)} = 110,24 \text{ placas}$$

Sendo necessárias 111 placas de 550 Wp para atender a potência de 60,63 kWp do sistema.

Para o **caso 2**:

$$\text{Quant. placas} = \frac{367,57(kWp)}{550(Wp)} = 668,31 \text{ placas}$$

Sendo necessárias 669 placas de 550 Wp para atender a potência de 367,57 kWp do sistema.

Para fins de aproximação com a realidade e com o intuito de viabilizar a instalação imediata do projeto no Centro de Ensino Médio 02 Ceilândia, foi adotado o seguinte módulo fotovoltaico:

- HiKu6 - Mono PERC Module - CS6W - 550MS, do fabricante Canadian Solar;

A escolha se confirmou pela alta eficiência e confiabilidade do módulo. Ele apresenta a tecnologia PERC (*Passivated Emitter Real Cell*) de célula dupla e possui baixa perda de energia na conexão celular. Além de dispor de uma melhor tolerância ao sombreamento.

Abaixo têm-se os principais critérios do módulo, obtidos no seu respectivo *datasheet*. Estas informações serão utilizadas para dimensionar o arranjo dos painéis.

Tabela 4.3: Dados Elétricos do módulo fotovoltaico da Canadian Solar.

Dados Elétricos STC*	
Potência Nominal Máxima (P _{máx}):	550 W
Tensão Máxima de Operação (V _{pm}):	41.7 V
Corrente Máxima de Operação (I _{mp}):	13.2 A
Tensão de Circuito Aberto (V _{oc}):	49.6 V
Corrente de Curto-Circuito (I _{sc}):	14.00 A
Eficiência do Módulo:	21.5 %
Temperatura de Operação:	-40°C~+85°C
Tensão Máxima do Sistema:	1500V (IEC/UL) ou 1000V (IEC/UL)
Classificação de Aplicação:	Classe A
Potência de Tolerância:	0~+10 W
* Sob condições padrões do teste STC.	

Fonte: *Datasheet Canadian Solar / HiKu6 - Mono PERC Module CS6W 550MS - 550 W. p. 2.*

Tabela 4.4: Características de temperatura módulo fotovoltaico da Canadian Solar.

Características de Temperatura	
Coeficiente de temperatura (P _{máx}):	-0.34 %/°C
Coeficiente de temperatura (V _{oc}):	-0.26 %/°C
Coeficiente de temperatura (I _{sc}):	0.05 %/°C
Temperatura nominal de operação do módulo:	41 ± 3 °C

Fonte: Datasheet Canadian Solar / HiKu6 - Mono PERC Module CS6W 550MS - 550 W. p. 2.

4.3.2.1 Correção dos Dados Técnicos do Módulo

Com a utilização do mesmo módulo para as duas situações de projeto, as correções que se seguem serão comum aos dois cenários.

Analisando o histórico de previsão do tempo para Brasília - DF definiu-se 18°C como temperatura mínima e 34 °C como temperatura máxima, possibilitando os cálculos que se seguem.

Utilizando a equação 3.3 para corrigir a corrente de curto circuito, obteve-se o seguinte resultado:

$$I_{sc,máx} = 14,0 \cdot \left(1 + \left((34 - 25) \cdot \left(\frac{0,05}{100} \right) \right) \right) = 14,06 \text{ A}$$

Através da equação 3.4 foram obtidos os seguintes resultados para a corrente de máxima potência corrigida:

$$I_{mp,máx} = 13,2 \cdot \left(1 + \left((34 - 25) \cdot \left(\frac{0,05}{100} \right) \right) \right) = 13,26 \text{ A}$$

Corrigindo as tensões V_{oc} e V_{mp} , por meio da manipulação das equações 3.5 e 3.6 respectivamente, tem-se os seguintes resultados:

$$V_{oc,máx} = 49,6 \cdot \left(1 + \left((18 - 25) \cdot \left(\frac{-0,26}{100} \right) \right) \right) = 50,503 \text{ V}$$

$$V_{mp,mín} = 41,7 \cdot \left(1 + \left((34 - 25) \cdot \left(\frac{-0,26}{100} \right) \right) \right) = 40,724 \text{ V}$$

4.3.3 Estrutura de Fixação dos Módulos Fotovoltaicos

Quanto à definição da estrutura de fixação para o **caso 1**, analisou-se o tipo de telhado da escola nas visitas técnicas realizadas *in loco*. Como pode ser visualizado nas figuras abaixo o telhado em questão é de fibrocimento.

Figura 4.5: Vista lateral do Centro de Ensino Médio 02 Ceilândia.



Fonte: Visita in loco realizada pela autora em 23/10/2023.

Figura 4.6: Vista aproximada do telhado do Centro de Ensino Médio 02 Ceilândia.

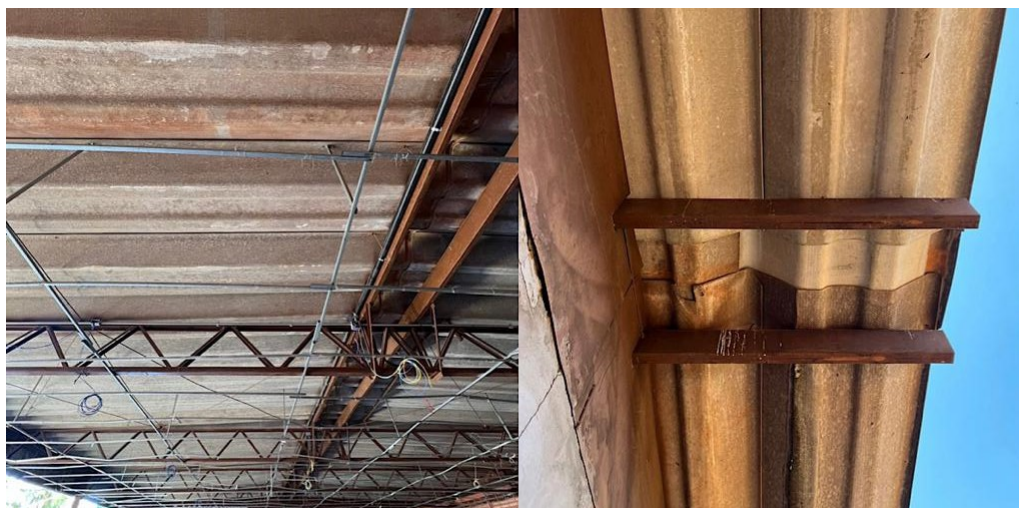


Fonte: Visita in loco realizada pela autora em 23/10/2023.

Desse modo, as estruturas a serem utilizadas devem ser adequadas para o tipo de telhado, ao mesmo tempo que devem ser permitidas pelo fabricante dos módulos escolhidos. A relação de materiais especificada na Tabela 4.12 possui uma estimativa de acordo com os orçamentos realizados para o desenvolvimento desse estudo.

Seguem alguns exemplos de estruturas adotadas no telhado da escola para outras finalidades:

Figura 4.7: Estruturas utilizadas do telhado do Centro de Ensino Médio 02 Ceilândia.



Fonte: Visita in loco realizada pela autora em 23/10/2023.

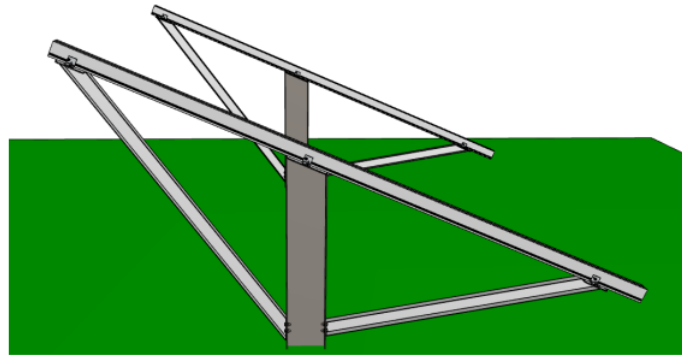
Para o **caso 2**, por se tratar de uma estrutura no solo, algumas observações precisam ser feitas. Inicialmente deve ser verificado o nivelamento da área que será instalado o sistema e para evitar possíveis problemas com a estrutura em períodos chuvosos, uma drenagem pluvial é essencial.

Outro ponto a ser verificado são os equipamentos que agregam a estrutura de uma geração no solo visando a proteção do mesmo, como cercas comuns e elétricas, arame farpado, sistema de segurança em tempo real, brita no lugar da instalação para evitar poeiras e demais sujidades.

A estrutura de solo sugerida é a monoposte, tratando-se de uma instalação em fileira única que sustenta os módulos fotovoltaicos e os posiciona em um ângulo ideal para maior capacidade de captação de energia.

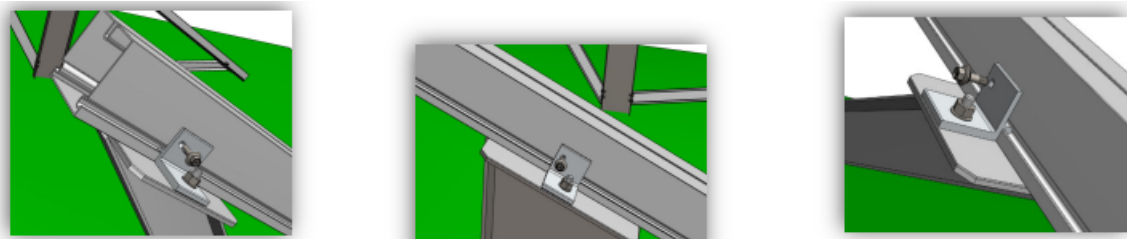
Para exemplificação, utilizou-se o Manual de Montagem da SPIN, empresa do mercado fotovoltaico que desenvolve e fabrica estruturas de fixação (Ecori, 2023). Abaixo segue o detalhamento indicado no manual para uma melhor visualização da estrutura sugerida.

Figura 4.8: Visão geral da estrutura de monoposte.



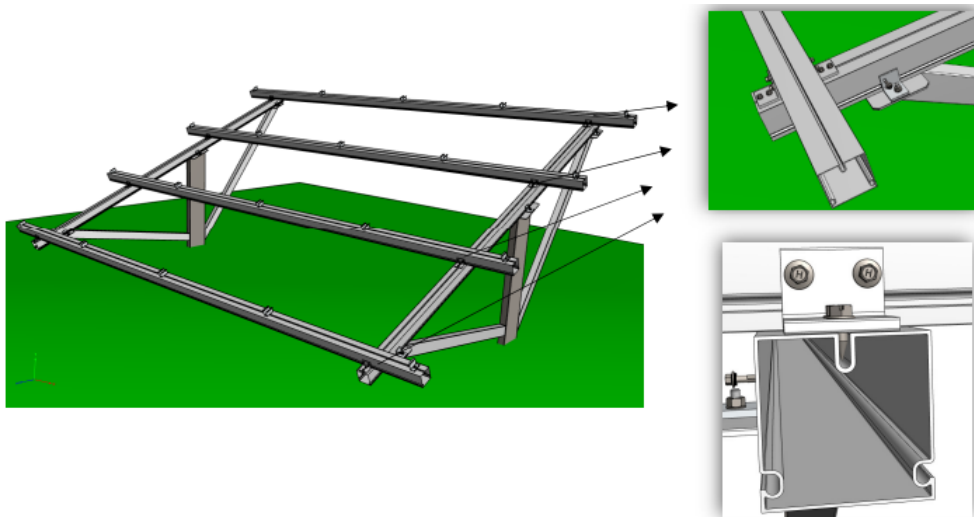
Fonte: Manual de Montagem - Usina de Solo Monoposte. Estruturas SPIN, (Ecori, 2023).

Figura 4.9: Detalhamento da presilhas e demais elementos de fixação na montagem da estrutura.



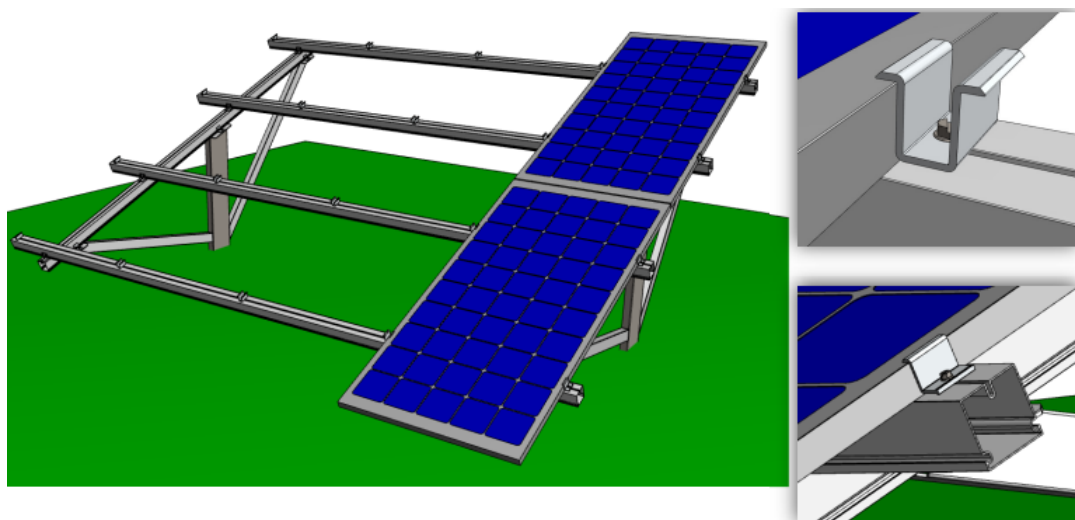
Fonte: Manual de Montagem - Usina de Solo Monoposte. Estruturas SPIN, (Ecori, 2023).

Figura 4.10: Visão detalhada dos trilhos longitudinais e presilhas de fixação.



Fonte: Manual de Montagem - Usina de Solo Monoposte. Estruturas SPIN, (Ecori, 2023).

Figura 4.11: Visão geração do alinhamento das placas e detalhamento da fixação necessária.



Fonte: Manual de Montagem - Usina de Solo Monoposte. Estruturas SPIN, (Ecori, 2023).

4.3.4 Escolha do Inversor

Após a avaliação da conta de energia fornecida pela escola, verificou-se que o fornecimento é trifásico. Sendo assim, para prosseguir com o dimensionamento, considerou-se o seguinte inversor trifásico para os dois casos:

Inversor Solar *Sungrow* - SG40CX-P2 - 40.0 kW - Trifásico - 380 V - 4MPPT.

Tabela 4.5: Dados Técnicos do inversor escolhido.

Dados Técnicos	SG40CX
Máxima Potência de Entrada:	56 kWp
Tensão Máxima de Entrada (CC):	1100 V
Faixa de Tensão MPPT:	160 ~1000 V
Tensão Inicial de Entrada:	200 V
Tensão Nominal de Entrada (CC):	600 V
Corrente Máxima de Entrada (CC):	30 A
Corrente Máxima de Curto-Circuito (CC):	40 A
Quantidade de Rastreadores MPPT:	4
Quantidade de Strings por MPPT:	2
Tensão Nominal (CA):	380 V
Corrente Máxima de Saída (CA):	66,9 A

Fonte: Datasheet *Sungrow* - SG33CX / SG40CX / SG50CX. p. 2.

4.3.5 Dimensionamento do Arranjo

Continuando com a definição dos requisitos de projeto, levando em conta a potência máxima de entrada do inversor, foi realizada uma análise da quantidade de módulos que o inversor suporta. Através da equação 3.7 estabeleceu-se um limite máximo de:

$$\text{Quantidade máx.} = \frac{56.000 \text{ Wp}}{550 \text{ Wp}} = 101,818 = 101 \text{ módulos}$$

Para a quantidade máxima de módulos em série utilizou-se a equação 3.10:

$$\text{Quantidade série} = \frac{1100 \text{ V}}{50,503 \text{ V}} = 21,781 = 21 \text{ módulos}$$

Utilizando a equação 3.9 para delimitação da quantidade mínima de módulos para o funcionamento do inversor:

$$\text{Quantidade mín.} = \frac{160 \text{ V}}{40,724 \text{ V}} = 3,929 = 4 \text{ módulos}$$

Logo, o sistema dimensionado é capaz de suportar no máximo duas strings por MPPT e cada string pode conter no máximo 21 módulos em série. E para que o inversor inicie seu funcionamento são necessários 4 módulos, ressaltando o limite máximo de 101 módulos por inversor.

Por fim, utilizando a equação 3.11 definiu-se para a quantidade de módulos em paralelo a relação abaixo:

$$\text{Quantidade paralelo} < \frac{30 \text{ A}}{14,063 \text{ A}} < 2,133 \text{ módulos}$$

Sendo assim, nesta condição é permitido a associação em paralelo de apenas dois módulos. A configuração dos arranjos podem ser vistas nas tabelas que se seguem.

Tabela 4.6: Resumo do arranjo fotovoltaico do sistema 1.

Resumo Sistema 1	
Potência do Sistema:	60.630 W
Nº de módulos no sistema:	111
Nº de inversores no sistema:	2
Nº de strings por inversor:	3
Nº de módulos por string inv. 1:	18
Nº de módulos por string inv. 2:	19
Potência nominal por string inv. 1:	29.700 W
Potência nominal por string inv. 2:	31.350 W
Nº de módulos inversor 1:	54
Nº de módulos inversor 2:	57

Tabela 4.7: Resumo do arranjo fotovoltaico do sistema 2.

Resumo Sistema 2	
Potência do Sistema:	367.570 W
Nº de módulos no sistema:	669
Nº de inversores no sistema:	7
Nº de strings por inversor:	5
Nº de módulos por string inv. 1-4:	4x19-1x20
Nº de módulos por string inv. 5-7:	5x19
Potência nominal por string inv. 1-4:	10.450 W - 11.000 W
Potência nominal por string inv. 5-7:	10.450 W
Nº de módulos inversor 1-4:	96
Nº de módulos inversor 5-7:	95

4.3.6 Projeto Fotovoltaico

4.3.6.1 Dimensionamento Condutores CA

Prosseguindo com o desenvolvimento do projeto elétrico para a aprovação da concessionária, destaca-se os seguintes resultados para a seção dos condutores CA.

Para o critério de seção mínima considera-se a linha como sendo uma instalação fixa em geral, com condutores e cabos isolados. E para sistemas fotovoltaicos por ser caracterizado como um circuito de força, tem-se 2,5 mm² como seção mínima para um condutor de cobre. É importante ressaltar que os módulos fotovoltaicos vêm equipados com um condutor de 4 mm², logo para o projeto, esta será a seção mínima considerada.

Desenvolvendo o método de capacidade de condução de corrente, definiu-se a corrente de projeto corrigida através dos seguintes fatores de correção. Para o fator K_1 foi considerado que a temperatura ambiente não será superior a 45°C, logo seu valor é 0,87. Os fatores K_2 e K_3 foram considerados unitários, levando em conta uma resistividade neutra e um único circuito agrupado.

Além disso, o tipo de instalação adotada para os condutores elétricos no caso 1 foi o método de referência B1 (referente a cabos unipolares em eletroduto aparente), e para o caso 2 o método B1 (referente a cabos unipolares ou cabo multipolar em canaleta ventilada embutida no piso).

Considerando uma isolação EPR ou XLPE para os cabos expostos a irradiação solar, e sendo três o número de condutores carregados, utilizou-se a Tabela 37 da ABNT NBR 5410:2008 para a determinação da capacidade de condução de corrente. Ressaltando a necessidade de correção de I_z , utilizando os fatores definidos anteriormente para a corrente de projeto corrigida.

Aplicando o critério de queda de tensão, com base na equação 3.14, utilizou-se como corrente de projeto a corrente máxima de operação do módulo (I_{mp}), devido à conexão em série dos módulos fotovoltaicos, a qual resultará em uma corrente total equivalente à corrente do módulo, que possui um valor de 13,2 A. De acordo com a ABNT NBR 16690:2019 adota-se o limite de 3% de queda de tensão aceitável para o arranjo e por convenção, a condutividade do cobre é de 44 m/Ω.mm².

Para a definição do comprimento do condutor no caso 1, considerou-se o percurso entre o

inversor e o Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT), que é o pior caso para o dimensionamento. Para o caso 2, foi adotado o percurso entre o inversor e o quadro parcial considerado no sistema.

Tabela 4.8: Resumo do dimensionamento dos condutores CA, segundo a ABNT NBR 5410:2008.

Circuito CA	Seção pela Capacidade de Condução de Corrente (mm ²)	Seção pela Queda de Tensão (mm ²)	Seção Mínima dos Condutores (mm ²)	Seção do cabo de Fase e Neutro -ESCOLHIDA- (mm ²)	Seção do cabo de Proteção (mm ²)
Caso 1	25	1,5	4	25	16
Caso 2	50	1,5	4	50	25

4.3.6.2 Dimensionamento Condutores CC

Para o cálculo da seção dos condutores de corrente contínua define-se o valor nominal do dispositivo de proteção contra sobrecorrente através das relações citadas na subseção 3.6.7.2.

Uma vez que cada situação de projeto apresentada possui variáveis distintas de exposição, serão realizadas considerações específicas para cada uma delas. Para este dimensionamento serão adotados os métodos de capacidade de condução de corrente e de queda de tensão.

Os parâmetros para o **caso 1** podem ser verificados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Parâmetros para o dimensionamento dos cabos CC - Sistema 1.

Parâmetros Sistema 1	
Temperatura ambiente:	40°C
Temperatura de operação:	90°C
Condição dos cabos caso 1:	Cabo instalado ao ar livre (C1)
Modo de Instalação:	Modo 1, de acordo com a ABNT NBR 16612:2017
Nº de módulos por string:	21
Nº de strings:	4
Corrente da string:	30 A
Corrente de Curto-Circuito do módulo (I_{sc}):	14 A
Corrente Reversa do módulo ($I_{mód\ máx.O CPR}$):	25 A

Estabelecendo a relação necessária através da I_{sc} , tem-se:

$$21,0 \text{ A} < I_n < 33,6 \text{ A}$$

$$I_n \leq 25,0 \text{ A}$$

Sendo escolhido o dispositivo de proteção contra sobrecorrente de 25 A.

Prosseguindo com o dimensionamento, os cabos de todas as strings estarão no mesmo eletroduto. Logo, para esse caso deve ser considerado o agrupamento de 4 circuitos a uma temperatura de 40°C, e seguindo o método de instalação definido pela ANT NBR 16612:2017, a capacidade de condução de corrente a ser considerada é dada pela Tabela C.3 da mesma norma.

O fator de correção de agrupamento a ser considerado é dado pela ABNT NBR 5410:2008, na Tabela 42. Então tem-se um cabo de 6 mm² de seção, que será instalado ao ar livre protegido do sol considerando o modo 1 de instalação. Corrigindo a corrente I_z , obtém-se o valor de 34,45 A, e

como esta é maior que a corrente de cada string e maior do que a corrente nominal do dispositivo de proteção definido anteriormente, a seção escolhida para o cabo atende os critérios.

Para o **caso 2** utiliza-se os parâmetros da Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Parâmetros para o dimensionamento dos cabos CC - Sistema 2.

Parâmetros Sistema 2	
Temperatura ambiente:	40°C
Temperatura de operação:	90°C
Condição dos cabos caso 2:	Cabo em eletroduto diretamente enterrado (C3)
Nº de módulos por string:	21
Nº de strings:	26
Corrente da string:	30 A
Corrente de Curto-Circuito do módulo (I_{sc}):	14 A
Corrente Reversa do módulo ($I_{mód\ máx,OCPR}$):	15 A

A relação estabelecida para o sistema 1 é considerada para o sistema 2.

Os parâmetros que diferenciam o dimensionamento dos cabos dos sistemas é o método de instalação, que para este caso deve considerar a Tabela C.9 da ABNT NBR 16612:2017. Serão adotados uma temperatura de 30°C do solo e uma resistividade térmica do terreno igual a 2,5 K.m/W, que determinam uma seção de 25 mm². Para um agrupamento de mais de 20 condutores, tem-se como corrente corrigida I_z o valor de 34,58 A. E esta demonstra que o condutor considerado é adequado para os critérios.

Em ambos os casos adotou-se o método da queda de tensão, assim como desenvolvido no dimensionamento dos cabos CA. Em resumo tem-se:

Tabela 4.11: Resumo do dimensionamento dos condutores CC, segundo a ABNT NBR 16612:2017.

Circuito CC	Seção pela Capacidade de Condução de Corrente (mm ²)	Seção pela Queda de Tensão (mm ²)	Seção Mínima dos Condutores (mm ²)	Seção do cabo de Fase e Neutro -ESCOLHIDA- (mm ²)	Seção do cabo de Proteção (mm ²)
Caso 1	6	1,5	2,5	6	6
Caso 2	25	1,5	2,5	25	16

4.3.6.3 Diagrama Unifilar

Foi desenvolvido um diagrama unifilar para cada caso de acordo com as especificações de aprovação da concessionária. Os diagramas encontram-se detalhados nos Anexos do documento para uma melhor visualização.

4.4 REQUISITOS ECONÔMICOS DO PROJETO

4.4.1 Investimento Inicial

Para a simulação do investimento inicial do **sistema 1** utilizou-se as duas metodologias descritas na seção 3.7.1. Segue abaixo o orçamento obtido através de uma empresa do setor:

Tabela 4.12: Orçamento Sistema 1.

Itens	Garantia	Qtd.	Custo
Estrutura de Fixação Fibrocimento (fix. Madeira) para 4 painéis - GO Solar	144	21	R\$ 98.039,00
Estrutura de Fixação Fibrocimento (fix. Madeira) para 3 painéis - GO Solar	144	2	
Cabo Solar Corrente Contínua (CC) - Reisolar - Cabo Solar 6mm - Vermelho - 6 mm ²	24	200	
Conector Solar - Par MC4 Macho + Femea- Penzel - 6 mm ²	60	9	
Cabo Solar Corrente Contínua (CC) - Reisolar - Cabo Solar 6mm - Preto - 6 mm ²	24	200	
Inversor Solar Sungrow - SG40CX-P2 - 40.0 KW - Trifásico - 380 V - 4 MPPT	120	1	
Placa Solar Monocristalina 550 Wp - Jinko JKM550M-72HL4-V TIGER PRO 550W	180	90	R\$ 5.257,74
Frete	-	-	
Instalação	-	-	
Adequações	-	-	
		TOTAL	R\$ 139.896,74

Para a aplicação do segundo método de estimativa, utiliza-se os dados de levantamento de preços para os sistemas FV realizado pela *Greener* e apresentado na figura 3.3.

Nos dados do estudo estratégico da *Greener* não há referência para a potência do sistema em questão, desse modo adota-se o pior caso aproximado. Considerando um sistema FV comercial de pequeno porte enquadrado na potência de 75 kWp, tem-se o custo de R\$ 3,03 por Wp, segundo (Greener 2023). Aplicando para a potência do sistema tem-se:

$$\text{Investimento} = 60.630 \text{ (Wp)} \cdot 3,03 \text{ (R\$/Wp)} = \text{R\$ } 183.708,90$$

Para o **sistema 2** não foi possível obter um orçamento, dada a complexidade de um projeto dessa magnitude para um órgão público. Desse modo, foi utilizado apenas a estimativa da *Greener*, considerando um sistema de grande porte de 500 kWp solo como pior caso para a estimativa (Greener 2023).

$$\text{Investimento} = 367.570 \text{ (Wp)} \cdot 3,60 \text{ (R\$/Wp)} = \text{R\$ } 1.260.765,10$$

4.4.2 Geração de Energia

Para estimar a geração de energia de ambos os sistemas projetados, utilizou-se a equação 3.15, aliada com os dados do módulo fotovoltaico disponibilizado na Tabela 4.3 e os dados de

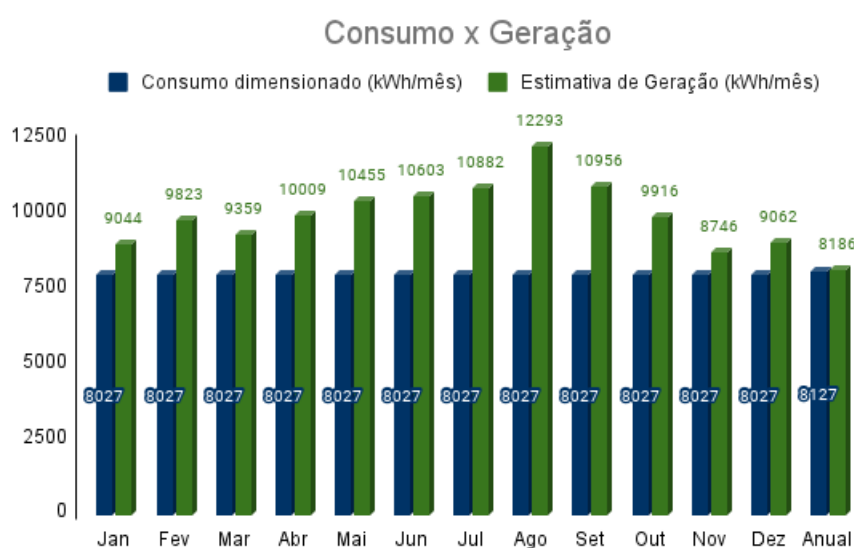
irradiação obtidos no site do CRESESB.

Para o **caso 1** tem-se:

Tabela 4.13: Estimativa de geração - Sistema 1

Caso 1	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Consumo de energia dimensionado (kWh/mês):	8.027	8.027	8.027	8.027	8.027	8.027	8.027	8.027	8.027	8.027	8.027	8.027
Consumo de energia real (kWh/mês):	2.586	5.286	10.435	8.546	8.919	6.609	4.122	7.071	15.126	11.634	11.049	6.140
Irradiação Solar (kWh/m ² .dia):	4,87	5,29	5,04	5,39	5,63	5,71	5,86	6,62	5,9	5,34	4,71	4,88
Estimativa de Geração (kWh/mês):	9.044	9.823	9.359	10.009	10.455	10.603	10.882	12.293	10.956	9.916	8.746	9.062

Figura 4.12: Estimativa de geração - Sistema 1.



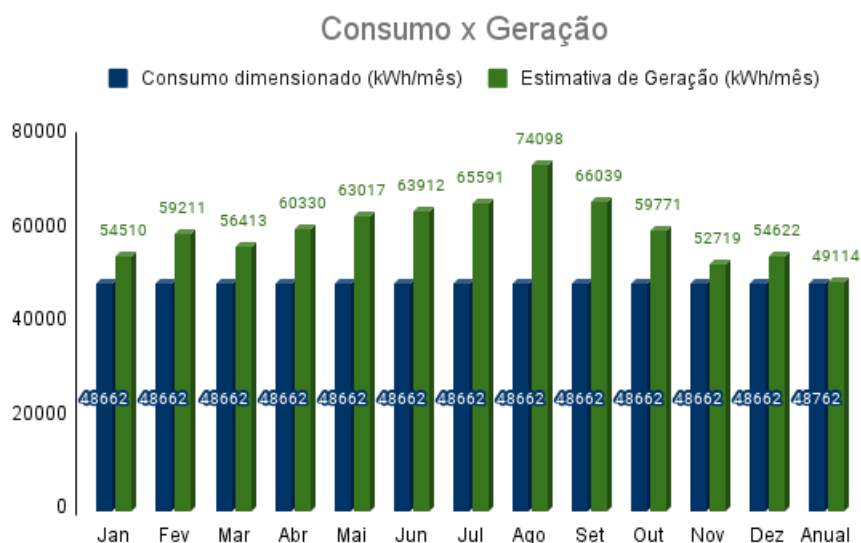
Fonte: Autora, 2023.

E para o **caso 2**:

Tabela 4.14: Estimativa de geração - Sistema 2

Caso 2	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Consumo de energia dimensionado (kWh/mês):	48.662	48.662	48.662	48.662	48.662	48.662	48.662	48.662	48.662	48.662	48.662	48.662
Consumo de energia real (kWh/mês):	15.518	31.718	62.608	51.274	53.516	39.656	24.730	42.424	90.756	69.806	66.294	36.840
Irradiação Solar (kWh/m ² .dia):	4,87	5,29	5,04	5,39	5,63	5,71	5,86	6,62	5,9	5,34	4,71	4,88
Estimativa de Geração (kWh/mês):	54.510	59.211	56.413	60.330	63.017	63.912	65.591	74.098	66.039	59.771	52.719	54.622

Figura 4.13: Estimativa de geração - Sistema 2.



Fonte: Autora, 2023.

Em ambos os casos é possível observar que para alguns meses a energia gerada é maior do que a energia consumida. Para esses casos o excedente é gerado como crédito para o consumidor, a fim de que ocorra um equilíbrio com os meses que se tem um consumo maior do que a energia gerada. No mais, para os dois casos é possível avaliar que a geração anual está de acordo com o consumo dimensionado para a UC.

4.4.3 Fluxo de Caixa

A fim de analisar o investimento necessário para ambos os projetos, considerou-se os seguintes aspectos para o desenvolvimento do fluxo de caixa:

Tabela 4.15: Parâmetros considerados no Fluxo de Caixa - Sistema 1.

Parâmetros Caso 1			
Consumo Atual (kWh/mês):	8.026,94	Potência Sistema (kWp):	60,63
Custo Disponibilidade (kWh/mês):	100	Tarifa (R\$/kWh):	0,7662
Energia Gerada (kWh/mês):	8.026,94	Aumento Tarifa:	9,95%
Iluminação Pública:	R\$ 346,02	Juros Mercado:	0%
Tempo de vida do projeto:	25 anos	Decaimento Geração:	0,7%

Tabela 4.16: Parâmetros considerados no Fluxo de Caixa - Sistema 2.

Parâmetros Caso 2			
Consumo Atual (kWh/mês):	48.661,64	Potência Sistema (kWp):	367,57
Custo Disponibilidade (kWh/mês):	100	Tarifa (R\$/kWh):	0,7662
Energia Gerada (kWh/mês):	48.661,64	Aumento Tarifa:	9,95%
Iluminação Pública:	R\$ 346,02	Juros Mercado:	0%
Tempo de vida do projeto:	25 anos	Decaimento Geração:	0,7%

Importante ressaltar que a variável de projeção dos juros do mercado serão consideradas na subseção 4.4.5. Sendo assim, para o fluxo de caixa inicial adotou-se zero. Na definição do aumento da tarifa, foi utilizado o dado mais recente publicado pela ANEEL, representando uma taxa de 9,95% de aumento (Neoenergia, 2023).

Para a tarifa foi considerado o valor mais recente publicado pela concessionária, os gastos com iluminação pública foram adotados conforme o (Decreto nº 26.974, de 04 de julho de 2006) e para o custo de disponibilidade utilizou-se o valor de 100 kWh, como indicado na (ANEEL, 2021).

Na definição da garantia do sistema, foram analisados os casos apontados pelo (CRESESB 2014) e adotou-se um decaimento de rendimento anual linear de 0,7%/ano durante o período de 25 anos.

Desenvolvendo o fluxo de caixa, definiu-se parâmetros extras para análise. É estimado em 1% do investimento inicial, o custo referente a operação e manutenção do sistema fotovoltaico, com um decaimento de 3% no primeiro ano de operação e 0,7% para os demais.

Para a TMA, utilizou-se o valor publicado para o mês de Dezembro de 2023 pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), sendo o valor registrado para a parcela fixa da TLP de 5,56%.

Por fim, considerou-se a troca do inversor no 13º ano, uma média estabelecida a partir da garantia do fabricante que é de 10 a 15 anos, e o seu custo foi avaliado a partir de orçamentos solicitados, girando em torno de R\$ 15.447,84.

Tabela 4.17: Parâmetros considerados no Fluxo de Caixa - Payback Descontado Sistema 1.

Parâmetros Payback Descontado - Caso 1	
Geração Anual (kWh):	96.323,28
Decaimento Geração 1 ano:	3%
Despesas Operação e Manutenção:	1%
TMA:	5,56%
Troca do Inversor:	R\$ 15.447,84

Tabela 4.18: Parâmetros considerados no Fluxo de Caixa - Payback Descontado Sistema 2.

Parâmetros Payback Descontado - Caso 2	
Geração Anual (kWh):	583.939,68
Decaimento Geração 1 ano:	3%
Despesas Operação e Manutenção:	1%
TMA:	5,56%
Troca do Inversor:	R\$ 61.791,36

Segue o fluxo de caixa para o **caso 1**:

	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
Investimento Inicial:	-R\$ 183.708,90					
Geração (kWh):		93.433,58	92.779,55	92.130,09	91.485,18	90.844,78
Tarifa (R\$/kWh):		R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77
Receitas:		R\$ 71.588,81	R\$ 71.087,69	R\$ 70.590,07	R\$ 70.095,94	R\$ 69.605,27
Despesas O&M:		-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09
Resultado Líquido:	-R\$ 183.708,90	R\$ 69.751,72	R\$ 69.250,60	R\$ 68.752,99	R\$ 68.258,86	R\$ 67.768,18
Saldo:	-R\$ 183.708,90	-R\$ 113.957,18	-R\$ 44.706,58	R\$ 24.046,41	R\$ 92.305,26	R\$ 160.073,45
Fluxo Descontado:	-R\$ 183.708,90	-R\$ 117.631,10	-R\$ 55.483,45	R\$ 2.967,75	R\$ 57.942,28	R\$ 109.646,85

	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
Investimento Inicial:					
Geração (kWh):	90.208,87	89.577,41	88.950,37	88.327,71	87.709,42
Tarifa (R\$/kWh):	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77
Receitas:	R\$ 69.118,04	R\$ 68.634,21	R\$ 68.153,77	R\$ 67.676,69	R\$ 67.202,96
Despesas O&M:	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09
Resultado Líquido:	R\$ 67.280,95	R\$ 66.797,12	R\$ 66.316,68	R\$ 65.839,60	R\$ 65.365,87
Saldo:	R\$ 227.354,39	R\$ 294.151,51	R\$ 360.468,19	R\$ 426.307,80	R\$ 491.673,67
Fluxo Descontado:	R\$ 158.275,90	R\$ 204.012,31	R\$ 247.028,08	R\$ 287.485,00	R\$ 325.535,22

Tabela 4.19: Fluxo de caixa - Payback Descontado caso 1 (Parte 3).

	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15
Investimento Inicial:					
Geração (kWh):	87.095,45	86.485,78	85.880,38	85.279,22	84.682,27
Tarifa (R\$/kWh):	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77
Receitas:	R\$ 66.732,54	R\$ 66.265,41	R\$ 65.801,55	R\$ 65.340,94	R\$ 64.883,55
Despesas O&M:	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09
Resultado Líquido:	R\$ 64.895,45	R\$ 64.428,32	R\$ 63.964,46	R\$ 63.503,85	R\$ 63.046,46
Saldo:	R\$ 556.569,11	R\$ 620.997,43	R\$ 669.514,05	R\$ 733.017,90	R\$ 796.064,37
Fluxo Descontado:	R\$ 361.321,87	R\$ 394.979,55	R\$ 418.989,91	R\$ 448.761,96	R\$ 476.762,73

Tabela 4.20: Fluxo de caixa - Payback Descontado caso 1 (Parte 4).

	Ano 16	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20
Investimento Inicial:					
Geração (kWh):	84.089,49	83.500,86	82.916,36	82.335,94	81.759,59
Tarifa (R\$/kWh):	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77
Receitas:	R\$ 64.429,37	R\$ 63.978,36	R\$ 63.530,51	R\$ 63.085,80	R\$ 62.644,20
Despesas O&M:	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09
Resultado Líquido:	R\$ 62.592,28	R\$ 62.141,27	R\$ 61.693,43	R\$ 61.248,71	R\$ 60.807,11
Saldo:	R\$ 858.656,65	R\$ 920.797,92	R\$ 982.491,35	R\$ 1.043.740,06	R\$ 1.104.547,17
Fluxo Descontado:	R\$ 503.097,57	R\$ 527.865,55	R\$ 551.159,87	R\$ 573.068,17	R\$ 593.672,90

Tabela 4.21: Fluxo de caixa - Payback Descontado caso 1 (Parte 5).

	Ano 21	Ano 22	Ano 23	Ano 24	Ano 25
Investimento Inicial:					
Geração (kWh):	81.187,28	80.618,96	80.054,63	79.494,25	78.937,79
Tarifa (R\$/kWh):	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77
Receitas:	R\$ 62.205,69	R\$ 61.770,25	R\$ 61.337,86	R\$ 60.908,49	R\$ 60.482,13
Despesas O&M:	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09	-R\$ 1.837,09
Resultado Líquido:	R\$ 60.368,60	R\$ 59.933,16	R\$ 59.500,77	R\$ 59.071,40	R\$ 58.645,05
Saldo:	R\$ 1.164.915,77	R\$ 1.224.848,93	R\$ 1.284.349,70	R\$ 1.343.421,11	R\$ 1.402.066,15
Fluxo Descontado:	R\$ 613.051,57	R\$ 631.277,13	R\$ 648.418,15	R\$ 664.539,16	R\$ 679.700,82

O fluxo de caixa para o **caso 2** pode ser verificado abaixo:

	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
Investimento Inicial:	-R\$ 1.260.765,10					
Geração (kWh):		566.421,49	562.456,54	558.519,34	554.609,71	550.727,44
Tarifa (R\$/kWh):		R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77
Receitas:		R\$ 433.992,15	R\$ 430.954,20	R\$ 427.937,52	R\$ 424.941,96	R\$ 421.967,36
Despesas O&M:		-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65
Resultado Líquido:	-R\$ 1.260.765,10	R\$ 421.384,49	R\$ 418.346,55	R\$ 415.329,87	R\$ 412.334,31	R\$ 409.359,71
Saldo:	-R\$ 1.260.765,10	-R\$ 839.380,61	-R\$ 421.034,06	-R\$ 5.704,19	R\$ 406.630,12	R\$ 815.989,83
Fluxo Descontado:	-R\$ 1.260.765,10	-R\$ 861.575,54	-R\$ 486.138,24	-R\$ 133.040,43	R\$ 199.046,62	R\$ 511.372,66

Tabela 4.22: Fluxo de caixa - Payback Descontado caso 2 (Parte 2).

	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
Investimento Inicial:					
Geração (kWh):	546.872,35	543.044,24	539.242,93	535.468,23	531.719,95
Tarifa (R\$/kWh):	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77
Receitas:	R\$ 419.013,59	R\$ 416.080,50	R\$ 413.167,93	R\$ 410.275,76	R\$ 407.403,83
Despesas O&M:	-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65
Resultado Líquido:	R\$ 406.405,94	R\$ 403.472,85	R\$ 400.560,28	R\$ 397.668,11	R\$ 394.796,18
Saldo:	R\$ 1.222.395,78	R\$ 1.625.868,62	R\$ 2.026.428,91	R\$ 2.424.097,01	R\$ 2.818.893,19
Fluxo Descontado:	R\$ 805.113,12	R\$ 1.081.373,52	R\$ 1.341.193,67	R\$ 1.585.551,54	R\$ 1.815.366,94

Tabela 4.23: Fluxo de caixa - Payback Descontado caso 2 (Parte 3).

	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15
Investimento Inicial:					
Geração (kWh):	527.997,91	524.301,93	520.631,82	516.987,39	513.368,48
Tarifa (R\$/kWh):	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77
Receitas:	R\$ 404.552,00	R\$ 401.720,14	R\$ 398.908,10	R\$ 396.115,74	R\$ 393.342,93
Despesas O&M:	-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65	-R\$ 74.399,01	-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65
Resultado Líquido:	R\$ 391.944,35	R\$ 389.112,49	R\$ 324.509,09	R\$ 383.508,09	R\$ 380.735,28
Saldo:	R\$ 3.210.837,54	R\$ 3.599.950,03	R\$ 3.924.459,12	R\$ 4.307.967,20	R\$ 4.688.702,48
Fluxo Descontado:	R\$ 2.031.504,98	R\$ 2.234.779,33	R\$ 2.395.375,40	R\$ 2.575.172,71	R\$ 2.744.268,34

Tabela 4.24: Fluxo de caixa - Payback Descontado caso 2 (Parte 4).

	Ano 16	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20
Investimento Inicial:					
Geração (kWh):	509.774,90	506.206,48	502.663,03	499.144,39	495.650,38
Tarifa (R\$/kWh):	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77
Receitas:	R\$ 390.589,53	R\$ 387.855,40	R\$ 385.140,41	R\$ 382.444,43	R\$ 379.767,32
Despesas O&M:	-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65
Resultado Líquido:	R\$ 377.981,88	R\$ 375.247,75	R\$ 372.532,76	R\$ 369.836,78	R\$ 367.159,67
Saldo:	R\$ 5.066.684,36	R\$ 5.441.932,11	R\$ 5.814.464,88	R\$ 6.184.301,66	R\$ 6.551.461,33
Fluxo Descontado:	R\$ 2.903.299,01	R\$ 3.052.863,54	R\$ 3.193.525,16	R\$ 3.325.813,58	R\$ 3.450.227,03

Tabela 4.25: Fluxo de caixa - Payback Descontado caso 2 (Parte 5).

	Ano 21	Ano 22	Ano 23	Ano 24	Ano 25
Investimento Inicial:					
Geração (kWh):	492.180,83	488.735,56	485.314,41	481.917,21	478.543,79
Tarifa (R\$/kWh):	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77	R\$ 0,77
Receitas:	R\$ 377.108,95	R\$ 374.469,19	R\$ 371.847,90	R\$ 369.244,97	R\$ 366.660,25
Despesas O&M:	-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65	-R\$ 12.607,65
Resultado Líquido:	R\$ 364.501,30	R\$ 361.861,54	R\$ 359.240,25	R\$ 356.637,32	R\$ 354.052,60
Saldo:	R\$ 6.915.962,63	R\$ 7.277.824,16	R\$ 7.637.064,41	R\$ 7.993.701,73	R\$ 8.347.754,33
Fluxo Descontado:	R\$ 3.567.234,09	R\$ 3.677.275,47	R\$ 3.780.765,67	R\$ 3.878.094,53	R\$ 3.969.628,70

4.4.4 Análises de Retorno do Investimento

Para essa subseção serão calculados os métodos de retorno de investimento, a fim de evidenciar a viabilidade econômica de cada situação de projeto.

4.4.4.1 Caso 1

Tabela 4.26: Resultados obtidos das análises de retorno do investimento - Caso 1.

Análises ROI - Caso 1	
TMA:	5,56%
VPL:	R\$ 618.325,76
TIR:	37,11%
ROI:	2,70

Para o sistema de potência 60,63 kWp, com investimento inicial de R\$ 183.708,90, tem-se um VPL de R\$ 618.325,76, representando um retorno de quase 300%. A TIR calculada é muito maior que a TMA definida para análise, definindo o projeto analisado como viável. E por fim, o ROI indica que para cada R\$ 1,00 investido, o retorno será de R\$ 2,70, ou aproximadamente 270%, no final do período de 25 anos. E como observado no fluxo de caixa do caso 1, o tempo de retorno do investimento será de 2 anos e 5 meses.

4.4.4.2 Caso 2

Tabela 4.27: Resultados obtidos das análises de retorno do investimento - Caso 2.

Análises ROI - Caso 2	
TMA:	5,56%
VPL:	R\$ 3.592.646,07
TIR:	32%
ROI:	2,15

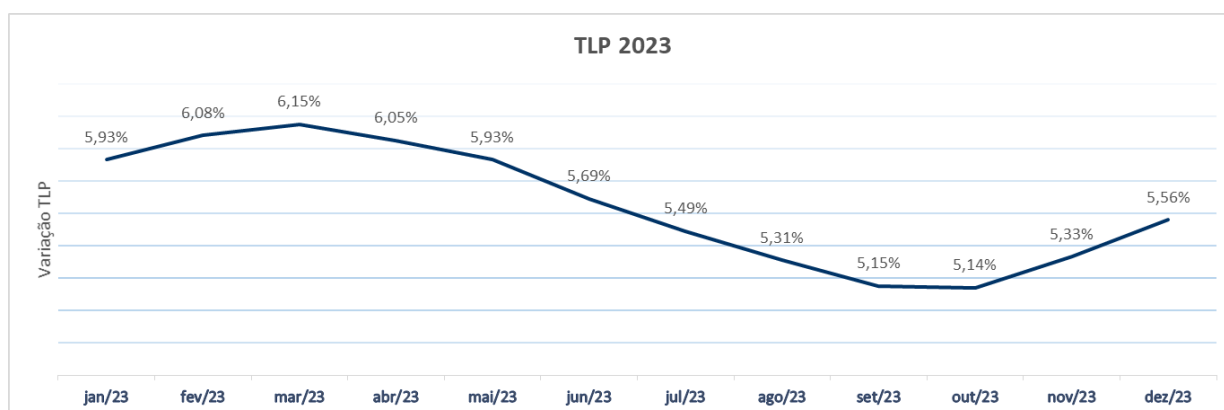
Para o sistema de potência 367,57 kWp, com investimento inicial de R\$ 1.260.765,10, tem-se um VPL de R\$ 3.592.646,07, representando um retorno de quase 400%. A TIR calculada é muito maior que a TMA definida para análise, definindo o projeto analisado como viável. E por fim, o ROI indica que para cada R\$ 1,00 investido, o retorno será de R\$ 2,15, ou aproximadamente 215%, no final do período de 25 anos. E como observado no fluxo de caixa do caso 2, o tempo de retorno do investimento será de 2 anos e 8 meses.

4.4.5 Análise de Sensibilidade

Para a observação da sensibilidade das variáveis necessárias para a viabilidade do investimento utiliza-se os dados abaixo presentes nos gráficos.

Utilizando o histórico (BNDES, 2023) para a TLP no ano de 2023, obteve-se a seguinte variação:

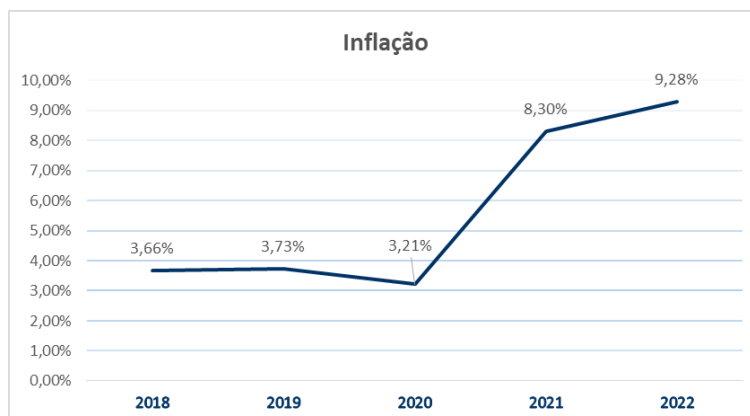
Figura 4.14: Variação da TLP para a definição da TMA.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para a inflação utilizou-se os dados dos últimos 5 anos registrados no (Dados Mundiais, 2023). A variação estabelecida encontra-se na figura 4.15.

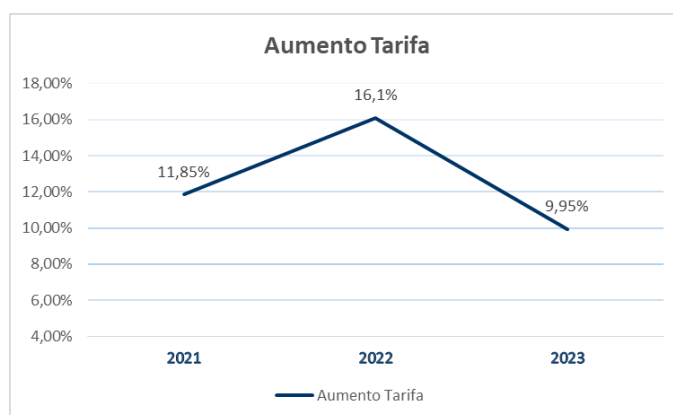
Figura 4.15: Variação da Inflação.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na definição do aumento tarifário utilizou-se os registos (Neoenergia, 2023), (ANEEL, 2022) e (ANEEL, 2021). Para uma análise mais coerente definiu-se como padrão um aumento de 4,25% da tarifa para o primeiro ano e uma redução de 6,15% para o ano seguinte, sendo considerado para os 25 anos de análise. A verificação do padrão pode ser identificada na figura 4.16.

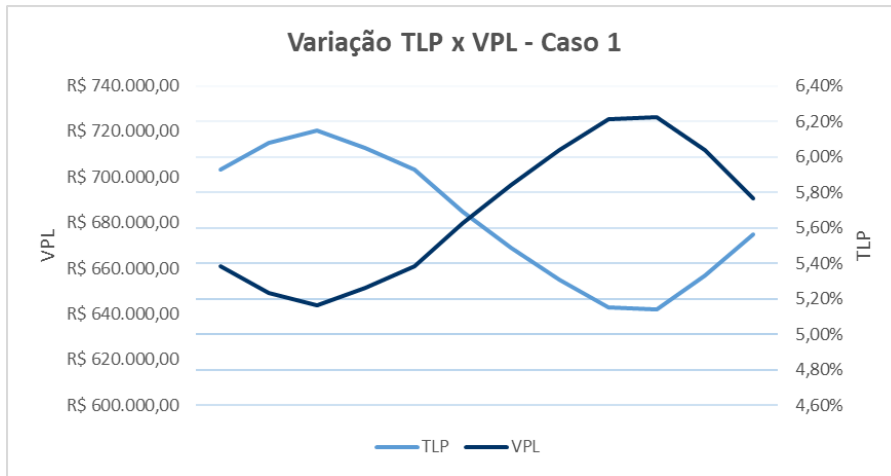
Figura 4.16: Variação do Aumento Tarifário.



Fonte: Elaborado pela autora.

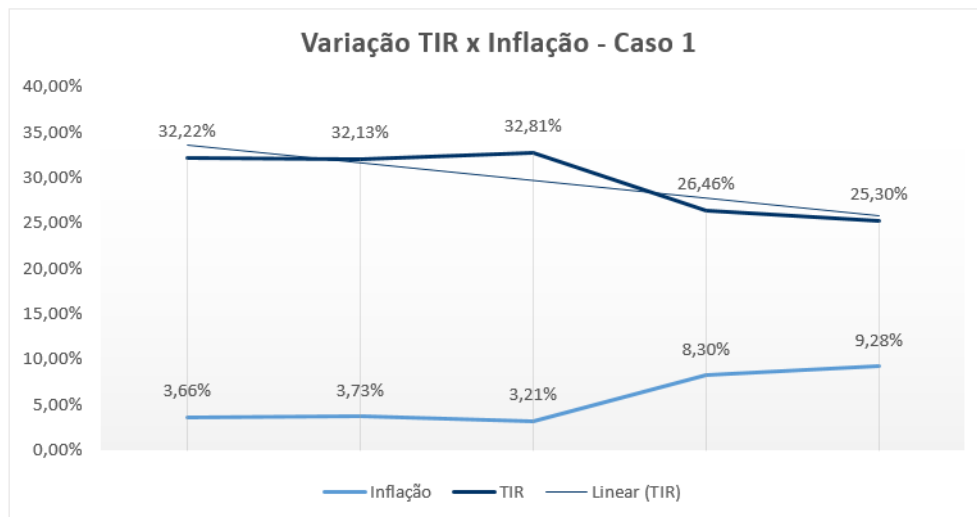
4.4.5.1 Caso 1

Figura 4.17: Projeção da variação do VPL à TLP - Caso 1.



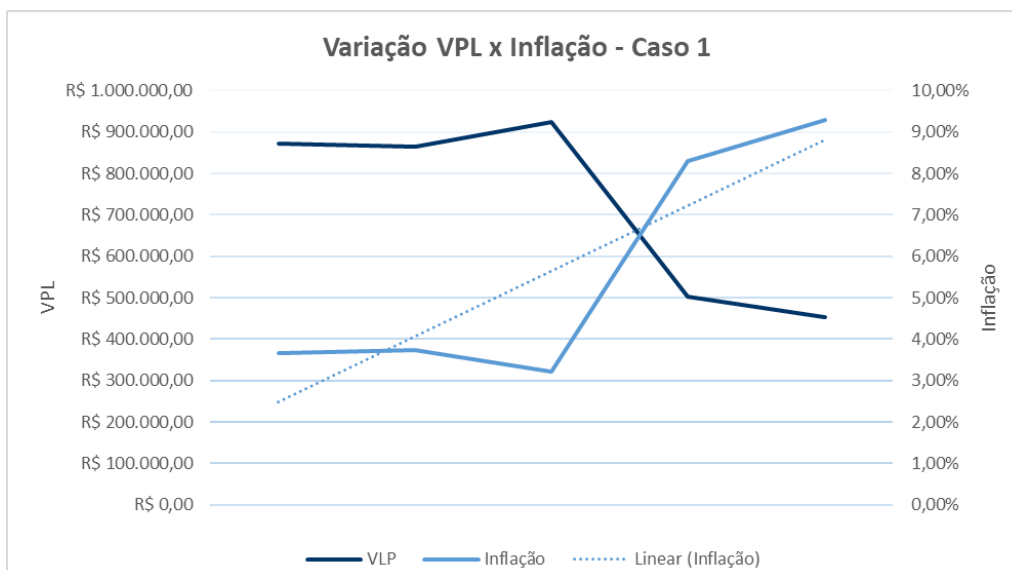
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.18: Projeção da variação da TIR à Inflação - Caso 1.



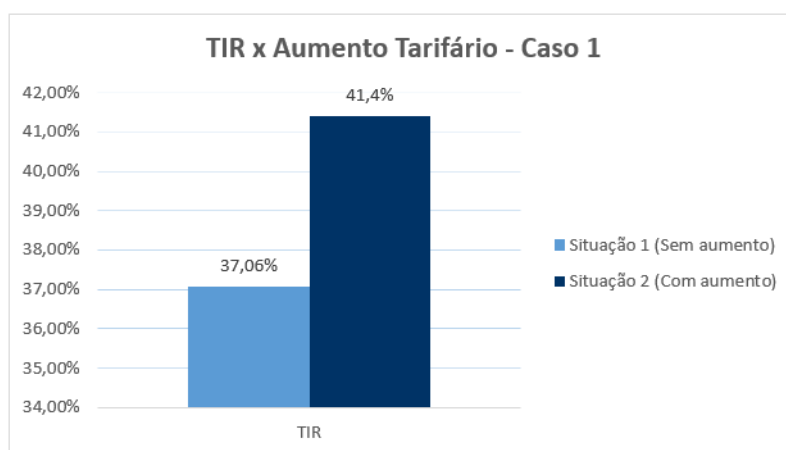
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.19: Projeção da variação do VPL à Inflação - Caso 1.



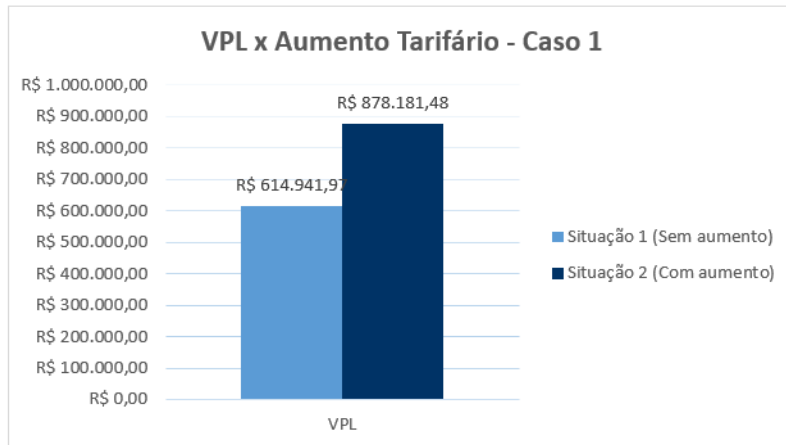
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.20: Projeção da variação da TIR ao Aumento Tarifário - Caso 1.



Fonte: Elaborado pela autora.

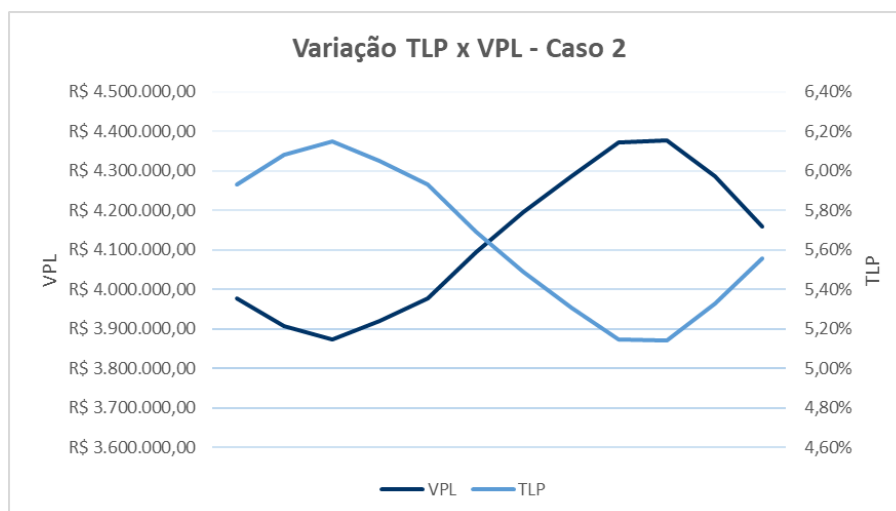
Figura 4.21: Projeção da variação do VPL ao Aumento Tarifário - Caso 1.



Fonte: Elaborado pela autora.

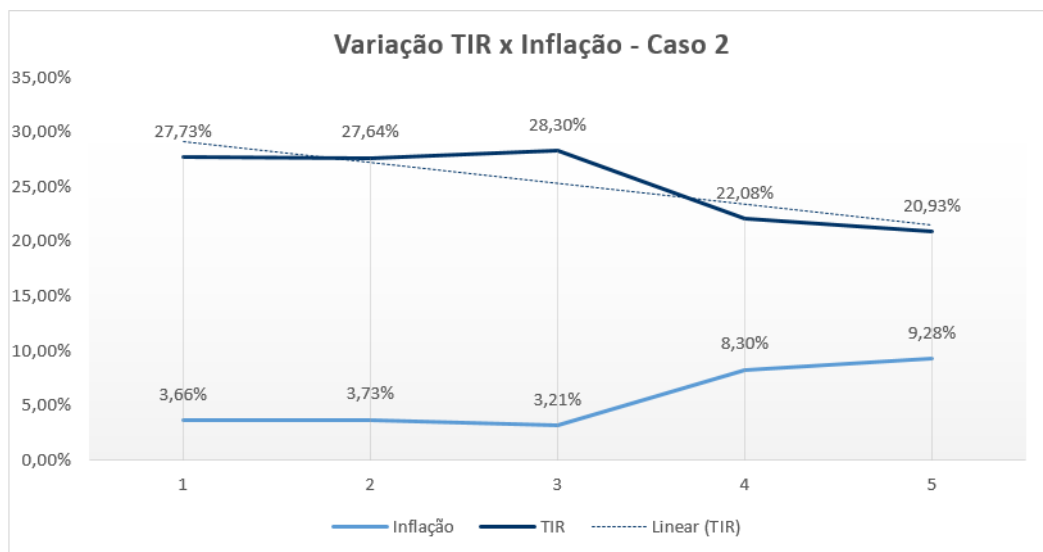
4.4.5.2 Caso 2

Figura 4.22: Projeção da variação do VPL à TLP - Caso 2.



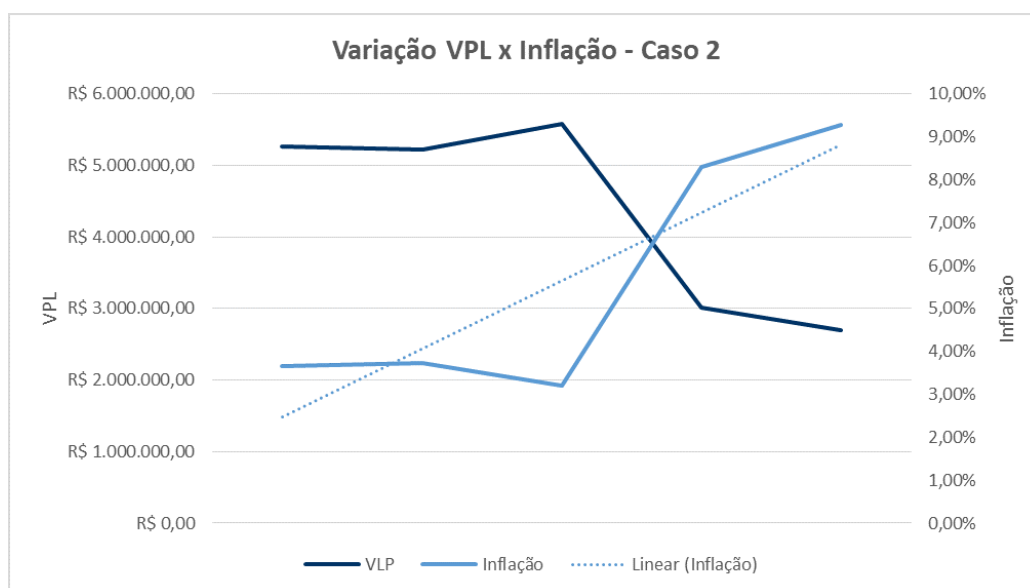
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.23: Projeção da variação da TIR à Inflação - Caso 2.



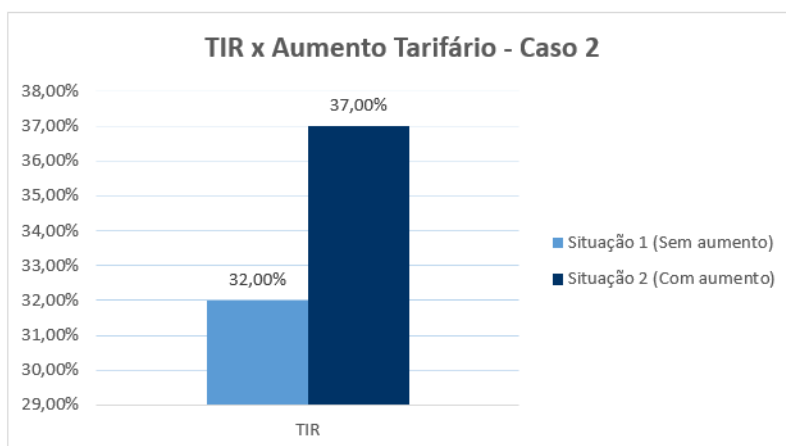
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.24: Projeção da variação do VPL à Inflação - Caso 2.



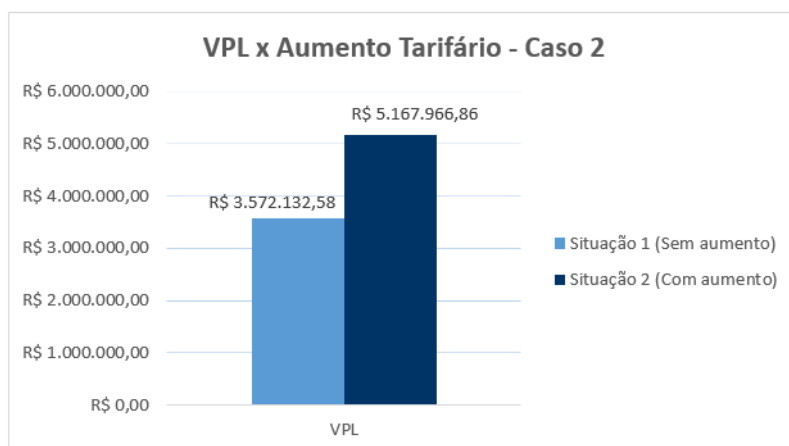
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.25: Projeção da variação da TIR ao Aumento Tarifário - Caso 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.26: Projeção da variação do VPL ao Aumento Tarifário - Caso 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.4.5.3 Considerações Sensibilidade

É possível observar as mesmas conclusões para ambos os casos. Acerca da Taxa Mínima de Atratividade (TMA), é possível observar que quanto maior for a taxa de longo prazo (TLP), menor é o Valor Presente Líquido (VPL), e vice-versa, quando menor a TLP, maior é o VPL do projeto. O que corresponde à equação 3.18, utilizada no cálculo do VPL.

O mesmo comportamento pode ser verificado na variação da inflação, para uma inflação alta tem-se um VPL e uma Taxa Interna de Retorno (TIR) baixa, possuindo o comportamento inverso para uma inflação baixa. O resultado parte do princípio de que uma inflação elevada, implica em custos mais altos para execução do investimento.

Para a avaliação do aumento tarifário não observou-se uma diferença significativa, devido

à quantidade de dados que representam apenas um aumento da tarifa, seguida de uma redução na mesma. Porém, é de conhecimento geral que a medida que a tarifa aumenta o projeto se torna mais viável, uma vez que os custos que seriam empregados no consumo de energia elétrica convencional são diluídos no investimento do sistema fotovoltaico. Nesse caso, há um aumento no VLP e na TIR, e uma diminuição no tempo de retorno do investimento.

Por fim, conclui-se que ambos os projetos desenvolvidos para os dois casos, são vantajosos e possuem tempos similares de retorno do investimento.

4.4.6 LCOE

Para o desenvolvimento do cálculo para ambos os casos, considerou-se a vida útil de 25 anos e uma taxa de desconto de 5,56% considerando a TMA publicada em Dezembro de 2023 (BNDES, 2023).

No caso 1, utilizou-se o Capex de R\$ 183.708,90, o Opex de 1%, totalizando R\$ 1.837,09 e sua geração de energia durante 1 ano de 96.323,28 kWh, que em 25 anos será de aproximadamente 2.408,08 MWh, adotando uma perda de 6% de eficiência dos módulos. A partir da equação 3.20, obteve-se o seguinte resultado:

$$\text{LCOE} = \frac{183.708,90 + 1.837,09}{2.408.082} = 0,08 \text{ R\$/kWh}$$

Para o caso 2, utilizou-se o Capex de R\$ 1.260.765,10, o Opex de 1%, totalizando R\$ 12.607,65 e sua geração de energia durante 1 ano de 583.939,68 kWh, que em 25 anos será de aproximadamente 14.598,49 MWh, adotando uma perda de 6% de eficiência dos módulos. A partir da equação 3.20, obteve-se o seguinte resultado:

$$\text{LCOE} = \frac{1.260.765,10 + 12.607,65}{14.598.492} = 0,09 \text{ R\$/kWh}$$

4.5 REQUISITOS AMBIENTAIS DO PROJETO

4.5.1 Mitigação de Emissões de Carbono

Para definir as emissões de CO₂ de um SFV, utilizou-se a Figura 7.6 do AR5 elaborado pelo IPCC, que registra as emissões comparativas de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida oriundas da eletricidade gerada por diferentes tecnologia disponíveis atualmente (IPCC, 2014).

Tem-se então, os dados de emissão de carbono do sistema fotovoltaico, que representa menos do que 0,05 kg de CO₂/kWh. Logo, para o caso 1 que possui um consumo médio de 8.026,94 kWh, temos a emissão de 401 kg de CO₂ por mês e 4.816 kg CO₂ por ano. Para o caso 2 que possui um consumo médio de 48.661,64 kWh, tem-se a emissão de 2.433 kg de CO₂ por mês e

29.197 kg de CO₂ por ano. Sendo a emissão de CO₂ produzida apenas nos primeiros anos de operação, mais precisamente até o segundo ano de existência dos painéis, considerando que no terceiro ano a maioria dos módulos se tornam neutros em emissões (Elets News Network, 2023).

Estabelecendo o comparativo com a emissão de CO₂ derivada da geração de energia elétrica no SIN, utilizou-se os dados registrados até Outubro para emissão da eletricidade do SIN para fins de projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Desse modo obteve-se os seguintes fatores de emissão médios para 2023 (MCTI 2023).

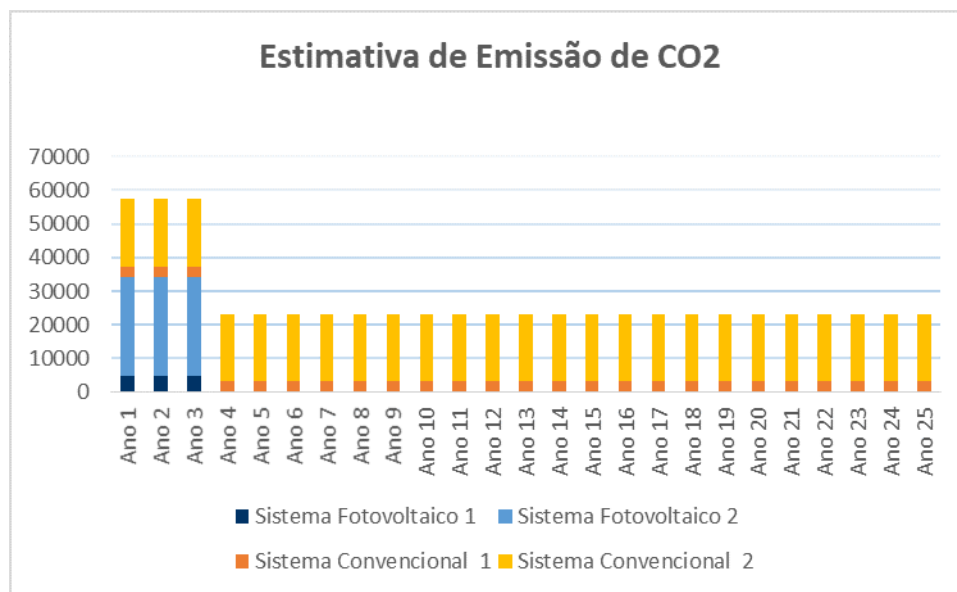
Tabela 4.28: Fatores de Emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no SIN.

Ano 2023	
Meses	Fator Médio (tCO ₂ /MWh)
01/2023	0,0292
02/2023	0,0238
03/2023	0,0296
04/2023	0,034
05/2023	0,0295
06/2023	0,0528
07/2023	0,0495
08/2023	0,0419
09/2023	0,0343
10/2023	0,0387
Média	0,03415

Fonte: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Fatores de emissão MDL/SIN (MCTI 2023).

Considerando o consumo médio do caso 1, e utilizando a média do fator de emissão, sendo o valor de 0,03415 kgCO₂/kWh, tem-se uma estimativa de 274 kg de CO₂ emitidos por mês e 3.289 kg de CO₂ por ano. Do mesmo modo, utilizando a média de consumo para o caso 2, tem-se uma estimativa de 1662 kg de CO₂ emitidos por mês e 19.942 kg de CO₂ por ano.

Figura 4.27: Estimativa de emissão de CO₂ ao longo de 25 anos para o sistema fotovoltaico e o sistema convencional.



Fonte: Elaborado pela autora.

Trazendo uma análise geral da emissão total de ambos os sistemas tem-se os seguintes dados:

Tabela 4.29: Estimativa de Emissão de CO₂ ao longo de 25 anos.

Tipo de sistema	Emissão Total em 25 anos (kg de CO ₂)
Sistema Fotovoltaico 1	14.448
Sistema Fotovoltaico 2	87.591
Sistema Convencional 1	82.236
Sistema Convencional 2	498.539

Como resultado tem-se uma redução de aproximadamente 82,4% na emissão de CO₂ para ambas as situações de projeto. Sendo importante ressaltar que o fator de emissão de CO₂ considerado pelo SIN, apresenta outras fontes de energia renováveis, então, em casos comparativos com outros países que apresentem uma matriz energética mais poluente, essa redução pode ser ainda mais expressiva.

Considerando as emissões totais em GEE do DF em 2018 que representam cerca de 9.518.762 tCO₂, tem-se aproximadamente 4.569.005 tCO₂ referente ao setor de energia. É de conhecimento geral que a maior parte da emissão do setor de energia refere-se a frota de veículos do DF, ainda assim, é de interesse do governo federal tornar a geração de energia elétrica 100% renovável até 2030. Desse modo, será levantado a contribuição da implementação de sistemas fotovoltaicos em todas as escolas do públicas do Distrito Federal, visando alcançar as metas estipuladas pelo Plano de Mitigação Federal (SEMA-DF 2021).

Adotou-se como padrão o arranjo fotovoltaico para o caso 1, que corresponde a uma potência

de 60,63 kWp, sendo utilizados 111 painéis solares de dimensão 2,261m x 1,134m, conforme consta no *datasheet* do módulo escolhido. No total, estima-se que a área mínima necessária para a instalação do sistema solar, seja de aproximadamente 285m².

A rede pública de ensino do DF, conta com 827 escolas, separadas pelas seguintes classificações de acordo com (SEEDF, 2023):

- **Jardim de Infância:** 1º e 2º períodos;
- **Centro de Ensino Infantil:** 1º e 2º períodos;
- **Centro de Atenção Integral à Criança:** Ensino infantil e anos iniciais do fundamental;
- **Escola Parque:** Contraturno;
- **Escola Classe:** Ensino fundamental anos iniciais;
- **Centro de Ensino Fundamental:** Ensino fundamental anos iniciais e/ou finais;
- **Centro Educacional:** Ensino fundamental e médio;
- **Centro de Ensino Médio:** 1ª, 2ª e 3ª série; e
- **Centro de Ensino Especial:** Etapas de 1 a 4.

Sabe-se que o CEM02 possui uma área atípica, se comparada com as demais escolas do estado, porém, como se trata de uma estimativa, será considerado que a rede de ensino do DF possui o mesmo padrão de consumo energético e dispõe da área mínima necessária para instalação do projeto fotovoltaico dimensionado.

A partir das considerações é possível concluir que, o Distrito Federal como um todo possui uma área de 191 hectares disponível em suas escolas para implementação de um sistema fotovoltaico de 60,63 kWp. O que implica numa geração total de aproximadamente 41 MWp e numa redução de 56.461 tCO₂, se comparada com o sistema convencional de geração de energia elétrica, representando uma contribuição de 1,24% na emissões totais de GEE registradas em 2018 para o DF.

Porém, apesar da contribuição ser mínima, é possível garantir em 82% o alcance da meta do DF, referente a instalação de painéis solares com potência instalada de 50 MW, estipulada até o ano de 2025.

5 CONCLUSÃO

Partindo da situação global no que tange as mudanças climáticas, o presente trabalho buscou explorar uma análise técnica, econômica e ambiental acerca da implementação de um sistema fotovoltaico em uma escola de ensino médio do Distrito Federal, que visa promover contribuições para o Plano de Mitigação Distrital.

As análises realizadas tiveram como objetivo, viabilizar a execução imediata do sistema solar na escola modelo. Desse modo, foram detalhados minuciosamente os requisitos técnicos solicitados pela concessionária local para aprovação do projeto, assim como, os requisitos relacionados a instalação do arranjo fotovoltaico e as adequações determinadas pelas normas vigentes. Para a viabilização, foi estudado os impactos econômicos pertinentes aos componentes do sistema, sendo projetados diversos cenários para garantir a confiabilidade da análise. Por fim, visando alcançar o objetivo principal de reduzir as emissões de carbono, realizou-se a análise ambiental estabelecendo uma comparação entre a geração fotovoltaica e a geração de energia pelos métodos convencionais e a suas emissões atreladas.

O foco principal além de abordar a mitigação do CO₂, aborda requisitos educacionais que podem ser estabelecidos na comunidade escolar, atrelados à crescente necessidade por fontes de energia mais limpa e sustentável, para reverter a situação climática na qual o mundo está inserido. É importante ressaltar que, a todo momento foi considerado de extrema importância o desenvolvimento da consciência ambiental entre alunos e a comunidade escolar, para que assim o quadro atual possa ser revertido de forma mais significativa.

As duas situações de projeto descritas no estudo foram utilizadas para evidenciar os impactos econômicos e ambientais pertinentes ao sistema fotovoltaico. Frisando que o projeto inicial a ser executado será o caso 1, e que para o segundo caso seria um estudo para futuros investimentos.

Para o arranjo do sistema 1, tem-se o agrupamento de 111 módulos, sendo utilizado dois inversores *On-Grid* no sistema, com três strings contendo 18 e 19 módulos cada, promovendo uma geração anual de 96.323,28 kWh. Para o arranjo do sistema 2, tem-se o agrupamento de 669 módulos, sendo utilizados 7 inversores *On-Grid* no sistema, com 5 strings contendo 19 e 20 módulos cada, promovendo uma geração anual de 583.939,68 kWh.

O custo de implementação de ambos os projetos possui um *payback* de aproximadamente três anos, o que salienta a viabilidade do investimento, demonstrando a sua alta atratividade. Importante frisar que o custo médio adotado para definição do investimento foi baseado no estudo realizado pela *Greener*, sendo assim, pode apresentar uma diferença significativa com os preços atuais do mercado. Dessa forma, aplicou-se os cenários otimistas e pessimistas que pudessem garantir uma análise de sensibilidade adequada.

Entendendo a dificuldade de uma instituição de ensino público em executar projetos com um custo elevado, pensou-se em formas de conceber esse investimento. O método encontrado para

a execução, seria o investimento por parte de empresas do terceiro setor, que possuem um fundo de verbas para execução de projetos sustentáveis, o que configuraria como uma iniciativa de alto interesse do governo.

Através da análise ambiental, aborda-se mais um ponto de convencimento para a viabilização de projetos desse porte. Utilizando o CEM02 como modelo a ser replicado para as demais escolas do DF, tem-se uma contribuição significativa para as metas estipuladas no plano de mitigação do governo, que visa implementar 50 MW de carga instalada através de painéis fotovoltaicos, garantindo um passo rumo a transição energética garantindo um uso de 100% das energias renováveis.

A análise ambiental, ainda demonstra uma porcentagem muito baixa acerca da contribuição geral do projeto para as emissões totais do DF, o que é esperado dada a complexidade da temática. Por mais que, o objetivo inicial seja zerar as emissões de carbono, existem detalhes que não serão englobados em toda estimativa. Garantir o carbono zero é um dos maiores desafios da humanidade, porém, não buscar alternativas para sair da inércia pode se configurar como uma ação de alto risco para as futuras gerações.

Por fim, é necessário reafirmar a importância voltada não apenas para implementação do sistema fotovoltaico, mas também para a necessidade de ações locais acerca do enfrentamento dos desafios globais relacionados as mudanças climáticas. A escola modelo, deve se tornar um exemplo para que mais iniciativas sustentáveis sejam desenvolvidas no ambiente escolar, visando proporções cada vez mais escaláveis, agindo diretamente na redução da emissão de carbono e também na promoção da educação ambiental no ambiente escolar.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de enriquecer o estudo e enfatizar a importância de contribuições desse segmento, destacam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Estudo de eficiência energética na escola modelo, que não foi possível pois a escola desse estudo estava realizando uma reforma nas instalações elétricas durante o desenvolvimento desse estudo;
- Estudo da implementação de projetos educacionais em paralelo com a execução do projeto;
- Estudo de automação no ar condicionado;
- Estudo aprofundado acerca do aterramento elétrico necessário para proteção adequada do SFV;
- Estudo detalhado referente aos demais componentes de uma minigeração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL 2012 ANEEL. *Resolução ANEEL nº 482/2012*. 2012. Acesso em: 09/11/2023. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>.

ANEEL, 2021 ANEEL., *ANEEL define índice para novas tarifas da Brasília*. 2021. Acesso em: 25/11/2023. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/web/brasil/w/aneel-define-indice-novas-tarifas-neoenergia-brasil>>.

ANEEL, 2021 ANEEL., *Documento ANEEL*. 2021. Acesso em: 25/10/2023. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>>.

ANEEL, 2022 ANEEL., *ANEEL aprova reajuste tarifário anual da Brasília*. 2022. Acesso em: 25/11/2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/aneel-aprova-reajuste-tarifario-anual-da-brasil>>.

Balfour 2016 BALFOUR, J. *Introdução ao Projeto de Sistemas Fotovoltaicos*. RJ (Rio de Janeiro): LTC, 2016.

BNDES, 2023 BNDES., *Histórico da Parcela Fixa da TLP*. 2023. Acesso em: 25/11/2023. Disponível em: <[https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/custos-financeiros/historico-da-parcela-fixa-da-tlp!/ut/p/z0/hY49j4JAEIZ_iwUlmfXjvFgSY7gYiLG5cNuYcVlgTphFdIDv3x8YCyst3yfvF2jIQDNeqEQhx1gP-kcvD5_7eP0VLabJbrObqX2cfC_T1XYezz9gC_q1YWiYdek6LUG3KfVIXDjIKvLiOjIuzDFssTO2xrCgG45a6naM0e_5rCPQxrHYm0B25Nz6A7EXkt7cDwaqco0NVEGMBAgby-J8oMqexr4nGCjTD5v-QS11o-_tj_akj3_XaPIPEYLBVg!/>](https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/custos-financeiros/historico-da-parcela-fixa-da-tlp!/ut/p/z0/hY49j4JAEIZ_iwUlmfXjvFgSY7gYiLG5cNuYcVlgTphFdIDv3x8YCyst3yfvF2jIQDNeqEQhx1gP-kcvD5_7eP0VLabJbrObqX2cfC_T1XYezz9gC_q1YWiYdek6LUG3KfVIXDjIKvLiOjIuzDFssTO2xrCgG45a6naM0e_5rCPQxrHYm0B25Nz6A7EXkt7cDwaqco0NVEGMBAgby-J8oMqexr4nGCjTD5v-QS11o-_tj_akj3_XaPIPEYLBVg!/)

CEBRI 2023 CEBRI. *Relatório Final do Plano Tecnológico de Energia (PTE)*. 2023. Acesso em: 23/10/2023. Disponível em: <https://www.cebri.org/media/documentos/arquivos/PTE_RelatorioFinal_PT_Digital_.pdf>.

Cobrecom 2020 COBRECOM. *Cobrecom: Cabos Elétricos para Instalações Fotovoltaicas*. [S.l.: s.n.], 2020. <<https://revistapotencia.com.br/wp-content/uploads/2020/04/Livro-Cobrecom-Cabos-el%C3%A9tricos-para-instala%C3%A7%C3%B5es-fotovoltaicas-revis%C3%A3o-1.pdf>>. Revisão 1.

CONFAZ 2015 CONFAZ. *Convênio do CONFAZ*. 2015. Acesso em: 16/10/2023. Disponível em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2015/CV016_15>.

CRESESB 2014 CRESESB. *Manual de Engenharia Fotovoltaica*. [S.l.], 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>.

Dados Mundiais, 2023 Dados Mundiais., *Taxa de Inflação no Brasil*. 2023. Acesso em: 25/11/2023. Disponível em: <<https://www.dadosmundiais.com/america/brasil/inflacao.php?text=A%20taxa%20de%20infla%C3%A7%C3%A3o%20para,287%2C1%25%20ao%20ano.>>

Decreto nº 26.974, de 04 de julho de 2006 DECRETO nº 26.974, de 04 de julho de 2006. <<https://www.fazenda.df.gov.br/aplicacoes/legislacao/legislacao/TelaSaidaDocumento.cfm?txtNumero=26974&txtAno=2006&txtTipo=6&txtParte=>>. Acesso em: [16/11/2023].

Ecori, 2023 Ecori., *Manual de Montagem Usina de Solo Monoposte*. 2023. Acesso em: 02/12/2023. Disponível em: <<https://www.ecorienergiasolar.com.br/assets/uploads/711c9-manual-de-montagem-usina-de-solo-monoposte.pdf>>.

Elets News Network, 2023 Elets News Network,. *KMRL's Solar Revolution Pioneers Green Transit Solutions*. 2023. Acesso em: 10/12/2023. Disponível em: <<https://egov.eletsonline.com/2023/12/kmrls-solar-revolution-pioneers-green-transit-solutions/#:~:text=Solar%20panels%20emit%20around%2050g,of%20coal%2Dpowered%20electricity%20sources>>.

FAPESP 2023 FAPESP, A. *Climate Change May Affect 40* Acesso em: 29/11/2023. Disponível em: <<https://agencia.fapesp.br/climate-change-may-affect-40-of-biodiversity-in-semi-arid-portion-of-brazils-northeast-by-2060/44876#:~:text=Climate%20change%20may%20affect%2040,of%20Brazil's%20Northeast%20by%202060&text=The%20main%20impacts%20for%20the,the%20overall%20number%20of%20species>>.

GDF 2012 GDF. *Lei nº 4.797, de 06 de março de 2012*. 2012. Acesso em: 02/11/2023. Disponível em: <https://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/70740/Lei_4797_06_03_2012.html>.

GDF 2019 GDF. *Lei nº 6.274/2019*. 2019. Acesso em: 07/10/2023. Disponível em: <https://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/94ea3900f6534f5eb2388977c782dda9/Lei_6274_27_02_2019.html>.

GDF 2019 GDF. *Plano Estratégico do Distrito Federal*. 2019. Acesso em: 01/10/2023. Disponível em: <https://www.cg.df.gov.br/wp-conteudo/uploads/2019/06/01.Book_PEDF.pdf>.

Global Forest Watch, 2023 Global Forest Watch,. *Fires in Brazil Dashboard*. 2023. Acesso em: 07/11/2023. Disponível em: <<https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/BRA/?category=fires>>.

Greener 2023 GREENER. *Estudo Estratégico Geração Distribuída - Setembro 2023*. 2023. Dados do 1º Semestre 2023. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-geracao-distribuida-setembro-2023-dados-do-1o-semester-2023/>>.

GUIMARÃES 2023 GUIMARÃES, L. D. S. *O CUSTO NIVELADO DA ELETRICIDADE E SEU IMPACTO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA*. 2023. Documento online. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/coluna_opinioa_-_transicao_energetica.pdf>.

IBGE 2022 IBGE. *Censo 2022 - Panorama*. 2022. Acesso em: 24/10/2023. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?utm_source=ibge&utm_medium=home&utm_campaign=portal>.

IEMA 2022 IEMA. *COP27: Brasil está se distanciando das suas metas propostas ao Acordo de Paris*. 2022. Acesso em: 15/10/2023. Disponível em: <<https://energiaambiente.org.br/cop27-brasil-esta-se-distanciando-das-suas-metas-propostas-ao-acordo-de-paris-20221110>>.

INMET 2023 INMET. *Temperatura Média Atinge Recorde no Brasil pelo Quarto Mês Seguido*. 2023. Acesso em: 13/10/2023. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/noticias/temperatura-m%C3%A9dia-atinge-recorde-no-brasil-pelo-quarto-m%C3%AAs-seguido>>.

IPCC, 2014 IPCC,. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. 2014. Acesso em: 05/11/2023. Disponível em: <https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter7.pdf>.

IPCC 2023 IPCC. *Relatório Mais Longo sobre Mudanças Climáticas 2023*. 2023. Acesso em: 29/11/2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf>.

IPEA, 2023 IPEA,. *Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13*. 2023. Breve descrição ou acesso a ser fornecido. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/ods/ods13.html>>.

IPEA, 2023 IPEA,. *Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 17*. 2023. Breve descrição ou acesso a ser fornecido. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/ods/ods17.html>>.

IPEA, 2023 IPEA,. *Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 4*. 2023. Breve descrição ou acesso a ser fornecido. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/ods/ods4.html>>.

IPEA, 2023 IPEA,. *Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7*. 2023. Breve descrição ou acesso a ser fornecido. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/ods/ods7.html>>.

MCTI 2017 MCTI. *Acordo de Paris e NDC - Contribuições Nacionalmente Determinadas*. 2017. Acesso em: 10/11/2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf>.

MCTI 2023 MCTI. *Estudo do INPE aponta que Brasil tem áreas até 3°C mais quentes*. 2023. <<https://adaptabrasil.mcti.gov.br/noticia/estudo-do-inpe-aponta-que-brasil-tem-areas-ate-3degc-mais-quentes>>. Acesso em: 15/11/2023.

MCTI 2023 MCTI. *Fatores de Emissão*. 2023. Acesso em: Data de Acesso. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>>.

MMA, 2023 MMA,. *Agenda 21*. 2023. Breve descrição ou acesso a ser fornecido. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21.html>>.

MMA, 2023 MMA,. *Carta da Terra*. 2023. Breve descrição ou acesso a ser fornecido. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/educacao-ambiental/pol%C3%ADtica-nacional-de-educa%C3%A7%C3%A3o-ambiental/documentos-referenciais/item/8071-carta-da-terra.html>>.

MMA, 2023 MMA,. *Fundo Nacional sobre Mudança do Clima*. 2023. Acesso em: 14/11/2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/acesso-a-informacao/apoio-a-projetos/fundo-nacional-sobre-mudanca-do-clima>>.

MME 2021 MME. *Relatório Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica - ProGD*. 2021. Acesso em: 14/10/2023. Disponível em: <<https://antigo.mme.gov.br/documents/20182/6dac9bf7-78c7-ff43-1f03-8a7322476a08>>.

MME 2023 MME. *Balanco Energetico Nacional 2023*. 2023. Acesso em: 18/10/2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/balanco-energetico-nacional/ben-2023/relatorio-final/ben2023.pdf/view>>.

Neoenergia, 2023 Neoenergia,. *Reajuste e Revisão Tarifária*. 2023. Acesso em: 28/11/2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/novas-tarifas-da-neoenergia-brasilia-sao-aprovadas-pela-aneel>>.

Oliveira 2023 OLIVEIRA, G. G. *Dimensionamento e Viabilidade Econômica de uma Minigeração Solar Fotovoltaica de 595 kW*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, 2023.

ONU 2015 ONU. *Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. 2015. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>>.

RIBEIRO 2015 RIBEIRO, M. R. *Conexão de um Sistema Solar Fotovoltaico na Rede de Distribuição de Energia Elétrica*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

SEEDF, 2023 SEEDF, 2023. Acesso em: 10/12/2023. Disponível em: <<https://www.educacao.df.gov.br/escolas-e-estudantes/>>.

SEMA-DF 2016 SEMA-DF. *Nota Técnica: Mudanças Climáticas no DF e RIDE*. 2016. Acesso em: 21/11/2023. Disponível em: <<https://www.sema.df.gov.br/wp-content/uploads/2017/09/Nota-T%C3%A9cnica-Mudan%C3%A7as-Clim%C3%A1ticas-no-DF-e-RIDE.pdf>>.

SEMA-DF 2021 SEMA-DF. *Inventário Clima e-book - Final*. 2021. Acesso em: 22/10/2023. Disponível em: <<https://www.sema.df.gov.br/wp-conteudo/uploads/2022/06/INVENTARIO-CLIMA-E-BOOK-FINAL.pdf>>.

SEMA-DF 2021 SEMA-DF. *Plano de Mitigação e-book - Final*. 2021. Acesso em: 05/11/2023. Disponível em: <<https://www.sema.df.gov.br/wp-conteudo/uploads/2022/06/PLANO-DE-MITIGACAO-E-BOOK-FINAL.pdf>>.

SEMA-DF 2023 SEMA-DF. *Ações para Promoção de Energia Solar no DF*. 2023. Acesso em: 25/11/2023. Disponível em: <<https://www.sema.df.gov.br/acoes-para-promocao-de-energia-solar-no-df/>>.

SEMA-DF 2023 SEMA-DF. *Projeto CITINOVA: Planejamento Integrado e Tecnologias para Cidades Sustentáveis*. 2023. Acesso em: 05/10/2023. Disponível em: <<https://www.sema.df.gov.br/projeto-citinova-planejamento-integrado-e-tecnologias-para-cidades-sustentaveis/>>.

WRI 2023 WRI. *Mudanças Climáticas Alarmantes: Veja 5 Grandes Resultados do Relatório do IPCC*. 2023. Acessado em: 02/11/2023. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/mudancas-climaticas-alarmanetes-veja-5-grandes-resultados-do-relatorio-do-ipcc>>.

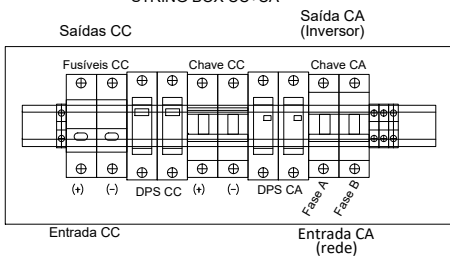
WWF 2016 WWF. *Potencial Solar para a Internet*. 2016. Acesso em: 07/11/2023. Disponível em: <https://wwfbrnew.awsassets.panda.org/downloads/wwf_potencial_solar_para_internet.pdf>.

WWF Brasil, 2023 WWF Brasil,. *Desenvolvimento Sustentável*. 2023. A definição mais aceita para desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/desenvolvimento_sustentavel/>.

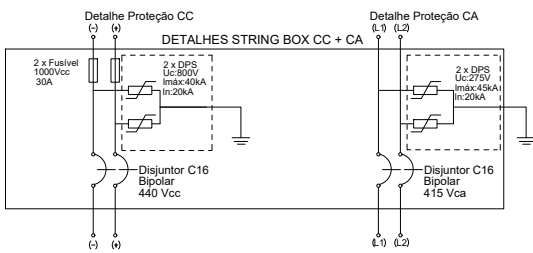
ANEXOS

A. DIAGRAMA UNIFILAR 1

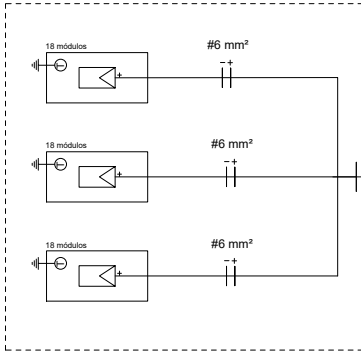
STRING BOX CC+CA



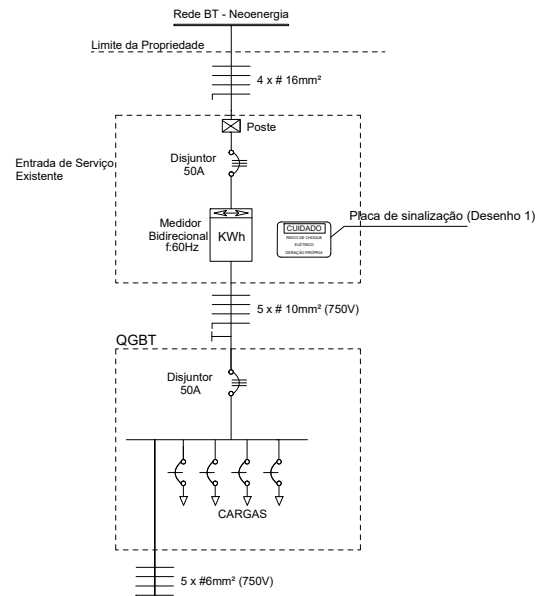
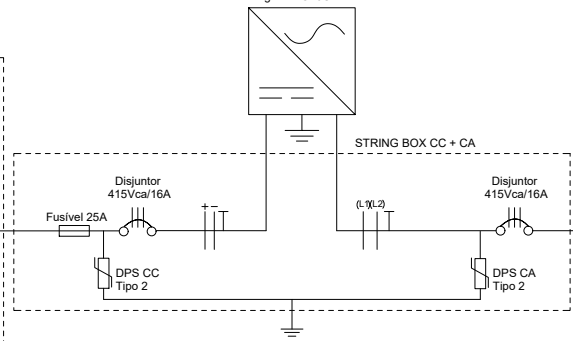
LEGENDA	
QGD	Quadro Geral de Distribuição
	Medidor Bidirecional
	Aterramento
	Dispositivo de Proteção Contra Surto
	Condutores: Positivo, Negativo e Proteção
	Condutores: Fase, Neutro e Proteção
	Disjuntor Trifásico
	Disjuntor Monofásico
	Módulo Fotovoltaico - 550 Wp
	Fusível 30A/1000V



18x Módulos e 19x Módulos FV CS6W-550.MS em série (550W Canadian Solar) 29,7 kWp - 31,35 kWp

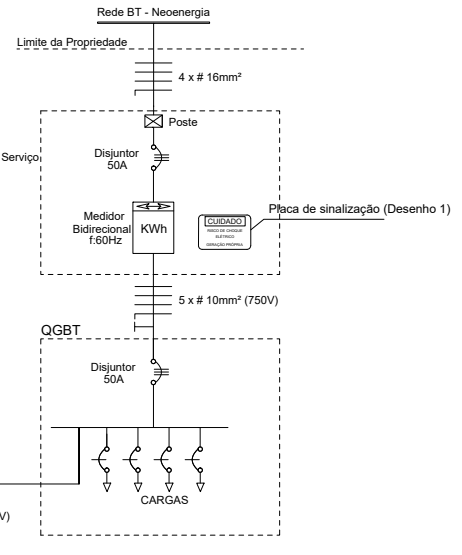
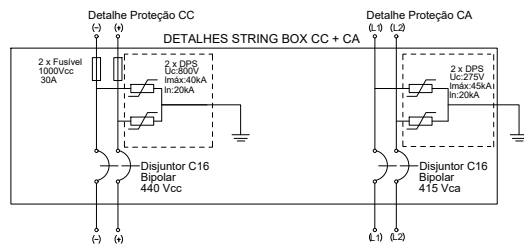
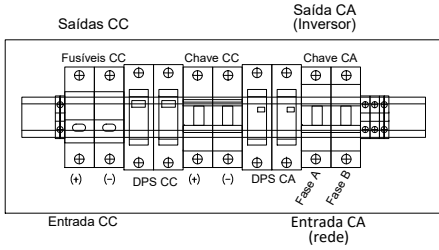


2 INVERSORES On-Grid 40kWp Sungrow SG40CX-P2

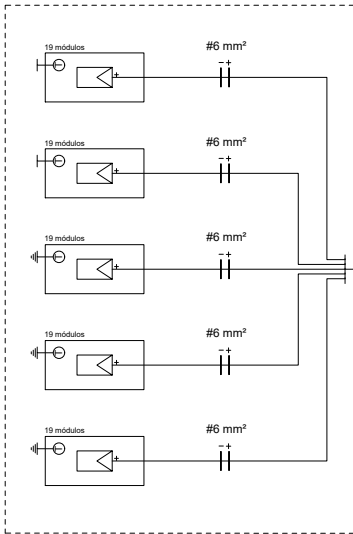


B. DIAGRAMA UNIFILAR 2

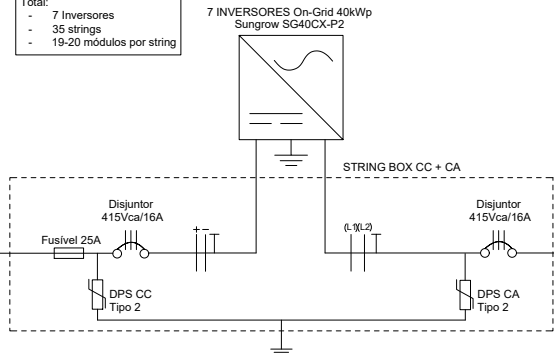
STRING BOX CC+CA



19x Módulos e 20x Módulos FV CS6W-550-MS em série (550W Canadian Solar) 10,45 kWp - 11,0 kWp



- Total:**
- 7 Inversores
 - 35 strings
 - 19-20 módulos por string



LEGENDA			
	Quadro Geral de Distribuição		Condutores: Fase, Neutro e Proteção
	Medidor Bidirecional		Disjuntor Trifásico
	Aterramento		Disjuntor Monofásico
	Dispositivo de Proteção Contra Surto		Módulo Fotovoltaico - 550 Wp
	Condutores: Positivo, Negativo e Proteção		Fusível 30A/1000V

C. SIMULAÇÃO PVSYST 1

PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: Simulação Caso 1

Variant: Nova variante da simulação

No 3D scene defined, no shadings

System power: 62.7 kWp

Ceilândia - CEM02 - Brazil

Author

Anne Caroline Ramos de Matos (Brazil)



Project: Simulação Caso 1

Variant: Nova variante da simulação

PVsyst V7.4.5

VC0, Simulation date:
10/01/24 08:31
with v7.4.5

Anne Caroline Ramos de Matos (Brazil)

Project summary

Geographical Site

Ceilândia - CEM02

Brazil

Situation

Latitude -15.81 °S
Longitude -48.11 °W
Altitude 1277 m
Time zone UTC-3

Project settings

Albedo 0.20

Meteo data

Ceilândia - CEM02

Meteonorm 8.1 (2008-2015), Sat=8% - Sintético

System summary

Grid-Connected System

No 3D scene defined, no shadings

PV Field Orientation

Fixed plane

Tilt/Azimuth 15 / 0 °

Near Shadings

No Shadings

User's needs

Unlimited load (grid)

System information

PV Array

Nb. of modules

114 units

Pnom total

62.7 kWp

Inverters

Nb. of units

1.5 units

Pnom total

60.0 kWac

Pnom ratio

1.045

Results summary

Produced Energy 108108 kWh/year Specific production 1724 kWh/kWp/year Perf. Ratio PR 81.20 %

Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	5
Loss diagram	6
CO ₂ Emission Balance	7



Project: Simulação Caso 1

Variant: Nova variante da simulação

PVsyst V7.4.5

VC0, Simulation date:
10/01/24 08:31
with v7.4.5

Anne Caroline Ramos de Matos (Brazil)

General parameters

Grid-Connected System		No 3D scene defined, no shadings	
PV Field Orientation		Sheds configuration	Models used
Orientation		No 3D scene defined	Transposition Perez
Fixed plane			Diffuse Perez, Meteonorm
Tilt/Azimuth	15 / 0 °		Circumsolar separate
Horizon		Near Shadings	User's needs
Free Horizon		No Shadings	Unlimited load (grid)

PV Array Characteristics

PV module		Inverter	
Manufacturer	Generic	Manufacturer	Generic
Model	CS6W-550MS 1500V	Model	SG40CX-P2
(Original PVsyst database)		(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	550 Wp	Unit Nom. Power	40.0 kWac
Number of PV modules	114 units	Number of inverters	1.5 units
Nominal (STC)	62.7 kWp	Total power	60.0 kWac
Array #1 - Sub-array 1		Array #1 - Sub-array 1	
Number of PV modules	57 units	Number of inverters	3 * MPPT 25% 0.8 unit
Nominal (STC)	31.4 kWp	Total power	30.0 kWac
Modules	3 string x 19 In series		
At operating cond. (50°C)		At operating cond. (50°C)	
Pmpp	28.72 kWp	Operating voltage	160-1000 V
U mpp	714 V	Max. power (=>40°C)	44.0 kWac
I mpp	40 A	Pnom ratio (DC:AC)	1.05
		No power sharing between MPPTs	
Array #2 - Sub-array 2		Array #2 - Sub-array 2	
Number of PV modules	57 units	Number of inverters	3 * MPPT 25% 0.8 unit
Nominal (STC)	31.4 kWp	Total power	30.0 kWac
Modules	3 string x 19 In series		
At operating cond. (50°C)		At operating cond. (50°C)	
Pmpp	28.72 kWp	Operating voltage	160-1000 V
U mpp	714 V	Max. power (=>40°C)	44.0 kWac
I mpp	40 A	Pnom ratio (DC:AC)	1.05
		No power sharing between MPPTs	
Total PV power		Total inverter power	
Nominal (STC)	63 kWp	Total power	60 kWac
Total	114 modules	Nb. of inverters	2 units
Module area	292 m²		0.5 unused
		Pnom ratio	1.05
		No power sharing	

Array losses

Array Soiling Losses		Thermal Loss factor		DC wiring losses	
Loss Fraction	3.0 %	Module temperature according to irradiance		Global array res.	293 mΩ
		Uc (const)	20.0 W/m²K	Global wiring resistance	147 mΩ
		Uv (wind)	0.0 W/m²K/m/s	Loss Fraction	1.5 % at STC
Serie Diode Loss		LID - Light Induced Degradation		Module Quality Loss	
Voltage drop	0.7 V	Loss Fraction	2.0 %	Loss Fraction	-0.5 %
Loss Fraction	0.1 % at STC				



PVsyst V7.4.5

VC0, Simulation date:
10/01/24 08:31
with v7.4.5

Anne Caroline Ramos de Matos (Brazil)

Array losses

Module mismatch losses

Loss Fraction 2.0 % at MPP

IAM loss factor

Incidence effect (IAM): User defined profile

10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
0.998	0.998	0.995	0.992	0.986	0.970	0.917	0.763	0.000

System losses

Auxiliaries loss

AC wiring losses

Inv. output line up to injection point

Inverter voltage 400 Vac tri
Loss Fraction 0.00 % at STC

Inverter: SG40CX-P2

Wire section (2 Inv.) Copper 2 x 3 x 16 mm²
Average wires length 0 m



Project: Simulação Caso 1

Variant: Nova variante da simulação

PVsyst V7.4.5

VC0, Simulation date:
10/01/24 08:31
with v7.4.5

Anne Caroline Ramos de Matos (Brazil)

Main results

System Production

Produced Energy 108108 kWh/year

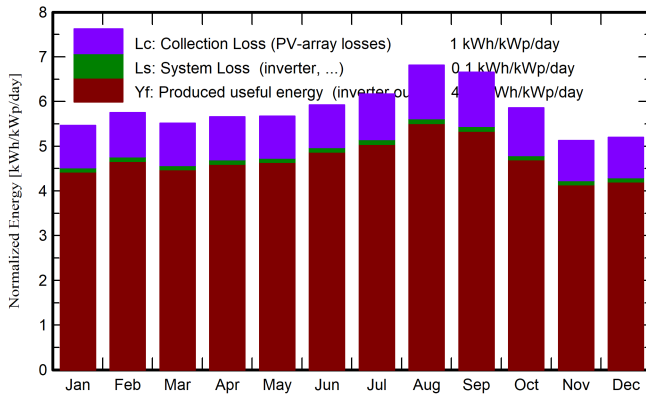
Specific production

1724 kWh/kWp/year

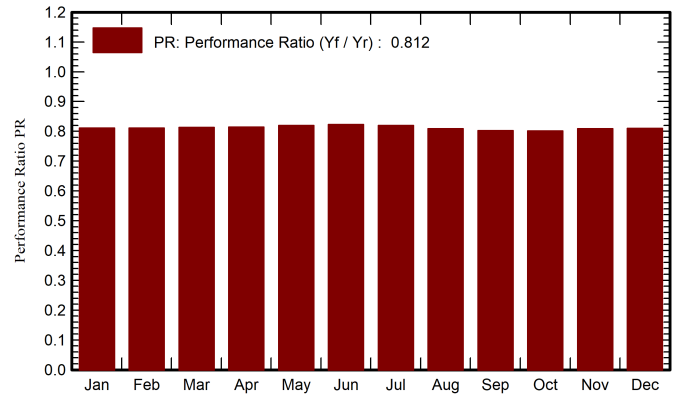
Perf. Ratio PR

81.20 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

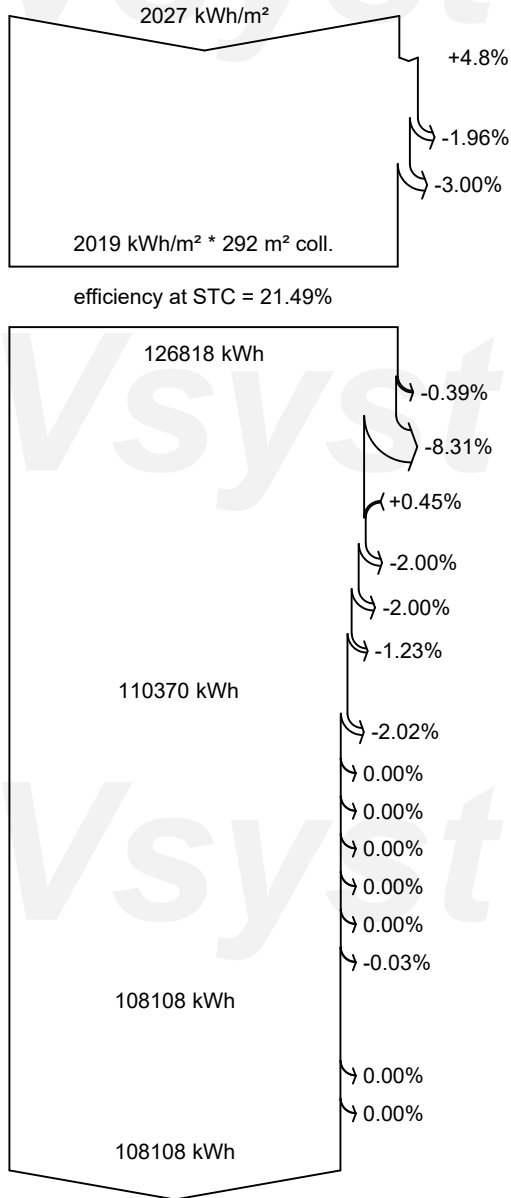
	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh	kWh	ratio
January	180.9	88.16	21.74	169.5	160.5	8801	8616	0.811
February	165.6	73.19	21.70	161.1	153.1	8367	8194	0.811
March	167.8	79.37	21.48	170.9	162.6	8894	8710	0.813
April	155.9	64.86	21.02	169.7	161.6	8843	8663	0.814
May	152.3	48.48	19.84	175.8	167.7	9221	9036	0.820
June	147.7	35.14	18.16	177.7	169.6	9362	9174	0.823
July	161.9	41.26	18.24	191.1	182.5	10017	9818	0.819
August	185.9	37.28	19.93	211.2	201.7	10935	10720	0.809
September	188.1	55.09	21.83	199.7	190.2	10255	10051	0.803
October	183.7	68.89	22.91	181.7	172.2	9330	9137	0.802
November	162.7	72.80	21.34	153.8	145.4	7975	7802	0.809
December	174.6	77.04	21.64	161.2	152.2	8369	8187	0.810
Year	2027.0	741.55	20.81	2123.5	2019.3	110370	108108	0.812

Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_Grid	Energy injected into grid
T_Amb	Ambient Temperature	PR	Performance Ratio
GlobInc	Global incident in coll. plane		
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings		



Loss diagram



- Global horizontal irradiation**
- Global incident in coll. plane**
- IAM factor on global
- Soiling loss factor
- Effective irradiation on collectors**
- PV conversion
- Array nominal energy (at STC effic.)**
- PV loss due to irradiance level
- PV loss due to temperature
- Module quality loss
- LID - Light induced degradation
- Module array mismatch loss
- Ohmic wiring loss
- Array virtual energy at MPP**
- Inverter Loss during operation (efficiency)
- Inverter Loss over nominal inv. power
- Inverter Loss due to max. input current
- Inverter Loss over nominal inv. voltage
- Inverter Loss due to power threshold
- Inverter Loss due to voltage threshold
- Night consumption
- Available Energy at Inverter Output**
- Auxiliaries (fans, other)
- AC ohmic loss
- Energy injected into grid**



CO₂ Emission Balance

Total: 118.7 tCO₂

Generated emissions

Total: 75.85 tCO₂

Source: Detailed calculation from table below

Replaced Emissions

Total: 218.9 tCO₂

System production: 108.11 MWh/yr

Grid Lifecycle Emissions: 81 gCO₂/kWh

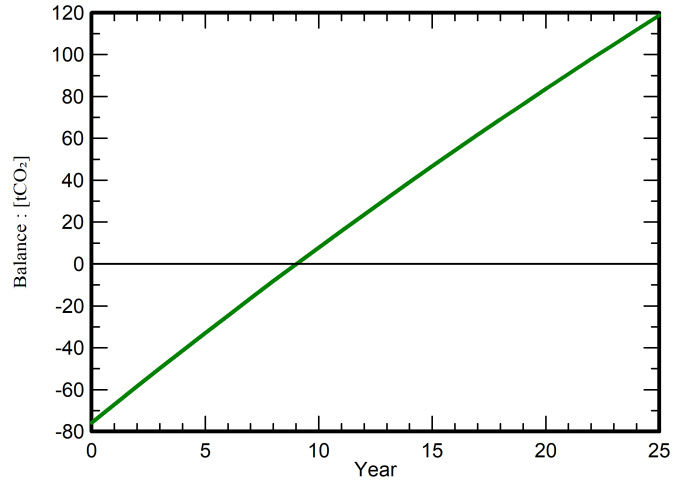
Source: IEA List

Country: Brazil

Lifetime: 25 years

Annual degradation: 1.0 %

Saved CO₂ Emission vs. Time



System Lifecycle Emissions Details

Item	LCE	Quantity	Subtotal [kgCO ₂]
Modules	1713 kgCO ₂ /kWp	44.0 kWp	75360
Supports	0.54 kgCO ₂ /kg	800 kg	432
Inverters	53.5 kgCO ₂ /units	1.00 units	53.5

D. SIMULAÇÃO PVSYST 2

PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: Simulação Caso 2

Variant: Nova variante da simulação

No 3D scene defined, no shadings

System power: 421 kWp

Ceilândia - CEM02 - Brazil

Author

Anne Caroline Ramos de Matos (Brazil)



Project: Simulação Caso 2

Variant: Nova variante da simulação

PVsyst V7.4.5

VC0, Simulation date:
10/01/24 08:17
with v7.4.5

Anne Caroline Ramos de Matos (Brazil)

Project summary

Geographical Site

Ceilândia - CEM02

Brazil

Situation

Latitude -15.81 °S

Longitude -48.11 °W

Altitude 1277 m

Time zone UTC-3

Project settings

Albedo 0.20

Meteo data

Ceilândia - CEM02

Meteonorm 8.1 (2008-2015), Sat=8% - Sintético

System summary

Grid-Connected System

No 3D scene defined, no shadings

PV Field Orientation

Fixed plane

Tilt/Azimuth 15 / 0 °

Near Shadings

No Shadings

User's needs

Unlimited load (grid)

System information

PV Array

Nb. of modules

765 units

Pnom total

421 kWp

Inverters

Nb. of units

9.8 units

Pnom total

390 kWac

Pnom ratio

1.079

Results summary

Produced Energy 760812 kWh/year Specific production 1808 kWh/kWp/year Perf. Ratio PR 85.15 %

Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	5
Loss diagram	6
CO ₂ Emission Balance	7



Project: Simulação Caso 2

Variant: Nova variante da simulação

PVsyst V7.4.5

VC0, Simulation date:
10/01/24 08:17
with v7.4.5

Anne Caroline Ramos de Matos (Brazil)

General parameters

Grid-Connected System

No 3D scene defined, no shadings

PV Field Orientation

Orientation

Fixed plane
Tilt/Azimuth 15 / 0 °

Sheds configuration

No 3D scene defined

Models used

Transposition Perez
Diffuse Perez, Meteonorm
Circumsolar separate

Horizon

Free Horizon

Near Shadings

No Shadings

User's needs

Unlimited load (grid)

PV Array Characteristics

PV module

Manufacturer Generic
Model CS6W-550MS 1500V

(Original PVsyst database)

Unit Nom. Power 550 Wp
Number of PV modules 765 units
Nominal (STC) 421 kWp

Array #1 - Sub-array #1

Number of PV modules 480 units
Nominal (STC) 264 kWp
Modules 24 string x 20 In series

At operating cond. (50°C)

Pmpp 242 kWp
U mpp 752 V
I mpp 322 A

Array #2 - Sub-array #2

Number of PV modules 285 units
Nominal (STC) 157 kWp
Modules 15 string x 19 In series

At operating cond. (50°C)

Pmpp 144 kWp
U mpp 714 V
I mpp 201 A

Total PV power

Nominal (STC) 421 kWp
Total 765 modules
Module area 1961 m²

Inverter

Manufacturer Generic
Model SG40CX-P2

(Original PVsyst database)

Unit Nom. Power 40.0 kWac
Number of inverters 9.8 units
Total power 390 kWac

Number of inverters 24 * MPPT 25% 6 units
Total power 240 kWac

Operating voltage 160-1000 V
Max. power (=>40°C) 44.0 kWac
Pnom ratio (DC:AC) 1.10
No power sharing between MPPTs

Number of inverters 15 * MPPT 25% 3.8 units
Total power 150 kWac

Operating voltage 160-1000 V
Max. power (=>40°C) 44.0 kWac
Pnom ratio (DC:AC) 1.05
No power sharing between MPPTs

Total inverter power

Total power 390 kWac
Nb. of inverters 10 units
0.3 unused
Pnom ratio 1.08
No power sharing

Array losses

Thermal Loss factor

Module temperature according to irradiance
Uc (const) 20.0 W/m²K
Uv (wind) 0.0 W/m²K/m/s

Module Quality Loss

Loss Fraction -0.5 %

Module mismatch losses

Loss Fraction 2.0 % at MPP



Array losses

IAM loss factor

Incidence effect (IAM): User defined profile

10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
0.998	0.998	0.995	0.992	0.986	0.970	0.917	0.763	0.000

DC wiring losses

Global wiring resistance 10 mΩ
Loss Fraction 1.5 % at STC

Array #1 - Sub-array #1

Global array res. 39 mΩ
Loss Fraction 1.5 % at STC

Array #2 - Sub-array #2

Global array res. 59 mΩ
Loss Fraction 1.5 % at STC



Project: Simulação Caso 2

Variant: Nova variante da simulação

PVsyst V7.4.5

VC0, Simulation date:
10/01/24 08:17
with v7.4.5

Anne Caroline Ramos de Matos (Brazil)

Main results

System Production

Produced Energy 760812 kWh/year

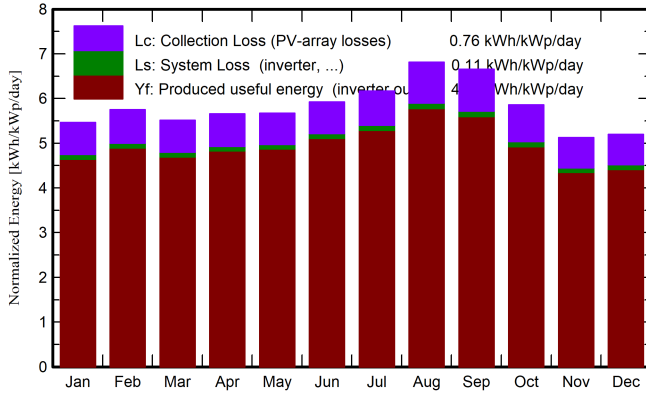
Specific production

1808 kWh/kWp/year

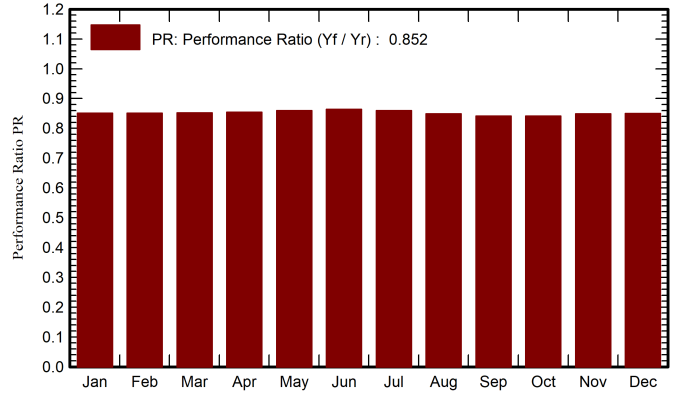
Perf. Ratio PR

85.15 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh	kWh	ratio
January	180.9	88.16	21.74	169.5	165.5	62014	60656	0.851
February	165.6	73.19	21.70	161.1	157.9	58940	57668	0.851
March	167.8	79.37	21.48	170.9	167.6	62657	61305	0.853
April	155.9	64.86	21.02	169.7	166.6	62294	60971	0.854
May	152.3	48.48	19.84	175.8	172.9	64957	63596	0.860
June	147.7	35.14	18.16	177.7	174.8	65949	64567	0.863
July	161.9	41.26	18.24	191.1	188.1	70551	69081	0.859
August	185.9	37.28	19.93	211.2	207.9	76990	75403	0.849
September	188.1	55.09	21.83	199.7	196.1	72203	70700	0.841
October	183.7	68.89	22.91	181.7	177.6	65714	64298	0.841
November	162.7	72.80	21.34	153.8	149.9	56195	54925	0.849
December	174.6	77.04	21.64	161.2	156.9	58975	57644	0.850
Year	2027.0	741.55	20.81	2123.5	2081.8	777437	760812	0.852

Legends

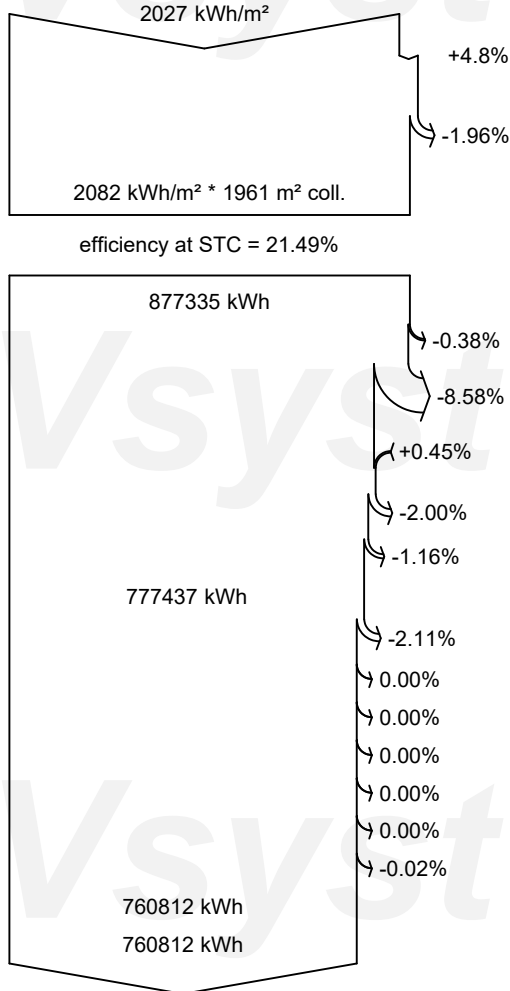
GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_Grid	Energy injected into grid
T_Amb	Ambient Temperature	PR	Performance Ratio
GlobInc	Global incident in coll. plane		
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings		



PVsyst V7.4.5

VC0, Simulation date:
10/01/24 08:17
with v7.4.5

Loss diagram



- Global horizontal irradiation**
- Global incident in coll. plane**
- IAM factor on global
- Effective irradiation on collectors**
- PV conversion
- Array nominal energy (at STC effic.)**
- PV loss due to irradiance level
- PV loss due to temperature
- Module quality loss
- Module array mismatch loss
- Ohmic wiring loss
- Array virtual energy at MPP**
- Inverter Loss during operation (efficiency)
- Inverter Loss over nominal inv. power
- Inverter Loss due to max. input current
- Inverter Loss over nominal inv. voltage
- Inverter Loss due to power threshold
- Inverter Loss due to voltage threshold
- Night consumption
- Available Energy at Inverter Output**
- Energy injected into grid**



CO₂ Emission Balance

Total: 878.8 tCO₂

Generated emissions

Total: 725.30 tCO₂

Source: Detailed calculation from table below

Replaced Emissions

Total: 1848.8 tCO₂

System production: 760.81 MWh/yr

Grid Lifecycle Emissions: 81 gCO₂/kWh

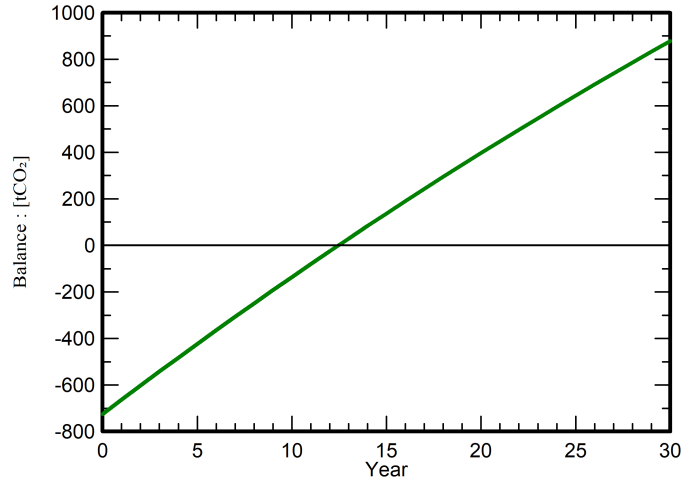
Source: IEA List

Country: Brazil

Lifetime: 30 years

Annual degradation: 1.0 %

Saved CO₂ Emission vs. Time



System Lifecycle Emissions Details

Item	LCE	Quantity	Subtotal
			[kgCO ₂]
Modules	1713 kgCO ₂ /kWp	421 kWp	720627
Supports	0.54 kgCO ₂ /kg	7650 kg	4133
Inverters	53.5 kgCO ₂ /units	10.00 units	535