



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FRANCISCO EDUARDO DE ANDRADE SOTERO

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO EM ESCOLA PÚBLICA
NA ZONA DA MATA DE PERNAMBUCO.**

Recife-PE
2024

FRANCISCO EDUARDO DE ANDRADE SOTERO

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO EM ESCOLA PÚBLICA
NA ZONA DA MATA DE PERNAMBUCO.**

Trabalho realizado, no Centro de Tecnologia e Geociência da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, apresentado como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Recarte Henriquez Guerrero

Coorientador: Dr. Daniel Rodríguez López

Recife-PE

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Sotéro, Francisco Eduardo de Andrade.

Avaliação da utilização de um sistema fotovoltaico em escola pública na zona da mata de Pernambuco / Francisco Eduardo de Andrade Sotéro. - Recife, 2024.

50 : il., tab.

Orientador(a): Jorge Recarte Henriquez Guerrero

Coorientador(a): Daniel Rodríguez López

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Sistema Fotovoltaico On-Grid. 2. Geração Elétrica. 3. Análise Econômica e Financeira de Sistema Fotovoltaico. 4. Dimensionamento de Sistema Fotovoltaico. 5. Simulação de Sistema Fotovoltaico. I. Guerrero, Jorge Recarte Henriquez. (Orientação). II. López, Daniel Rodríguez. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO EM ESCOLA PÚBLICA
NA ZONA DA MATA DE PERNAMBUCO.**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

Recife-PE, 25/03/2024.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jorge Recarte Henriquez Guerrero (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Dr. Daniel Rodríguez López (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Claudino de Lira Junior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Msc. Tales de Melo Bezerra (Examinador Externo)
Instituto Federal de Pernambuco

Agradecimentos

Agradeço a todos que se fizeram presente e que nos momentos de tristeza trouxeram um sorriso, nos momentos de escuridão trouxeram a luz e nos momento sombrios trouxeram a paz.

Desejo agradecer especialmente a:

Minha Mãe, Bernadete de Andrade, que sempre foi exemplo de persona e se fez presente nos momentos mais difíceis da minha vida. Eu nunca estive só pois sempre tive ela ao meu lado.

Minha noiva, Bianca Alves, que me ajudou a superar os diversos momentos da minha vida onde me encontrei com dificuldades.

Minha Irmã, Júlia Luísa, que sempre se fez presente nos momentos mais difíceis.

Ao meu sobrinho e afilhado, Bernardo de Andrade, que trouxe luz à vida de toda minha família.

Aos meus familiares que, foram de suma importância para construção da pessoa que sou hoje, sendo elementos estruturais na minha formação.

Aos professores que, tiveram afínco em passar o conhecimento para próxima geração, de modo ético e sábio.

As amizades que foram construídas, nessa longa jornada que é a vida, e aquelas que mesmo de longe se fizeram presente.

Ao Mangue Baja, projeto de extensão que me apresentou um pouco do mundo profissional e me recebeu de portas abertas. "E o Mangue Baja faz o quê?! ..."

O futuro é o fruto do que foi plantado ao longo dos anos.

Francisco E. de A. Sotero

*Ainda que eu andasse pelo vale da sombra da morte,
não temeria mal algum, porque tu estás comigo.*

Salmo 23

RESUMO

Atualmente a utilização de Sistemas Fotovoltaicos se apresenta de forma significativa para a produção de uma energia verde e economicamente viável. Posto isso, o presente trabalho busca realizar um estudo sobre a utilização de um Sistema Fotovoltaico como alternativa para redução nos gastos com eletricidade, fornecida pela concessionária de energia elétrica, em uma escola pública no interior de Pernambuco. Como parte do estudo, foi realizado o dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico para suprir toda a demanda de consumo de eletricidade da instituição, tomando por base o histórico de consumo da escola e os conceitos técnicos e teóricos para o dimensionamento do sistema. Foram realizados os cálculos necessários para a seleção dos equipamentos do sistema, resultando numa pequena usina composta por 54 placas solares, um Inversor e equipamentos que auxiliam a instalação. Posteriormente foram realizadas simulações com o *software HelioScope* para determinar a capacidade de produção de energia elétrica com o sistema dimensionado, considerando nas análises o efeito de sombreamento e o uso de dois Módulos Fotovoltaicos distintos. Para a verificação da viabilidade econômica da aplicação desse sistema na instituição foi realizada uma análise financeira. Os resultados indicam um custo estimado em R\$104.283,74 e um tempo de retorno entre o quinto e sexto ano de operação.

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico *On-Grid*; Geração Elétrica; Análise Econômica e Financeira de Sistema Fotovoltaico; Dimensionamento de Sistema Fotovoltaico; Simulação de Sistema Fotovoltaico.

ABSTRACT

Currently, the use of Photovoltaic Systems is significant for the production of green and economically viable energy. Therefore, this study aims to investigate the utilization of a Photovoltaic System as an alternative to reduce electricity expenses provided by the power utility company at a public school in the interior of Pernambuco. As part of the study, the sizing of a Photovoltaic System was conducted to meet the entire electricity consumption demand of the institution, based on the school's consumption history and technical and theoretical concepts for system sizing. The necessary calculations were performed to select the system's equipment, resulting in a small plant composed of 54 solar panels, an inverter, and installation assistance equipment. Subsequently, simulations were conducted using the HelioScope software to determine the electricity production capacity of the sized system, considering shading effects and the use of two different Photovoltaic Modules. To verify the economic viability of applying this system in the institution, a financial analysis was carried out. The results indicate an estimated cost of R\$104.283,74 and a payback period between the fifth and sixth year of operation.

Keywords: On-Grid Photovoltaic System; Electric Generation; Economic and Financial Analysis of Photovoltaic System; Sizing of Photovoltaic System; Simulation of Photovoltaic System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação das fontes na Oferta Interna de Energia(%) entre 2013 e 2022.	14
Figura 2 – Evolução da potência instalada, por MMGD, da geração solar fotovoltaica em comparação a outras fontes.	17
Figura 3 – Ilustração de sistema <i>Off-Grid</i>	19
Figura 4 – Ilustração de sistema <i>On-Grid</i>	20
Figura 5 – Sistema conectado à rede.	22
Figura 6 – Módulo Fotovoltaico.	23
Figura 7 – Inversor Fotovoltaico.	24
Figura 8 – Medidor Bidirecional.	24
Figura 9 – Potência gerada por 47 placas.	35
Figura 10 – Potência gerada por 48 placas.	35
Figura 11 – Potência gerada por 49 placas.	35
Figura 12 – Potência gerada por 50 placas.	35
Figura 13 – Potência gerada por 51 placas.	36
Figura 14 – Potência gerada por 52 placas.	36
Figura 15 – Potência gerada por 53 placas.	36
Figura 16 – Potência gerada por 54 placas.	36
Figura 17 – Inversor Growatt, modelo MAC36KTL3-XL 36KW	37
Figura 18 – Vista do arranjo modelado.	38
Figura 19 – Dados fornecido pela simulação do sistema projetado.	39
Figura 20 – Vista do arranjo modelado com sombreamento.	39
Figura 21 – Relatório com os dados referente a simulação com sombreamento.	40
Figura 22 – Relatório com os dados referente a simulação com o módulo solar JKM470N-60HL4-V.	41
Figura 23 – Vista do arranjo modelado utilizando a capacidade total de instalação.	41
Figura 24 – Relatório com os dados referente a simulação da capacidade total de instalação.	42
Figura 25 – Primeira análise financeira.	43
Figura 26 – Segunda análise financeira.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação dos anos de 2021 e 2022 das diferentes fontes presentes na matriz elétrica brasileira, segundo a BEN de 2023.	17
Tabela 2 – Geração elétrica (GWh) em 2021 e 2022.	17
Tabela 3 – Tabela de preço médio para a instalação de sistemas fotovoltaicos para consumidores finais.	18
Tabela 4 – Dados do painel selecionado.	26
Tabela 5 – Tabela com a metodologia adotada para o dimensionamento dos painéis e cálculo da área ocupada.	28
Tabela 6 – Tabela com a sequência metodológica para os cálculos adicionais necessários para escolha do Inversor.	29
Tabela 7 – Metodologia utilizada para a realização das análises financeiras.	32
Tabela 8 – Dados de consumo do objeto de estudo.	33
Tabela 9 – Dados de irradiação.	34
Tabela 10 – Potência gerada no 30º ano.	35
Tabela 11 – Dados calculados para escolha do Inversor utilizado.	36
Tabela 12 – Dados técnicos do inversor selecionado.	37
Tabela 13 – Comparação das perdas dos Sistemas Fotovoltaicos com e sem sombreamento.	40
Tabela 14 – Preço de equipamentos, levantados a partir de pesquisa no mercado.	42
Tabela 15 – Geração de energia estimada ao longo de um ano.	43
Tabela 16 – Tabela para análise o retorno do capital investido.	44

LISTA DE LETRAS LATINAS

AF	Análise Financeira [R\$]
AF_{ano-1}	Análise Financeira do ano anterior [R\$]
A_{painel}	Área total dos painéis [m^2]
A_{1PPV}	Área de um Painel Solar [m^2]
c.a	Corrente Alternada [A]
C_{ano}	Custo pago com energia elétrica no ano [R\$]
c.c	Corrente Contínua [A]
$C_{disponibilidade}$	Custo de disponibilidade [R\$]
C_{FioB}	Custo com o Fio B [R\$]
C_{KWh}	Custo referente a 1 KWh [R\$]
E	Consumo médio diário da escola analisada [$\frac{KWh}{dia}$]
E_{ano}	Energia gerada no ano [KWh]
E_{ano-1}	Energia gerada no ano anterior [KWh]
E_f	Eficiência do módulo solar [%]
E_{GP}	Energia diária gerada com perdas [$\frac{KWh}{dia}$]
E_{SP}	Energia diária gerada sem perdas [$\frac{KWh}{dia}$]
FC	Fluxo de Caixa [R\$]
\bar{G}_d	Irradiação solar média diária [$\frac{KWh}{m^2 dia}$]
HSP	Horas de sol pleno diário em média [$\frac{h}{dia}$]
$I_{circuito}$	Corrente do circuito [A]
$I_{disjuntor}$	Corrente do disjuntor [A]
$I_{equipamento}$	Custo com equipamento [R\$]
I_{limite}	Corrente limite [A]
I_{PVMax}	Corrente máxima de entrada [A]
I_0	Custo inicial para implantação do sistema fotovoltaico [R\$]
N_{PPV}	Quantidade de painéis necessários [adimensional]
p	Perda relativa a degradação das placas [%]
$P_{tgerada}$	Máxima potência gerada pelo sistema [W]
P_N	Potência nominal [W]
P_{PV}	Potência de pico do sistema fotovoltaico [W]
P_{PV_t}	Potência de pico do sistema fotovoltaico no ano t [W]
R	Receita gerada [R\$]
R_2	Custos pagos com eletricidade pela escola [R\$]
TD	Taxa de desempenho do sistema [%]
V_{OP}	Tensão de circuito aberto do painel [V]
V_{TS}	Tensão total série dos painéis [V]

LISTA DE LETRAS GREGAS

β	Coefficiente de temperatura [$\frac{mV}{celula^{\circ}C}$]
Δt	Variação de temperatura possível [$^{\circ}C$]
$V_{\Delta t}$	Tensão corrigida pelo efeito da temperatura [V]

LISTA DE LETRAS INGLESAS.

<i>String</i>	Conjunto de placas solares [adimensional]
<i>Payback</i>	Tempo de retorno do capital investido [ano]

LISTA DE SIGLAS

BEN	Balanco Energético Nacional
COP	<i>Conference of the Parties</i>
CTG	Centro de Tecnologia e Geociência
DPS	Dispositivos de Proteção Contra Surto
EJA	Educação de Jovens e Adultos
INEP	Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PERS	Programa de Energia Renovável Social
PV	Photovoltaic
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
SPDA	Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas
SPPM	Seguidor de Potência Máxima
SPV	Sistema Fotovoltaico
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

Sumário

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	8
1 Introdução.	14
1.1 Objetivo.	15
1.2 Objetivos específicos.	15
2 Revisão bibliográfica.	16
2.1 Fontes Energéticas.	16
2.2 Cenário Brasileiro.	16
2.3 Payback.	18
2.4 Sistema solar fotovoltaico.	19
2.4.1 Arcabouço Regulatório.	20
2.4.2 Princípio de funcionamento do sistema On-Grid.	22
2.4.3 Módulo Fotovoltaico.	22
2.4.4 Inversor.	23
2.4.5 Dispositivos de Proteção.	23
2.4.6 Medidor bidirecional.	24
2.5 Software HelioScope.	25
3 Metodologia.	26
3.1 Descrição da área de estudo.	26
3.2 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico.	26
3.2.1 Irradiação solar.	26
3.2.2 Dimensionamento dos módulos fotovoltaicos e cálculo da área ocupada.	26
3.2.3 Dimensionamento do Inversor.	28
3.2.4 Equipamentos de segurança.	29
3.3 Simulações HelioScope.	29
3.4 Análise financeira.	30
3.4.1 Custo inicial para implantação do Sistema PV	30
3.4.2 Payback.	30
4 Resultados e Discussões.	33
4.1 Resultados e Discussões da Descrição da área de estudo.	33
4.2 Resultados e Discussões do Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico.	34
4.3 Resultados e Discussões das Simulações	38
4.4 Resultados e Discussões da Análise Financeira.	41
5 Conclusões e trabalhos futuros.	45

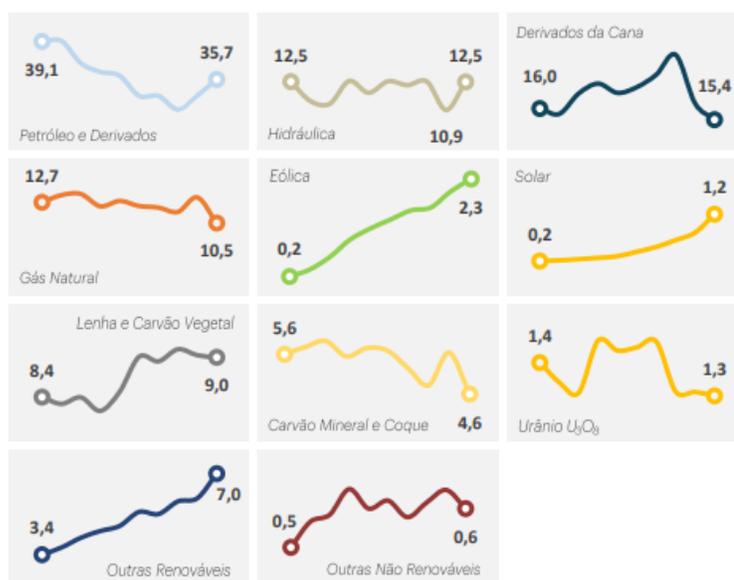
5.1	Conclusões	45
5.2	Trabalhos Futuros.	46
	REFERÊNCIAS	47

1 Introdução.

Conforme Carvalho (2014), uso da energia elétrica possibilitou a transição do Brasil de um país essencialmente exportador de produtos agrícolas para gradualmente se tornar uma nação industrializada. Dentro dessa perspectiva, percebe-se que a eletricidade exerce papel fundamental, uma vez que é indispensável para diferentes setores fundamentais da sociedade. Ademais, é importante que haja progresso de forma sustentável e renovável, visando as necessidades de um mundo mais "limpo". Diante a *Conference of the Parties* (COP) de 2021, o Brasil assumiu como meta alcançar redução de 50% das emissões de CO_2 até 2030 e emissões líquidas neutras até 2050, (GOV, 2021). Ainda, a Nations (2015) detém de diferentes objetivos para alcançar um futuro melhor e mais saudável, dos quais destacam-se os objetivos 7 (Energia Limpa e Acessível); 9 (Industria, Inovação e Infraestrutura); 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e 13 (Ação Climática).

As fontes de energias renováveis desempenham um papel significativo na matriz energética brasileira, com destaque para o crescimento notável na utilização de Sistemas Solares e Eólicos nos últimos anos, como apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Participação das fontes na Oferta Interna de Energia(%) entre 2013 e 2022.



Fonte - (BEN, 2023).

Dos sistemas para geração de energia elétrica, o Sistema Fotovoltaico (SPV) destaca-se pela facilidade de implantação, baixo impacto ambiental, alta quantidade de fonte primária para geração de energia, bem como, por ao longo dos anos ter apresentado crescente utilização e diminuição no custo de implantação, mostrando-se como relevante meio para se alcançar a descarbonização e sustentabilidade. É válido ressaltar que, o Brasil possui grande potencial energético, destacando-se também na geração de Energia Fotovoltaica, consoante a Solar (2019).

Tendo em vista, que os avanços para implementação de Sistemas Fotovoltaicos são congruentes com

a visão brasileira para o futuro e vislumbrando a realização de um estudo de cunho social, o presente trabalho apresenta como tema "Avaliação da utilização de um Sistema Fotovoltaico em escola pública na zona da mata de Pernambuco", tendo como hipótese que a utilização desse sistema reduzirá o consumo energético fornecido pela concessionária de energia e diminuirá os gastos com a utilização da rede elétrica. O presente trabalho tem por objetivo dimensionar e avaliar o emprego de um sistema PV do ponto de vista financeiro e de geração de energia elétrica, bem como os aspectos que influenciam a geração energética. Desse modo, levando em consideração a promessa realizada na COP de 2021 e visando possibilitar alternativa para redução de custos com eletricidade em um ambiente público, o vigente estudo se apresenta de modo relevante.

O presente estudo visa realizar o projeto de um sistema que possibilita a redução dos custos com consumo de eletricidade pela instituição de ensino, ao mesmo tempo em que busca aproveitar o potencial de geração de energia elétrica da escola. A intenção é aproximar a tecnologia fotovoltaica do âmbito escolar e propor um trabalho que impacte positivamente o ambiente público. Desse modo, o presente estudo projetará um sistema fotovoltaico visando responder as seguintes perguntas: *"Quanto uma escola irá economizar com a implantação de um sistema fotovoltaico? Em quanto tempo o sistema implantado irá restituir o custo de implantação? E quais os fatores que irá influenciar na geração energética do sistema dimensionado?"*.

1.1 Objetivo.

O presente trabalho tem como objetivo geral a avaliação técnica e financeira de um sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica, projetado para instalação em uma escola pública, localizada na zona da mata sul do interior de Pernambuco.

1.2 Objetivos específicos.

A fim de ser alcançada as metas propostas, se faz necessário ter-se objetivos específicos que possibilitem a realização do vigente estudo. São objetivos específicos do corrente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC):

1. Dimensionar um Sistema Fotovoltaico baseado na demanda da escola;
2. Simular o Sistema PV no *software HeliScope*;
3. Avaliar o custo de instalação do Sistema Fotovoltaico;
4. Realizar uma análise econômica/financeira do sistema;
5. Analisar aspectos que influenciam na geração de energia do sistema.

2 Revisão bibliográfica.

2.1 Fontes Energéticas.

Segundo Carvalho (2014), os recursos naturais são finitos e os danos causados pelo uso de fontes como o petróleo e gás natural evidenciam a importante e urgente necessidade do desenvolvimento de fontes energéticas que sejam renováveis e limpas. Posto isto, o presente trabalho tomará como ferramenta de estudo a energia elétrica produzida por um Sistema Fotovoltaica.

Atualmente a energia elétrica pode ser originada de diferentes fontes, sejam elas naturais ou artificiais, estas podem ser divididas entre:

- **Fontes renováveis:** Segundo Santos (2015), são aquelas fontes em que os recursos naturais utilizados são capazes de se regenerar, ou seja, são considerados inesgotáveis, além de diminuir o impacto ambiental e contornar o uso de matéria prima que normalmente é não renovável.
- **Fontes não renováveis:** Consoante com Brasil (2023), as quais os recursos utilizados não são capazes de se regenerar.

2.2 Cenário Brasileiro.

Devido a localização geográfica, condições climáticas e recursos naturais, o Brasil vem sendo fomentado como grande "berço" na geração de energias renováveis, este fato pode ser observado uma vez que o mesmo vem aumentando a participação das fonte renováveis nas matrizes energética e elétrica ao longo dos anos. Em 2022 a matriz elétrica brasileira alcançou renovabilidade de 87,9% na geração, segundo BEN (2023).

Dentre as diferentes fontes presentes na matriz energética do Brasil e diante dos avanços tecnológicos na atualidade é notório ver que a energia elétrica exerce papel fundamental. Entre o ano de 2021 e 2022 o Brasil teve um aumento de 2,3% de consumo final de eletricidade e apresentou mudanças como pode ser visto na Tabela 1.

Conforme Solar (2019), o Brasil possui grande potencial energético, posto isto, é válido destacar a crescente utilização da energia fotovoltaica ao longo dos anos (Figura 2), apresentando aumento de 79,8% entre 2021 e 2022 (Tabela 2). Também é observado, na Tabela 2, que ocorre diminuição na geração de energia elétrica através de fontes não renováveis, observando o decaimento na geração de gás natural, carvão vapor e derivados de petróleo. Além disto, "O Brasil encerrou 2022 na 8ª posição do ranking mundial de capacidade operacional de energia solar com 24 GW de potência instalada, ficando a frente de países como Espanha, Grã-Bretanha, Holanda e França"(SOLMAIS., 2023).

A energia solar fotovoltaica representou 94,3% da Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) em 2022, sendo novamente a principal fonte responsável pelo aumento registrado na MMGD, esse é uma realidade que vem sendo construída ao longo dos anos (vide Figura 2).

Tabela 1 – Comparação dos anos de 2021 e 2022 das diferentes fontes presentes na matriz elétrica brasileira, segundo a BEN de 2023.

MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA		
FONTE	2021	2022
Carvão mineral e derivados	3,5%	2,1%
Hidráulica	53,4%	61,9%
Biomassa	8,2%	8,0%
Eólica	10,6%	11,8%
Solar	2,5%	4,4%
Gás Natural	12,8%	6,1%
Derivados de Petróleo	3,4%	1,8%
Nuclear	2,2%	2,1%
Eletricidade Importada	3,4%	1,9%

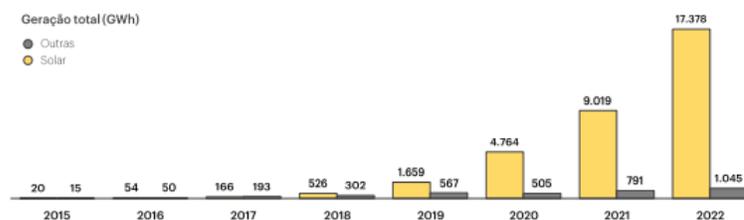
Fonte - (BEN, 2023).

Tabela 2 – Geração elétrica (GWh) em 2021 e 2022.

Fonte	2021	2022	$\Delta \frac{22}{21}$
Hidroelétrica	362.818	427.114	17,7%
Gás Natural	86.957	42.110	-51,6%
Eólica	72.286	81.632	12,9%
Biomassa	52.416	52.223	-0,4%
Nuclear	14.705	14.559	-1,0%
Carvão Vapor	17.585	7.988	-54,6%
Derivados do Petróleo	17.327	7.056	-59,3%
Solar Fotovoltaica	16.752	30.126	79,8%
Outras	15.263	14.364	-5,9%
Geração Total	656.109	677.173	3,2%

Fonte - (BEN, 2023).

Figura 2 – Evolução da potência instalada, por MMGD, da geração solar fotovoltaica em comparação a outras fontes.



Fonte - (BEN, 2023).

2.3 Payback.

Segundo Nubank (2024), "o *Payback* é uma ferramenta de projeção de lucro líquido de um projeto ao longo dos anos. Ela é usada para calcular quanto tempo vai levar para que esse empreendimento "se pague", ou seja, para que os lucros acumulados mês a mês se igualem ao investimento inicial".

Consoante a Experian (2024), o *Payback* pode ser dividido entre o *Payback Simples* e o *Payback descontado*. Diferentemente do modelo simples, no modelo descontado ocorre uma correção de valores, levando em consideração a Taxa Mínima de Atratividade e Valor Presente Líquido.

Assim, o cálculo de *Payback* é indispensável para a efetiva elaboração do presente trabalho de conclusão de curso, uma vez que este irá determinar a viabilidade econômica do sistema projetado e responderá as perguntas de pesquisa "Quanto uma escola irá economizar com a implantação de um sistema fotovoltaico? Em quanto tempo o sistema implantado irá restituir o custo de implantação?".

Dado que a escola estudada é uma entidade governamental, é viável a aplicação de um método de cálculo de *Payback* simples, porém que leve em consideração características específicas do sistema. Instituições desse tipo geralmente têm recursos financeiros limitados para determinadas finalidades e, portanto, é importante que sejam alocados de forma eficiente. De acordo com Lopes et al. (2022), o *Payback* simples pode ser calculado conforme descrito na Equação 1.

$$Payback = \frac{I_0}{FC} \quad (1)$$

Para os devidos fins, têm-se que:

- I_0 → Valor do investimento inicial;
- FC → Fluxo de caixa.

Conforme o Portal Solar (2024b), os custos para instalação de sistemas fotovoltaicos variam de acordo com a complexidade e o tamanho da instalação. Estes têm valores médios conforme descrito na Tabela 3. Vale ressaltar que os dados apresentados sobre o custo de instalação podem não refletir a realidade da escola estudada, uma vez que podem variar de acordo com a localização e as características particulares do sistema, geralmente sendo maiores do que os apresentados. Segundo Lopes et al. (2022), pode-se considerar um custo de R\$4.000,00 por kW para a instalação de um sistema fotovoltaico.

Tabela 3 – Tabela de preço médio para a instalação de sistemas fotovoltaicos para consumidores finais.

Preço de Instalação de placa solar para comércio e pequenos negócios	
Potência do Gerador [KWp]	Preço Médio da Instalação [R\$]
12	36.240,00
30	84.300,00
50	142.000,00
75	227.250,00

Fonte - (SOLAR, 2024b)

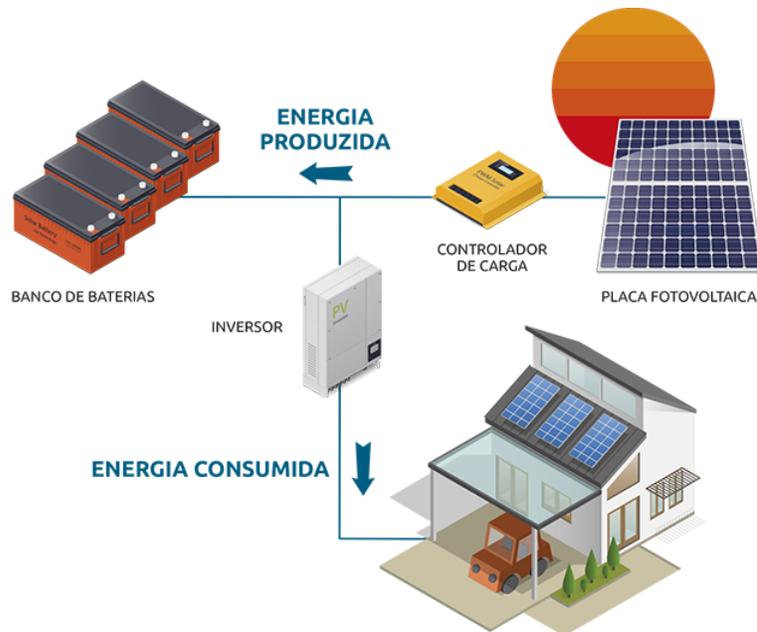
2.4 Sistema solar fotovoltaico.

Segundo Santos et al. (2020), a energia solar fotovoltaica é obtida através da captação da radiação solar por meio de células fotovoltaicas, que a transformam em energia elétrica. Essas células têm a função fundamental de absorver a radiação solar e convertê-la em uma forma de energia utilizável pelo ser humano. A geração de energia solar ocorre internamente na célula, onde uma reação entre a luz solar e o material semicondutor resulta na produção de eletricidade. Essa eletricidade é então conduzida através da placa fotovoltaica, composta por diversos elementos sobrepostos.

Ademais, conforme Lopes et al. (2022), os Sistemas Fotovoltaicos podem ser classificados em sistemas isolados ou conectados à rede. A escolha da modalidade de operação vai depender da aplicação, da disponibilidade de recursos e da disponibilidade de conexão.

- Sistemas isolados (*Off-Grid*): De acordo com Silva et al. (2023), refere-se a sistemas isolados e autônomos de geração de energia solar que utilizam baterias como dispositivos armazenadores de energia. Este sistema pode ser representado como posto na Figura 3.

Figura 3 – Ilustração de sistema *Off-Grid*.



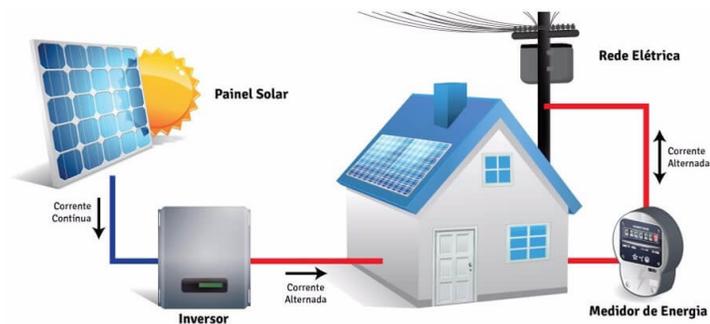
Fonte - (ECOQUECEDORES., 2023).

- Sistemas conectados à rede (*On-Grid*): São os Sistemas Fotovoltaicos que estão diretamente ligados na rede de distribuição da concessionária de energia. Vide Figura 4.

Para a plena operação dos sistemas *Off-Grid*, faz-se necessário a utilização de baterias para o armazenamento de cargas para os momentos em que não há presença da luz solar. Nos sistemas *On-Grid* todo excedente de energia elétrica é transformado em créditos. Diante disto, vê-se que os Sistemas Isolados se apresentam com grande viabilidade para locais distantes da rede de distribuição, contra partida, os Sistemas

On-Grid se apresentam como uma boa solução para locais próximos da rede de distribuição. Logo, o presente trabalho irá dimensionar um sistema *On-Grid*, tendo em vista a localização da escola e a possibilidade de utilização dos créditos gerados.

Figura 4 – Ilustração de sistema *On-Grid*.



Fonte - (RIBEIRO., 2022).

2.4.1 Arcabouço Regulatório.

A Lei Nº 14.300, de 06 de Janeiro de 2022 institui o marco legal da Micro e Minigeração Distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS).

De acordo com a Brasil (2022), os créditos originados do sistema implantado devem expirar em 60 (sessenta) meses após a data do faturamento, e para fins e efeitos desta lei, são adotadas as seguintes definições:

1. Microgeração Distribuída: Central geradora de energia elétrica, com potência instalada, em corrente alternada, menor ou igual a 75 kW (setenta e cinco quilowatts) e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras;
2. Minigeração Distribuída: Central geradora de energia elétrica renovável ou de cogeração qualificada que não se classifica como Microgeração distribuída e que possua potência instalada, em corrente alternada, maior que 75 kW (setenta e cinco quilowatts), menor ou igual a 5 MW (cinco megawatts) para as fontes despacháveis e menor ou igual a 3 MW (três megawatts) para as fontes não despacháveis, conforme regulamentação da Aneel, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras;
3. Autoconsumo local: Modalidade de Micro e Mini Geração Distribuída eletricamente junto à carga, participante do Sistema de Compensação de Energia Elétrica, no qual o excedente de energia elétrica

gerado por unidade consumidora de titularidade de um consumidor-gerador, pessoa física ou jurídica, é compensado ou creditado pela mesma unidade consumidora;

4. Sistema de Compensação de Energia Elétrica: Sistema de energia ativa é injetada por unidade consumidora com Micro e Mini Geração Distribuída na rede da distribuidora local, cedida a título de empréstimo gratuito e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa ou contabilizada como crédito de energia de unidades consumidoras participantes do sistema.

Outrossim, pode-se definir dois grupos tarifários sendo estes o Grupo B, com gestão simples e alto custo, e o Grupo A, com gestão complexa e baixo custo. Estes ainda podem se dividir em subgrupos, os quais devem ser escolhidos levando em consideração a carga total dos equipamentos, consumo mensal e por hora, bem como a possibilidade de expansão (ENERGIA., 2020).

Conforme Solar (2024a), a utilização de um sistema *On-Grid* não proporciona uma redução integral de 100% nas despesas associadas ao consumo de energia elétrica, apesar de ser capaz de gerar uma redução de 90%, devido ao custo de disponibilidade, que é uma quantidade mínima cobrada pela concessionária de energia. De acordo com Aneel (2010), o custo de disponibilidade aplicado mensalmente ao consumidor do tipo B é equivalente a:

- 30 kWh, se monofásico ou bifásico a 2 (dois) condutores;
- 50 kWh, se bifásico a 3 (três) condutores; ou
- 100 kWh, se trifásico.

Posto isto, a legislação está vinculada com os parâmetros utilizados para o dimensionamento a ser realizado, de modo que, algumas das regras que irão normatizar o presente sistema dependerão dos dados da escola, pois estes definiram o grupo ao qual o sistema pertence e é regido.

Consoante a Brasil (2022), para projetos instalados até dia 06 de Janeiro de 2022 ou que protocolarem solicitação de acesso na distribuidora em até 12 (doze) meses após a data de publicação desta lei, não estarão sujeitas ao período de transição e deste modo ficam isentas até 31 de dezembro de 2045 das quota de reintegração regulatória (depreciação) dos ativos de distribuição e ao custo de operação e manutenção do serviço de distribuição, esta taxa também é comumente conhecida como Taxa do Fio B. Para instalações que tiverem suas solicitações de acesso protocoladas posteriormente a estes prazos, estas deveram pagar um percentual sobre a Taxa do Fio B de modo progressivo, como disposto a seguir.

1. 15% (quinze por cento) a partir de 2023;
2. 30% (trinta por cento) a partir de 2024;
3. 45% (quarenta e cinco por cento) a partir de 2025;
4. 60% (sessenta por cento) a partir de 2026;
5. 75% (setenta e cinco por cento) a partir de 2027;

6. 90% (noventa por cento) a partir de 2028
7. → a partir de 2029 as unidades participantes do SCEE ficarão sujeitas às regras tarifárias estabelecidas pela Aneel para as unidades consumidoras com Microgeração ou Minigeração distribuída.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) na Normativa N° 687, a potência instalada da microgeração e da minigeração distribuída é limitada pela potência disponibilizada para a unidade consumidora (ANEEL, 2015).

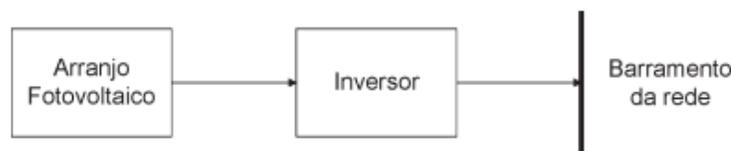
2.4.2 Princípio de funcionamento do sistema On-Grid.

Um sistema fotovoltaico é constituído por um bloco de condicionamento de potência e, opcionalmente, um bloco de armazenamento. O bloco gerador contém os arranjos fotovoltaicos, constituídos por módulos fotovoltaicos em diferentes associações, o cabeamento elétrico que os interliga e a estrutura de suporte. O bloco de condicionamento de potência pode ter conversores c.c - c.a., seguidor de potência máxima (SPPM), inversores, controladores de carga (se houver armazenamento) e outros dispositivos de proteção, supervisão e controle. Finalmente, o bloco de armazenamento é constituído por acumuladores elétricos (baterias) e/ou outras formas de armazenamento, conforme Pinho et al. (2014).

Diante do exposto, é plausível afirmar que para um sistemas *On-Grid* a rede elétrica funciona como um sistema para armazenamento de energia, pois, em um sistema aberto é possibilitado ao consumidor que, a energia injetada na rede seja devolvida na forma de créditos.

Em sistemas conectados à rede é indispensável a utilização de um inversor que satisfaça as exigências de qualidade e segurança para que não degrade a qualidade do sistema no qual se interliga o arranjo fotovoltaico, na Figura 5 é possível observar, de modo simplificado, como se estrutura um sistema *On-Grid*.

Figura 5 – Sistema conectado à rede.



Fonte - (CRESCEB, 2004).

Tendo em vista que, a instituição está localizado na área urbana o sistema *On-Grid* é mais conveniente para implantação na escola. Posto isto, o projeto desenvolvido no presente trabalho será constituído por módulo fotovoltaico, inversor, dispositivos de proteções e medidor de energia elétrica bidirecional.

2.4.3 Módulo Fotovoltaico.

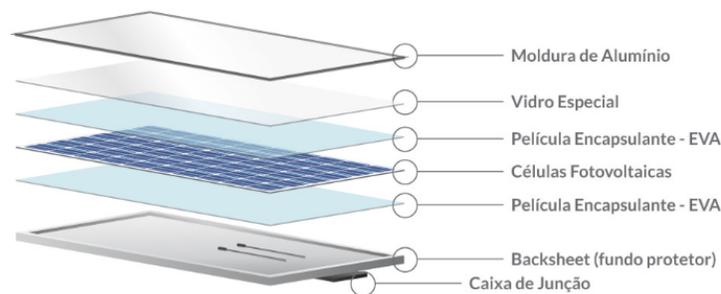
Conforme descrito por CRESCEB (2004), o módulo é considerado a unidade básica de um sistema fotovoltaico. Ele é composto por células interconectadas em arranjos, visando a geração de corrente e tensão suficientes para atender às demandas de consumo. O número de células e o arranjo em série e/ou paralelo

são determinados de acordo com a tensão de utilização e a corrente elétrica desejada. Posteriormente, essas células são encapsuladas, conforme ilustrado na Figura 6.

Segundo Solar (2023), de modo simples e objetivo têm-se que, o módulo fotovoltaico é a comumente conhecida placa solar e é composto por cerca de 36 a 72 células solares que são normalmente fabricadas de silício, este é responsável pela captação e conversão da luz solar em eletricidade.

De acordo com CRESCEB (2004), a transformação da energia solar em eletricidade, no módulo fotovoltaico, é alcançada por meio de células fotovoltaicas, as quais utilizam materiais semicondutores, sendo as principais células fotovoltaicas as de Silício Monocristalino, Silício Poli-cristalino, Filmes Finos e Células com concentração.

Figura 6 – Módulo Fotovoltaico.



Fonte - (SOL, 2023).

2.4.4 Inversor.

É o componente responsável por transformar a corrente contínua (fornecida pelas células fotovoltaicas) em corrente alternada (comumente utilizada pelos aparelhos eletrônicos) (MACEDO; ECONÔMICA; ARCOS-MG, 2017). Segundo CRESCEB (2004), o inversor deve dissipar o mínimo de potência, evitando as perdas e deve produzir uma tensão com baixo teor de harmônico e em sincronismo com a rede elétrica.

Este equipamento deve ser selecionado consoante ao sistema projetado, de acordo com Sol (2021), atualmente têm-se dois padrões sendo o inversor solar *On-Grid* e o inversor solar *Off-Grid*. Assim, o presente trabalho irá adotar o equipamento que é coerente ao sistema projetado, analisando os cálculos executado e os dispositivos encontrados no mercado.

2.4.5 Dispositivos de Proteção.

São equipamentos que conseguem detectar sobretensão transitória na rede elétrica Silva et al. (2023). Assim, são equipamentos que auxiliam na proteção do sistema fotovoltaico.

De acordo com Brasil (2023), os principais sistemas de proteção para sistemas fotovoltaicos são o Sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) e Dispositivos de proteção contra surto (DPS), onde protegem contra raios e contra variações rápidas e fortes na tensão elétrica, respectivamente.

Figura 7 – Inversor Fotovoltaico.



Fonte - (WEG, 2023).

2.4.6 Medidor bidirecional.

O Medidor Bidirecional é um equipamento de medição (Figura 8), que segundo ANEEL (2023) tem como mínima funcionalidade diferenciar a energia consumida pela instalação e a injetada na rede elétrica. Logo, este dispositivo, é fundamental para o pleno e correto funcionamento de um sistema *On-Grid*. É importante ressaltar que não deve-se confundir energia injetada à rede com a energia consumida, pois é do balanço entre as mesmas que é determinado os créditos gerados e realizada a leitura da conta de energia.

É importante ressaltar que a responsabilidade pelo fornecimento e instalação do medidor bidirecional recai sobre a concessionária de energia. Portanto, não é necessário adquirir o equipamento separadamente, pois a concessionária será responsável por fornecê-lo e instalá-lo como parte do processo de conexão do sistema à rede elétrica.

Figura 8 – Medidor Bidirecional.



Fonte - (EASY., 2023).

2.5 Software HelioScope.

Com os crescentes avanços tecnológicos, diversas ferramentas foram desenvolvidas e aprimoradas para possibilitar a realização de trabalhos mais eficazes, rápidos e coesos com a realidade. Dentre elas, é válido destacar o *HelioScope*, disponível em Aurora (2024), que se apresenta como um instrumento versátil e confiável na elaboração de projetos fotovoltaicos que vão desde empreendimentos residenciais até grandes usinas.

O *HelioScope* será utilizado no corrente trabalho na versão teste. Esta versão permite, de forma gratuita, analisar diferentes condições para o sistema projetado, afim de se alcançar uma proposta mais adequada à realidade da escola. Além disto, possibilita a exploração de diferentes aspectos que cercam o objeto de estudo e influenciam na geração energética, sendo válido destacar:

1. Direcionamento das placas;
2. Sombreamento;
3. Arranjos dos módulos fotovoltaicos (*Strings*);
4. Localização da instalação do sistema;
5. Fontes das perdas do sistema;
6. Produção mensal de energia.

3 Metodologia.

3.1 Descrição da área de estudo.

Para a realização do presente trabalho, torna-se imprescindível a obtenção dos dados relativos ao consumo de energia elétrica, por meio de uma pesquisa de campo a ser conduzida nas instalações da escola. Este procedimento visa proporcionar uma compreensão abrangente dos padrões no consumo energético ao longo do tempo.

Considerando que o foco da investigação recai sobre uma instituição pública, os dados foram obtidos por meio da análise do histórico da fatura de energia elétrica.

3.2 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico.

3.2.1 Irradiação solar.

Através do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (BRITO., 2018), no programa *SunData*, é possível a aquisição de dados acerca dos valores da irradiação Solar. O *SunData* é destinado ao cálculo da irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do Brasil, sendo uma ferramenta de apoio ao dimensionamento de sistemas fotovoltaicos.

3.2.2 Dimensionamento dos módulos fotovoltaicos e cálculo da área ocupada.

Levando em consideração as limitações físicas do objeto de estudo e com o intuito de elaborar um projeto que atenda plenamente às necessidades da escola, a seleção do equipamento é pautada na análise de produtos disponíveis no mercado e em seus atributos técnicos, tais como potência gerada, eficiência e vida útil. Posto isto, foi selecionado o painel JKM575N-72HL4-V da marca Jinko. É importante ressaltar que, o módulo selecionado possui os dados técnicos descrito na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados do painel selecionado.

Dados Técnicos	
Potência no Ponto Máximo de Potência	575 [W]
Tensão no Ponto Máximo de Potência	42,22 [V]
Corrente no Ponto Máximo de Potência	13,62 [A]
Tensão em Circuito Aberto	50,88 [V]
Corrente de Curto Circuito	14,39 [A]
Eficiência	22,26 [%]
Dimensões	2278 x 1134 x 35 [mm ³]
Peso	28 ±5% [kg]
Marca	Jinko
Garantia	Potência linear de 87,4% aos 30 anos

Fonte - (SOLAR., 2024b).

Para o dimensionamento dos módulos faz-se necessário o cálculo da Potência de Pico do sistema fotovoltaico, essa potência pode ser calculada a partir da Equação 2 como apresentado em Silva et al. (2023).

$$P_{PV} = \frac{E/TD}{HSP} \quad (2)$$

Onde:

- P_{PV} → Potência de pico do sistema fotovoltaico [w];
- E → Consumo diário médio da escola analisada [Wh/dia];
- TD → Taxa de desempenho do sistema [adimensional];
- HSP_{ma} → Horas de sol pleno diário em média.

Conforme descrito por Amaral (2023), o conceito de Horas de Sol Pico ou Horas de Sol Pleno (HSP) refere-se à quantidade de horas em que a irradiância solar atinge $1 \frac{KW}{m^2}$, representando a energia acumulada ao longo do dia de maneira equivalente à energia fornecida pelo sol naquela localidade específica. Ainda, HSP abrangem um intervalo entre duas e três horas antes e depois do meio-dia solar e pode ser definida conforme a Equação 3. Também é mencionado que sistemas fotovoltaicos possuem uma Taxa de Desempenho (TD) entre 70 e 80%. O presente trabalho adotará um Taxa de Desempenho de 75%.

$$HSP = \frac{\bar{G}}{1[\frac{kw}{m^2}]} \quad (3)$$

Frente à exposição anterior e em concordância com as abordagens de Silva et al. (2023) e de Macedo et al. (2017), torna-se factível realizar o cálculo do número mínimo de painéis solares necessário para suprir as demandas da escola, utilizando a Equação 4. É fundamental ressaltar que N_{PPV} deve ser expresso como um valor inteiro, garantindo que o resultado derivado da Equação 4 seja arredondado para cima.

$$N_{PPV} = \frac{P_{PV}}{P_N} \quad (4)$$

Onde:

- N_{PPV} → Quantidade de painéis necessários;
- P_N → Potência nominal[w].

Dada a utilização da tecnologia, é inerente que ocorram perdas de eficiência. Portanto, é crucial realizar simulações para garantir a escolha apropriada do N_{PPV} a fim de atender às necessidades de consumo durante toda a vida útil do equipamento. Reorganizando a Equação 4 e levando em consideração a degradação do sistema é possível calcular a potência gerada por um determinado número de placas ao longo dos anos, conforme estabelecido pela Equação 5 onde p é o percentual das perdas relativas a degradação das placas e $(t \geq 1)$ é o tempo instalado[anos].

$$P_{PV_t} = N_{PPV} \cdot P_N \cdot (1 - p)^{t-1} \quad (5)$$

É notório observar a importância do cálculo da área ocupada pelo sistema, pois é imprescindível que o mesmo tenha a capacidade de ser efetivamente instalado na escola. Com base nos dados apresentados na Tabela 4 e definindo A_{1PPV} como a área de uma única placa fotovoltaica, verifica-se que esta possui aproximadamente $2,583[m^2]$ de área. Assim, de acordo com a Equação 6, calcula-se a área total que é ocupada pelos painéis dimensionados.

$$A_{painel} = N_{PPV} \cdot A_{1PPV} \quad (6)$$

Assim, o dimensionamento dos módulos e o cálculo da área ocupada por eles deve ser realizado segundo a sequência descrita na Tabela 5, levando em consideração as particularidades e aspectos que impactam no desempenho dos mesmos.

Tabela 5 – Tabela com a metodologia adotada para o dimensionamento dos painéis e cálculo da área ocupada.

Sequência metodológica utilizada.		
Passos	Descrição	Equação
1	Seleção do painel	-
2	Cálculo da potência de pico	$P_{PV} = \frac{E/TD}{HSP}$
3	Número de placas	$N_{PPV} = \frac{P_{PV}}{P_N}$
4	Potência gerada no tempo	$P_{PV_t} = N_{PPV} \cdot P_N \cdot (1 - p)^{t-1}$
5	Área ocupada	$A_{painel} = N_{PPV} \cdot A_{1PPV}$

Fonte - Autor

3.2.3 Dimensionamento do Inversor.

Para o dimensionamento do inversor, inicialmente é necessário o cálculo da tensão total série do sistema. Segundo Coelho (2016), esta tensão pode ser expressa como apresentada na Equação 7. Sendo V_{TS} a Tensão Total Série dos painéis em [V], V_{OP} a Tensão de Circuito Aberto do painel em [V] e N_{PS} o Número de Módulos Fotovoltaicos.

$$V_{ts} = V_{OP} \cdot N_{PS} \quad (7)$$

É válido destacar que o sistema fotovoltaico sofre influência da temperatura, perdendo eficiência com o aumento da mesma. Segundo Macedo et al. (2017), para a correção dos efeitos da temperatura é necessário considerar valores para o Coeficiente de temperatura(β) e à própria temperatura de operação, sendo estas $\beta = \frac{2,3mV}{celula^{\circ}C}$ e $47^{\circ}C$ respectivamente.

A Tensão Corrigida pode ser dada segundo a Equação 8, onde $V_{\Delta T}$ é a Tensão Corrigida pelo efeito da temperatura[V] e $\Delta t = 47 - 25[^{\circ}C]$ é Variação de Temperatura Possível[$^{\circ}C$]

$$V_{\Delta T} = V_{ts} \cdot (1 - \beta \Delta t) \quad (8)$$

Conforme apresentado em Macedo et al. (2017), o próximo passo é o cálculo da Corrente Máxima que o sistema pode suportar (vide Equação 9). Onde I_{PVMax} é a Corrente Máxima de entrada [A], Pt_{gerada} representa a Máxima Potência Gerada pelo sistema [w] e $V_{\Delta T}$ Tensão Corrigida pelo efeito da temperatura [V].

$$I_{PVMax} = \frac{Pt_{gerada}}{V_{\Delta T}} \quad (9)$$

Consequentemente, torna-se viável a seleção de um Inversor mediante a análise dos *datasheets* disponíveis no mercado. Para tal, é imprescindível considerar os dados previamente obtidos e seguir a sequência lógica descrita na Tabela 6.

Tabela 6 – Tabela com a sequência metodológica para os cálculos adicionais necessários para escolha do Inversor.

Sequência metodológica utilizada.		
Passo	Descrição	Equação
1	Tensão série dos painés	$V_{ts} = V_{OP} \cdot N_{PS}$
2	Tensão corrigida	$V_{\Delta T} = V_{ts} \cdot (1 - \beta \Delta t)$
3	Corrente máxima de entrada	$I_{PVMax} = \frac{Pt_{gerada}}{V_{\Delta T}}$

Fonte - Autor.

3.2.4 Equipamentos de segurança.

Consoante a Silva et al. (2023), os disjuntores devem ser dimensionados seguindo a ABNT NBR 5410 de 2004, onde $I_{circuito} \leq I_{disjuntos} \leq I_{limite}$.

De acordo com Silva et al. (2023), todas as edificações dentro do território brasileiro, que forem alimentadas total ou parcialmente por linha aérea, e se situarem onde há a ocorrência de trovoadas em mais de 25 dias por ano, devem ser providas de Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS), segundo a ABNT (2004).

3.3 Simulações HelioScope.

Para a realização da simulação do sistema fotovoltaico projetado, foram escolhidas as áreas disponíveis situadas sobre os telhados da escola. A escolha é pautada no fato que estes locais não são utilizados em outras atividades, garantem segurança ao sistema e são áreas de maior incidência solar.

Tendo em vista que, as alturas das construções que fazem parte da escola são conhecidas e com o auxílio do *Google Earth Pro* (GOOGLE, 2024), onde pode ser obtido os dados de elevação do terreno do terreno da mesma, foram construídas as simulações necessárias.

É importante considerar que a cidade pode crescer ao longo dos anos. Assim, será realizada uma simulação na qual possíveis empreendimentos sejam construídos ao redor da escola.

A escolha do Módulo Fotovoltaico adotado tem um impacto direto no custo de implantação, produção anual, entre outros aspectos que norteiam o sistema projetado. Posto isto, será realizado uma simulação com um Painel Solar JKM470N-60HL4-V para realizar um paralelo entre esta placa e a selecionada em projeto (JKM575N-72HL4-V).

Se a área ocupada pelo Sistema PV for inferior à área disponível, uma última simulação será conduzida com o propósito de determinar a capacidade de geração de energia que a escola detém.

Com a realização destas simulações são obtidos relatórios que constam dados relativos a Geração de Energia do Sistema PV, Fontes de Perdas do Sistema, Produção Anual, Taxa de Desempenho, Produção Mensal, entre outros.

Inicialmente, os locais para a instalação dos Módulos PV foram determinados. Em conjunto com os cálculos realizados para determinar o número de placas necessárias, foi analisado se a área disponível no telhado da escola é adequada para a instalação, além de como as *strings* das placas solares serão organizadas. Assim foram gerados os relatórios utilizados nas análises.

3.4 Análise financeira.

3.4.1 Custo inicial para implantação do Sistema PV

A partir de Solar (2024), empresa especializada em venda de equipamentos de sistemas de energia solar para empresas do setor, foi realizado o orçamento do investimento relativo a compra dos equipamentos necessários ao sistema. É importante observar que os preços praticados pela empresa são direcionados à revendedores, portanto, os valores devem ser aumentados em 30% para contemplar a venda ao consumidor final.

Conforme Santos (2024), durante o orçamento de um sistema fotovoltaico, 70% do custo total deste sistema corresponde aos equipamentos. Assim, é possível obter I_0 a partir da Equação 10.

$$0,7 \cdot I_0 = I_{\text{equipamento}} \quad (10)$$

3.4.2 Payback.

Para realizar uma análise mais detalhada e examinar o retorno financeiro decorrente do uso total da energia gerada anualmente pela escola, levando em consideração tanto a degradação do sistema quanto os reajustes na tarifa de energia, será desenvolvido uma tabela com a Energia Gerada pelo sistema, a Receita Gerada pela energia produzida, Custos pagos Anualmente, Economia Gerada e Análise Financeira.

Com base no relatório produzido pelo software *HelioScope*, será obtido os dados referentes à quantidade de energia gerada pelo sistema projetado ao longo de um ano. Diante disto e levando em consideração as perdas ocorridas ao longo dos anos, é possível estimar a energia gerada ao longo de 30 anos, o cálculo para geração ao longo do anos é realizada de acordo com Equação 11. É utilizado 30 anos para análise, pois é o tempo de garantia dada na ficha técnica dos módulos PV.

$$E_{ano} = E_{ano-1} \cdot (1 - p) \quad (11)$$

- E_{ano} → Energia gerada no ano;
- E_{ano-1} → Energia gerada no ano anterior;
- p → Perda relativa a degradação das placas, $0,42 \frac{\%}{ano}$

Ainda, para os cálculos da análise financeira, será utilizado o índice médio de reajuste tarifário de 9,02% observado no ano de 2023, conforme documentado em Neoenergia (2024a). Deste modo, a receita gerada(R) pela implantação do sistema pode ser obtida através da Equação 12.

$$R = E_{ano} \cdot C_{kWh} \cdot (1 + reajuste) \quad (12)$$

Como já dito anteriormente, a utilização de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica não elimina completamente o gasto com conta de energia. Isso se deve à necessidade de pagar o custo de disponibilidade($C_{disponibilidade}$) e ao custo associado ao fio B. Com a aprovação da Lei N°14.300, o Brasil está passando por uma transição em relação ao pagamento pelo do fio B. Para fins deste estudo, foi considerado um cenário mais desafiador, no qual 100% do custo do fio B será pago. Assim, a mesma irá pagar uma quantia, expressa pela Equação 13, por ano. É válido ressaltar que o valor ano após ano deve ser reajustado. Em conformidade com Elétrica (2024), o custo com a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição relacionada ao fio B é de $234,26 \frac{R\$}{MWh}$.

$$C_{ano} = (C_{disponibilidade} + C_{FioB}) \cdot (1 + reajuste) \quad (13)$$

Diante disto, com o auxílio da Equação 12 e Equação 13, é possível computar o fluxo de caixa (FC) obtidos anualmente pela implantação do sistema, este pode ser representado pela Equação 14.

$$FC = R - C_{ano} \quad (14)$$

As análises financeiras (AF) serão realizadas a partir da Equação 15, onde ficarão correlacionados os valores investido com o fluxo de caixa anual que o sistema gera. Ressaltando que o ano 0 é relativo a data de implantação do sistema, logo neste momento $AF = -I_0$. Desse modo será visto em quantos anos o investimento inicial retornará de forma positiva para instituição.

$$AF = FC + AF_{ano-1} \quad (15)$$

Desse modo, a primeira análise financeira será pautada no cenário em que a escola utiliza integralmente a energia elétrica produzida pelo sistema fotovoltaico dimensionado no presente trabalho.

Na segunda análise financeira, são levados em consideração os custos pagos com a eletricidade sem o sistema está implantado (R_2) e a estimativa do custo a ser pago caso SPV for implantado. A diferença entre ambos representa a economia atribuída à utilização do sistema projetado e será considerada como o fluxo de caixa para esta análise.

Assim, diante dos cálculos apresentados anteriormente, a metodologia abordada nessa etapa do projeto será realizada conforme apresentada e detalhada na Tabela 7.

Tabela 7 – Metodologia utilizada para a realização das análises financeiras.

Análise financeira		
Passo	Descrição	Equação
1	Custo com equipamentos	$I_{equipamento}$
2	Custo total investido	$0,7 \cdot I_0 = I_{equipamento}$
Primeira análise financeira		
Passo	Descrição	Equação
3	Energia gerada no ano	$E_{ano} = E_{ano-1} \cdot (1 - p)$
4	Receita gerada no ano	$R = E_{ano} \cdot C_{kWh} \cdot (1 + reajuste)$
5	Custo com energia elétrica	$C_{ano} = (C_{disponibilidade} + C_{FioB}) \cdot (1 + reajuste)$
6	Fluxo de caixa	$FC = R - C_{ano}$
7	Análise financeira 1	$AF = FC + AF_{ano-1}$
Segunda análise financeira		
Passo	Descrição	Equação
8	Custo anterior com eletricidade	R_2
9	Fluxo de caixa	$FC = R_2 - C_{ano}$
10	Análise financeira 2	$AF = FC + AF_{ano-1}$

Fonte - Autor

4 Resultados e Discussões.

4.1 Resultados e Discussões da Descrição da área de estudo.

A Escola utilizada para o estudo de caso está localizada na Mata Sul de Pernambuco nas coordenadas 8,329516°S 35,353576°W, e conta com 9 (nove) salas de aula, essas salas são destinadas à 18 (dezoito) turmas, que fomentam o ensino para aproximadamente 500 estudantes. É válido ressaltar que dentre as 18 turmas 14 (quatorze) são de ensino integral, onde 9 turmas iniciam às aulas 07:30 e encerram às 14:40 horas e 5 turmas iniciam as aulas às 15:00 finalizam às 21:40. Têm-se também 4 turmas destinadas para Educação de Jovens e Adultos (EJA) que funciona das 18:40 às 21:40. A escola possui, em seu arcabouço estrutural, quadra poliesportiva, 5 banheiros, cozinha, depósito de merenda, refeitório, sala de professores, secretaria, sala de gestão, laboratório de informática, laboratório multifuncional, 3 almoxarifados. É válido pontuar que o refeitório é compartilhado com uma escola circo vizinha.

Com base no exposto, o local demonstra um uso frequente da rede elétrica. Isso se deve aos diversos horários de utilização por parte dos alunos e professores, bem como, à presença de equipamentos que necessitam permanecer ligados durante todo o dia.

Por meio da pesquisa, foram obtidos os dados relativos ao histórico de consumo elétrico (vide Tabela 8), sendo registrado o total de 10 meses. É importante ressaltar que, a escola utiliza uma rede elétrica trifásica. Assim, devido à obrigatoriedade do pagamento relativo ao custo de disponibilidade, será subtraído 100 kWh da consumo médio desta, pois dessa forma é ocorrerá o consumo dessa energia que inevitavelmente será paga. Além disto, é evidente que o consumo elétrico possui variações conforme a época do ano. Em janeiro, devido as férias escolares, é o mês que apresentou menor consumo.

Tabela 8 – Dados de consumo do objeto de estudo.

HISTÓRICO DO CONSUMO DE ENERGIA		
MÊS	ANO	CONSUMO (kWh)
Novembro	2021	2.557
Dezembro	2021	2.899
Janeiro	2022	1.933
Fevereiro	2022	2.665
Março	2022	3.883
Abril	2022	3.469
Mai	2022	4.098
Junho	2022	3.782
Julho	2022	2.533
Agosto	2022	3.548
CONSUMO MÉDIO		3.136,7
CONSUMO MÉDIO - 100 [KWh]		3.036,7
CONSUMO MÉDIO DIÁRIO $[\frac{KWh}{dia}]$		101,23

Fonte - Autor

4.2 Resultados e Discussões do Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico.

Ao realizar a verificação dos dados de irradiação solar no programa *SunData*, fornecido por CRE-SESB (2018), foi constatada a inexistência de informações referentes à localidade em questão. Diante desse cenário, faz-se necessário recorrer aos dados dos locais mais próximos disponíveis. Essa abordagem é viável, considerando que ambas as áreas pertencem à mesma região geográfica e apresentam similaridades nas características climáticas.

Desta forma, a utilização dos dados do local adjacente se configura como uma alternativa pragmática para suprir a ausência de informações específicas, mantendo a integridade e representatividade na análise realizada. Posto isto, foi selecionada as coordenadas 8,301°S 35,349°W, localizada a 3,2 km do ponto estudado e pertencente ao município de Escada-PE.

Tabela 9 – Dados de irradiação.

Irradiação solar diária média (\bar{G}_d) [$\frac{kWh}{m^2 \cdot dia}$]	
Janeiro	5,49
Fevereiro	5,56
Março	5,57
Abril	4,88
Mai	4,19
Junho	3,83
Julho	3,89
Agosto	4,47
Setembro	5,18
Outubro	5,43
Novembro	5,75
Dezembro	5,79
Média	5,00
Delta	1,96

Fonte - (BRITO., 2018)

Conforme estabelecido na Equação 3 e juntamente com a Equação 2, foram determinadas as horas de sol pleno (HSP) de $5 \frac{d}{dia}$ e a potência de pico do sistema fotovoltaico ($P_{PV} \approx 26.981,18$). Com base nos resultados obtidos e conforme demonstrado na Equação 4, chega-se à conclusão que, inicialmente, são necessários 47 painéis para atender a demanda da escola.

De acordo com os dados presentes na Tabela 4, o fabricante assegura uma potência linear de 87,4% após 30 anos. Isso implica em uma redução média de potência gerada de 0,42% por ano. Desse forma, é factível proceder ao cálculo da potência teórica gerada pelo sistema ano após ano, levando em consideração o decaimento da eficiência dos módulos.

Com o propósito de determinar o número mínimo de placas necessárias para suprir a potência desejada, mesmo após 30 anos da instalação, foram efetuadas simulações com diferentes quantidades de painéis. Assim, foi analisado o comportamento da geração de energia ao longo do tempo em relação ao número de placas utilizadas, os resultados destas simulações podem ser consultados na Tabela 10, Figura 10, Figura 11,

Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15 e Figura 16.

Tabela 10 – Potência gerada no 30° ano.

QUANTIDADE DE PLACAS	POTÊNCIA GERADA NO 30° ANO [W]
47	23.919,78
48	24.428,71
49	24.937,65
50	25.446,58
51	25.955,51
52	26.464,44
53	26.973,37
54	27.482,30

Fonte - Autor.

Figura 9 – Potência gerada por 47 placas.



Fonte - Autor.

Figura 10 – Potência gerada por 48 placas.



Fonte - Autor.

Figura 11 – Potência gerada por 49 placas.



Fonte - Autor.

Figura 12 – Potência gerada por 50 placas.



Fonte - Autor.

Figura 13 – Potência gerada por 51 placas.



Fonte - Autor.

Figura 14 – Potência gerada por 52 placas.



Fonte - Autor.

Figura 15 – Potência gerada por 53 placas.



Fonte - Autor.

Figura 16 – Potência gerada por 54 placas.



Fonte - Autor.

Desse modo, para que a energia gerada satisfaça o consumo ao longo dos anos é necessário a utilização de 54 placas, estas ocuparam uma área de $139,482[m^2]$. É válido ressaltar que, durante os primeiros anos haverá um superavit na geração de energia pelo sistema e os créditos gerados possuem validade de 60 meses.

Com o auxílio da Equação 7, Equação 8 e Equação 9 foi possível definir parâmetros que auxiliaram na escolha do Inversor à ser adotado em projeto. A partir destas equações foram obtidos os dados expressos na Tabela 11.

Tabela 11 – Dados calculados para escolha do Inversor utilizado.

DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR	
POTÊNCIA GERADA [W]	31.050,00
$V_{\Delta T}$ [V]	2.608,50
$I_{PVM_{max}}$ [A]	11,90

Fonte - Autor.

Figura 17 – Inversor Growatt, modelo MAC36KTL3-XL 36KW



Fonte - (SOLAR., 2024a)

Tabela 12 – Dados técnicos do inversor selecionado.

DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR	
Alta eficiência	98,8 %
Tensão máx. de entrada [VCC]	1100
Tensão nominal de entrada [VCC]	360
Corrente DC máx. por string [A]	52
Potência nominal de saída [KW]	36
Tensão nominal trifásico [V]	127/220
Corrente máx. de saída [A]	94,5
Quantidade de MPPT [A]	3

Fonte - (SOLAR., 2024a)

Com base no catálogo apresentado por Aldo (2024), o Inversor Growatt modelo MAC36KTL3-XL 36KW (Figura 17) foi selecionado para este projeto. Essa decisão foi fundamentada nos dados apresentados na Tabela 11, nos equipamentos presentes no catálogo do fornecedor e nas especificações técnicas detalhadas na Tabela 12. Além disso, a marca Growatt é amplamente reconhecida e utilizada em Sistemas Fotovoltaicos devido à confiabilidade e qualidade dos produtos.

Das características primordiais do inversor selecionado, destacam-se a Potência Nominal de Saída de 36 kW, a Tensão Máxima de Entrada de 1100 VCC por MPPT, 3 MPPT e a Corrente DC Máxima por *String* de 26-32 A. Salienta-se que, o dimensionamento está se caracterizando pelo conservadorismo, isto é tolerável, uma vez que garante confiabilidade em caso de sobre cargas.

Tendo em vista o exposto e em consonância com a seleção do inversor, conforme descrito tecnicamente em Solar (2024a), o equipamento escolhido já possui os dispositivos de proteção contra polaridade reversa CC, interruptor CC, proteção de sobretensão CC/CA tipo II, monitoramento de falta à terra, proteção de curto-circuito de saída e monitoramento da rede elétrica.

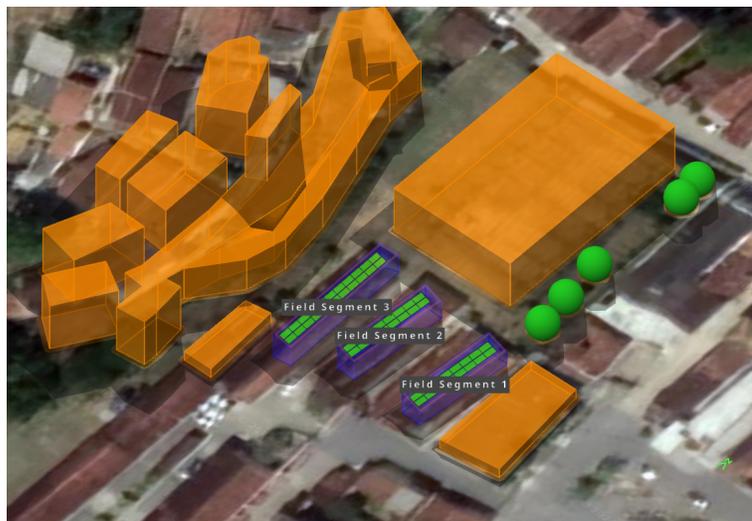
A utilização da *String Box*, equipamento que inclui o Dispositivo de Proteção Contra Sobretensão

(DPS), Dispositivo de Proteção Contra Sobrecorrente (disjuntor ou fusível) e chave *ON/OFF*, é facultativa haja visto que o Inversor selecionado já é composto por tais dispositivos.

4.3 Resultados e Discussões das Simulações

Na primeira simulação, que representa o cenário atual da escola com a implantação do sistema dimensionado anteriormente, é possível estabelecer a localização das Placas Solares, as quais estão agrupadas conforme a Figura 18. Observa-se que, devido a localização geográfica da escola, o sistema não sofrerá influência de sombreamento. Posto isso, o local se apresenta favorável à implantação do sistema fotovoltaico. A simulação inicial possibilitou estimar a geração anual do sistema ($48,15[MWh]$), taxa de desempenho ($78,9\%$), potência do sistema instalado ($31,1[KW]$), e kWh/kWp de 1.550,8, conforme Figura 19.

Figura 18 – Vista do arranjo modelado.

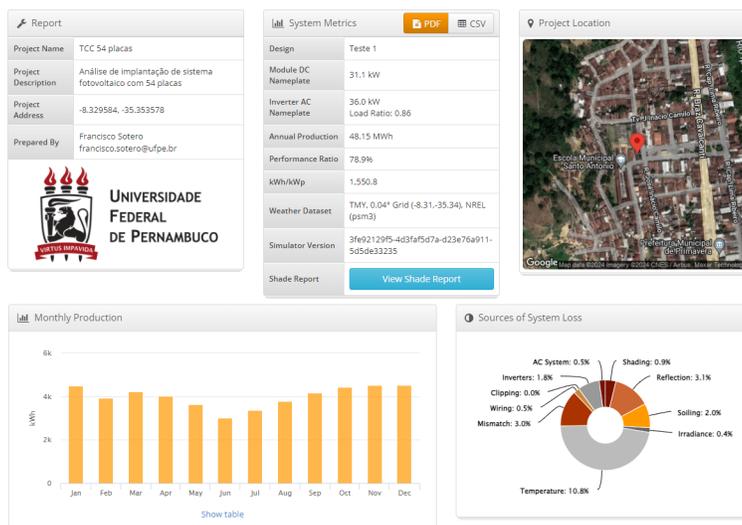


Fonte - Autor.

No cenário subsequente, onde é considerando o crescimento das edificações urbanas na cidade (Figura 20), pode ser observado que o sombreamento torna-se fator de grande influência nas perdas do sistema, sendo responsável por $22,7\%$ destas, em consonância com a Figura 21. Neste cenário é importante ressaltar a geração anual do sistema de $35,88[MWh]$, taxa de desempenho de $58,8\%$ e um kWh/kWp de 1.155,6.

Um Sistema PV é suscetível a ação de diferentes fatores, que induzem prejuízos na produção de energia. Observando os dois relatórios produzidos, é possível observar que a presença de sombra acarreta uma grande queda na produção anual de energia e por consequência no desempenho do sistema. Este fato é observado uma vez que, na primeira simulação o sistema obteve uma produção anual de $48,15[MWh]$ com uma eficiência de $78,9\%$, enquanto que a simulação com incidência de sombreamento apresenta $35,88[MWh]$ de produção anual e $58,8\%$ de desempenho. Outrossim, quando comparado as fontes de perdas dos sistemas (Tabela 13) o sombreamento é um dos principais fatores. É importante salientar também que, a temperatura é uma fonte de perdas expressivas em ambas as simulações.

Figura 19 – Dados fornecido pela simulação do sistema projetado.



Fonte - Autor.

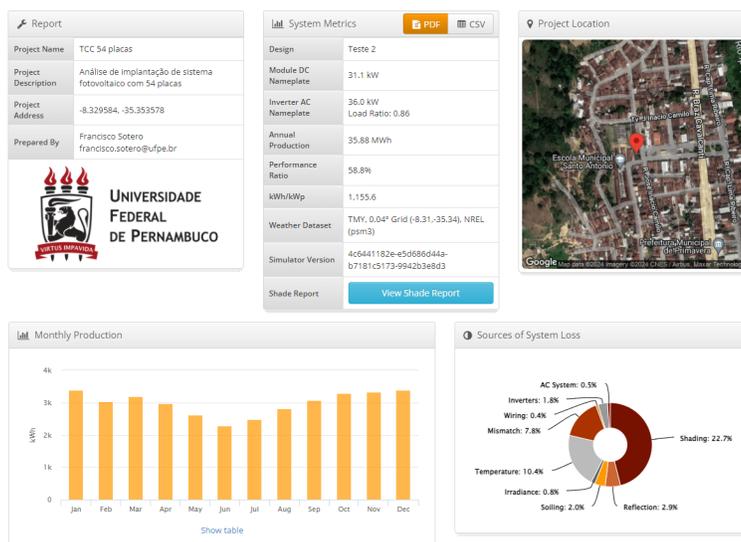
Figura 20 – Vista do arranjo modelado com sombreamento.



Fonte - Autor.

Durante a simulação realizada com o Painel Solar modelo JKM470N-60HL4-V, constatou-se que o sistema requer a instalação de um total de 66 módulos para alcançar uma produção semelhante àquela obtida com o uso do módulo fotovoltaico modelo JKM575N-72HL4-V. Os resultados obtidos com este sistema também incluem a produção anual de 48,14[MWh], uma taxa de desempenho de 78,9%, potência instalada de 31,0[kW] e kWh/kWp de 1.551,9. Os resultados obtidos estão conforme apresentado na Figura 22. Ao realizar uma análise de mercado em Solar (2024), estimou-se que o custo para revenda dos equipamentos necessários para este sistema é de R\$58.022,33. Desse modo, o custo para o consumidor final é de R\$75.429,03, acarretando em um custo de instalação de R\$107.755,76.

Figura 21 – Relatório com os dados referente a simulação com sombreamento.



Fonte - Autor.

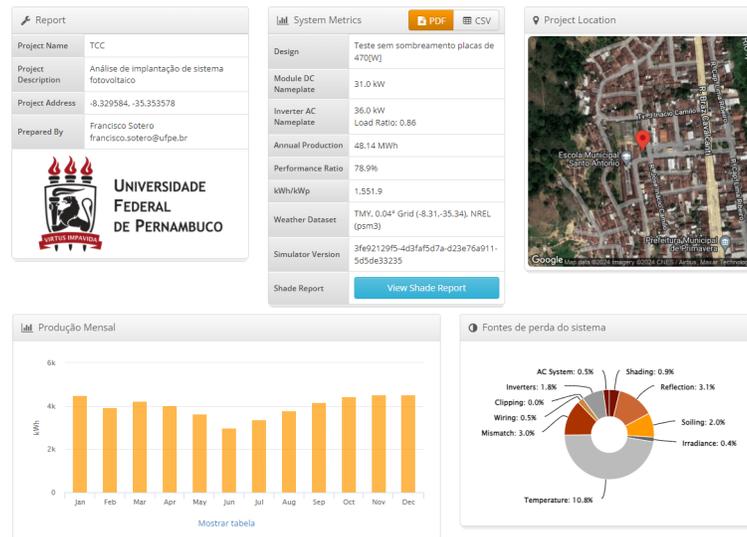
Tabela 13 – Comparação das perdas dos Sistemas Fotovoltaicos com e sem sombreamento.

PERDAS DOS SISTEMAS[%]		
FONTE	SEM SOMBREAMENTO	COM SOMBREAMENTO
SISTEMA CA	0,5	0,5
INVERSORES	1,8	1,8
FIAÇÃO	0,5	0,4
INCOMPATIBILIDADE	3,0	7,8
TEMPERATURA	10,8	10,4
IRRADIÂNCIA	0,4	0,8
SUJEIRA	2	2
REFLEXÃO	3,1	2,9
SOMBREAMENTO	0,9	22,7

Fonte - Autor.

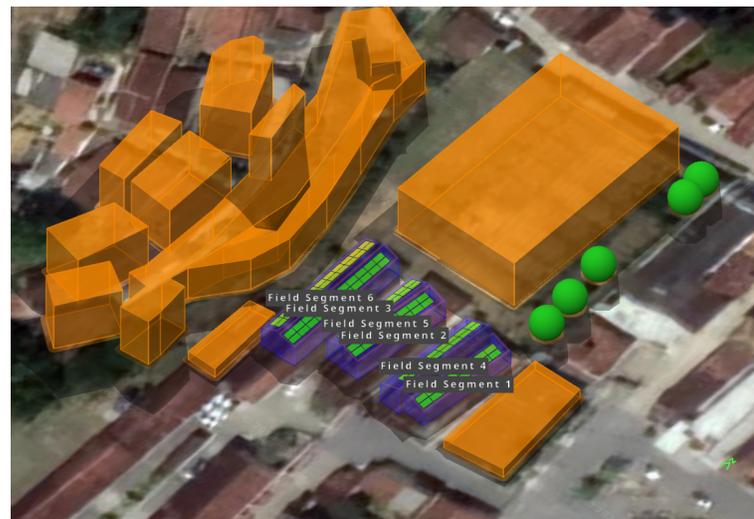
Diante da primeira simulação, é possível notar que o sistema proposto não irá ocupar toda a área disponível no telhado da escola. Desse modo, foi realizada a quarta simulação para verificar a capacidade total de geração da área disponível. Assim, constatou-se que, caso a escola instalasse o sistema que ocupasse totalmente a área disponível, esta teria uma potência instalada de $62,1[kW]$, com uma produção anual de $93,20[MWh]$, uma taxa de desempenho de $76,4\%$ e $1.500,9$ de kWh/kWp . Neste cenário, o sistema deve ser composto por 2 inversores (MAC 36KTL3-XL) e 108 módulos solares (JKM575N-72HL4-V). Também é possível constatar, através da Figura 23, que nesse contexto ocorrerá sombreamento em parte do sistema. Desse modo, a presente hipótese, expressa os resultados descritos na Figura 24.

Figura 22 – Relatório com os dados referente a simulação com o módulo solar JKM470N-60HL4-V.



Fonte - Autor.

Figura 23 – Vista do arranjo modelado utilizando a capacidade total de instalação.

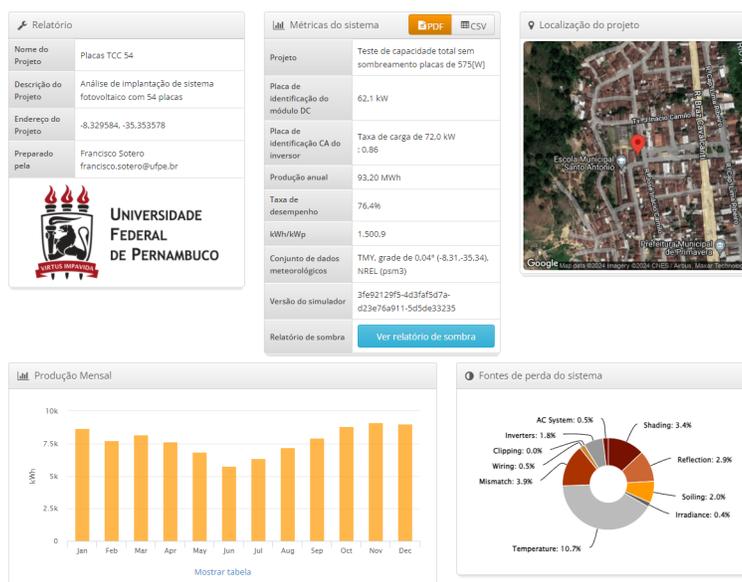


Fonte - Autor.

4.4 Resultados e Discussões da Análise Financeira.

Com base no dimensionamento e simulações realizadas, e tendo em vista os valores dos equipamentos consultados, verifica-se que o sistema utilizando a placa JKM470N-60HL4-V necessita de um custo maior para a aquisição dos equipamentos, assim a análise financeira é pautada na utilização do modelo JKM575N-72HL4-V. Posto isto, deverá ser investido em equipamentos a quantia estabelecida na Tabela 14. Assim, de acordo com a Equação 10, o custo inicial para a instalação do sistema fotovoltaico será de aproximadamente R\$104.283,74.

Figura 24 – Relatório com os dados referente a simulação da capacidade total de instalação.



Fonte - Autor.

Tabela 14 – Preço de equipamentos, levantados a partir de pesquisa no mercado.

INVESTIMENTO INICIAL ESTIMADO	
Equipamentos	Quantidade
PAINEL SOLAR JINKO JKM575N-72HL4-V	54
INVERSOR SOLAR GROWATT ON GRID MAC36KTL3-XL	1
ESTRUTURA SOLAR GROUP ASMTC240X000MD04 4 PAINELIS FIXADOR GANCHO TELHA COLONIAL SMART	14
CABO SOLAR FOTOVOLTAICO FLEXIVEL 6MM 1,8KV CC RL200 PRETO	400 [m]
CABO SOLAR FOTOVOLTAICO FLEXIVEL 6MM 1,8KV CC VERMELHO RL200 VERMELHO	400 [m]
STAUBLI CONECTOR MC4 CONECTOR MC4 STAUBLI UR PV-KBT4/6II ACOPLADOR FEMEA / PV-KST4/6II ACOPLADOR MACHO	6
CUSTO [R\$]	56.152,78
CUSTO PARA CONSUMIDOR FINAL [R\$]	72.998,61

Fonte - Autor.

Com a simulação realizada no *HelioScope* do sistema proposto para instalação na escola, foi possível adquirir os dados de estimativa para a geração de energia mensal, os quais estão detalhados na Tabela 15.

É importante ressaltar que, analisando a conta de energia tem-se que a escola é classificada como consumidor B3 e, conforme Neoenergia (2024b), a instituição escolar está sujeita a uma tarifa de 0,76447000 (C_{kWh}) [$\frac{R\$}{kWh}$]. Além disto, esta instituição deverá arcar com um custo de disponibilidade equivalente ao valor de 100[KWh]. Assim, os custos pagos anualmente estão de acordo com a Equação 16.

Tabela 15 – Geração de energia estimada ao longo de um ano.

MÊS	ENERGIA GERADA (kWh)
JANEIRO	4.502,5
FEVEREIRO	3.925,1
MARÇO	4.219,0
ABRIL	4.032,5
MAIO	3.626,4
JUNHO	3.000,1
JULHO	3.368,3
AGOSTO	3.795,4
SETEMBRO	4.174,1
OUTUBRO	4.445,0
NOVEMBRO	4.528,9
DEZEMBRO	4.534,8
ANO	48.152,10

Fonte - Autor.

$$C_{ano} = (C_{disponibilidade} + C_{FioB}) \cdot (1 + \text{reajuste})$$

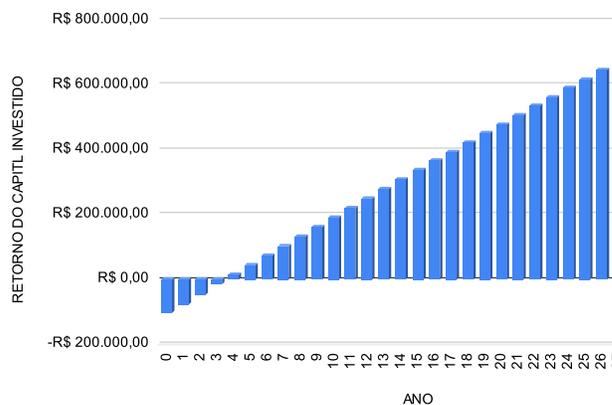
$$C_{disponibilidade} = 100[kWh] \cdot C_{KWh} \cdot 12$$

$$C_{FioB} = 0,23426 \cdot E_{ano}$$

(16)

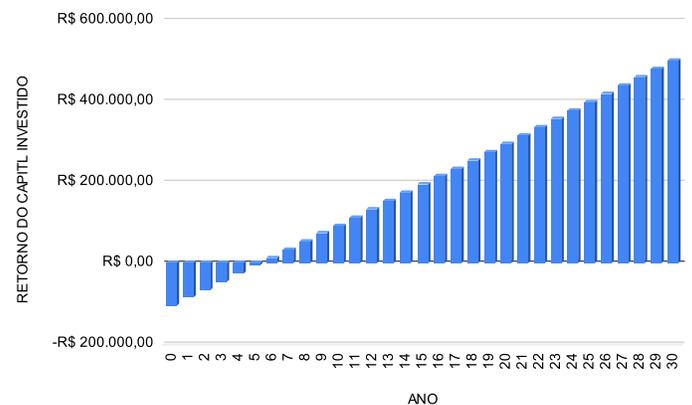
A análise financeira realizada se comportou como descrito na Tabela 16, Figura 25 e Figura 26. É importante visualizar que a primeira análise é válida caso a escola venha a ter um consumo anual idêntico ao produzido pelo sistema. A segunda simulação levou em consideração que a escola mantenha o pagamento médio ao longo dos anos.

Figura 25 – Primeira análise financeira.



Fonte - Autor.

Figura 26 – Segunda análise financeira.



Fonte - Autor.

Tabela 16 – Tabela para análise o retorno do capital investido.

ANÁLISE DO INVESTIMENTO NO TEMPO						
ANO	ENERGIA GERADA POR ANO	RECEITA GERADA	CUSTO PAGO ANUAL	ECONOMIA	ANÁLISE FINANCEIRA 1	ANÁLISE FINANCEIRA 2
0	0	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 104.283,74	-R\$ 104.283,74
1	48.152,10	R\$ 36.810,84	R\$ 9.540,67	R\$ 27.270,17	-R\$ 77.013,57	-R\$ 84.612,73
2	47949,86118	R\$ 39.962,62	R\$ 9.504,45	R\$ 30.458,17	-R\$ 46.555,40	-R\$ 64.905,50
3	47748,47176	R\$ 39.794,78	R\$ 9.468,39	R\$ 30.326,39	-R\$ 16.229,01	-R\$ 45.162,21
4	47547,92818	R\$ 39.627,64	R\$ 9.432,47	R\$ 30.195,17	R\$ 13.966,16	-R\$ 25.383,00
5	47348,22688	R\$ 39.461,21	R\$ 9.396,71	R\$ 30.064,50	R\$ 44.030,65	-R\$ 5.568,03
6	47149,36433	R\$ 39.295,47	R\$ 9.361,10	R\$ 29.934,37	R\$ 73.965,03	R\$ 14.282,56
7	46951,337	R\$ 39.130,43	R\$ 9.325,63	R\$ 29.804,80	R\$ 103.769,82	R\$ 34.168,61
8	46754,14138	R\$ 38.966,08	R\$ 9.290,32	R\$ 29.675,76	R\$ 133.445,58	R\$ 54.089,97
9	46557,77399	R\$ 38.802,42	R\$ 9.255,15	R\$ 29.547,27	R\$ 162.992,85	R\$ 74.046,50
10	46362,23134	R\$ 38.639,45	R\$ 9.220,13	R\$ 29.419,32	R\$ 192.412,17	R\$ 94.038,05
11	46167,50997	R\$ 38.477,17	R\$ 9.185,26	R\$ 29.291,91	R\$ 221.704,08	R\$ 114.064,47
12	45973,60643	R\$ 38.315,56	R\$ 9.150,54	R\$ 29.165,03	R\$ 250.869,10	R\$ 134.125,61
13	45780,51728	R\$ 38.154,64	R\$ 9.115,96	R\$ 29.038,68	R\$ 279.907,78	R\$ 154.221,34
14	45588,23911	R\$ 37.994,39	R\$ 9.081,52	R\$ 28.912,86	R\$ 308.820,65	R\$ 174.351,50
15	45396,7685	R\$ 37.834,81	R\$ 9.047,23	R\$ 28.787,58	R\$ 337.608,23	R\$ 194.515,95
16	45206,10208	R\$ 37.675,90	R\$ 9.013,09	R\$ 28.662,82	R\$ 366.271,04	R\$ 214.714,54
17	45016,23645	R\$ 37.517,67	R\$ 8.979,09	R\$ 28.538,58	R\$ 394.809,63	R\$ 234.947,14
18	44827,16825	R\$ 37.360,09	R\$ 8.945,23	R\$ 28.414,87	R\$ 423.224,49	R\$ 255.213,59
19	44638,89415	R\$ 37.203,18	R\$ 8.911,51	R\$ 28.291,67	R\$ 451.516,16	R\$ 275.513,76
20	44451,41079	R\$ 37.046,93	R\$ 8.877,93	R\$ 28.168,99	R\$ 479.685,15	R\$ 295.847,51
21	44264,71487	R\$ 36.891,33	R\$ 8.844,50	R\$ 28.046,83	R\$ 507.731,98	R\$ 316.214,69
22	44078,80306	R\$ 36.736,38	R\$ 8.811,21	R\$ 27.925,18	R\$ 535.657,16	R\$ 336.615,17
23	43893,67209	R\$ 36.582,09	R\$ 8.778,05	R\$ 27.804,04	R\$ 563.461,20	R\$ 357.048,80
24	43709,31867	R\$ 36.428,45	R\$ 8.745,04	R\$ 27.683,41	R\$ 591.144,62	R\$ 377.515,44
25	43525,73953	R\$ 36.275,45	R\$ 8.712,16	R\$ 27.563,29	R\$ 618.707,90	R\$ 398.014,96
26	43342,93142	R\$ 36.123,09	R\$ 8.679,42	R\$ 27.443,67	R\$ 646.151,57	R\$ 418.547,22
27	43160,89111	R\$ 35.971,37	R\$ 8.646,82	R\$ 27.324,55	R\$ 673.476,13	R\$ 439.112,08
28	42979,61537	R\$ 35.820,29	R\$ 8.614,36	R\$ 27.205,94	R\$ 700.682,06	R\$ 459.709,41
29	42799,10098	R\$ 35.669,85	R\$ 8.582,03	R\$ 27.087,82	R\$ 727.769,88	R\$ 480.339,06
30	42619,34476	R\$ 35.520,04	R\$ 8.549,84	R\$ 26.970,20	R\$ 754.740,08	R\$ 501.000,90

Fonte - Autor.

5 Conclusões e trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

No presente estudo foram explorados vários aspectos relacionados ao aproveitamento da energia solar para a geração de energia elétrica via sistemas fotovoltaicos. De modo fundamental, foram realizados estudos e pesquisas abordando a importância da utilização desse sistema, bem como, os aspectos que norteiam seu funcionamento e as características que o regularizam.

Foi realizado o dimensionamento de um sistema fotovoltaico *On-Grid* para atender às necessidades da unidade que foi objeto deste estudo. O sistema é composto por 54 placas (JKM575N-72HL4-V) da marca Jinko, 1 (um) inversor da Growatt (MAC36KTL3-XL) e diferentes equipamentos auxiliares. Para implantação deste sistema, requeresse um investimento inicial de R\$104.283,74.

Embora o investimento inicial seja substancial, o projeto fotovoltaico dimensionado neste trabalho demonstrou alta viabilidade econômica. Conforme a segunda análise financeira, a instalação deste sistema solar recuperará o custo inicial em um período de cinco a seis anos, no máximo, e acarretará em uma economia substancial no consumo de energia elétrica fornecida pela concessionária. Consequentemente, isso se traduzirá em uma redução significativa nos gastos com energia elétrica na escola. Essa economia pode ser estimada em R\$501.000,90 em um período de 30 anos.

Diante da simulação realizada para o sistema proposto, estima-se que o sistema fotovoltaico para suprir as necessidades da escola terá uma potência instalada de 31,1[kW], com uma geração anual de 48,15[MWh], eficiência de 78,9% e 1.550,8kWh/kWp.

Outrossim, a análise de um possível sombreamento revelou que este efeito acarreta perdas significativas na geração de energia do sistema. Portanto, a seleção criteriosa do local de implantação é crucial durante o dimensionamento do projeto.

Além disso, a degradação do sistema deve ser considerada, pois sem essa precaução, é estimado a necessidade de 49 placas solares. No entanto, para compensar essa perda de eficiência, foi decidido a utilização de 54 módulos.

É relevante destacar que o superdimensionamento do sistema foi de aproximadamente 27,92% na geração anual de energia. Tendo em vista que ocorrerá o decaimento da eficiência do sistema ao longo do tempo e que a potência instalada da MMGD é limitada pela potência disponibilizada pela concessionária (ANEEL, 2015), a instalação desse sistema deverá ocorrer de forma gradativa. Posto isto, deverá ser mantido o inversor MAC36KTL3-XL e gradualmente deverá aumentar o número de placas conforme o consumo aumente ou geração diminua, partindo da instalação de 47 painéis.

Adicionalmente, a simulação utilizando o painel JKM470N-60HL4-V permitiu constatar que, embora esses módulos sejam mais econômicos, a implementação com eles seria mais dispendiosa devido à exigência de mais equipamentos.

Além disso, verifica-se que a escola é capaz de gerar anualmente 93,20[MWh], o que equivale aproximadamente a 193,56% da produção estimada para o sistema projetado.

Por fim, o presente estudo é indispensável para um aprendizado consolidado e objetivo acerca do tema proposto e corrobora com a importância dos avanços tecnológico que envolvem a implantação de sis-

temas fotovoltaicos na sociedade como um todo.

5.2 Trabalhos Futuros.

A busca por um crescimento contínuo é de suma importância para o avanço em todas as áreas de uma sociedade, e isto inclui o setor de energias limpas e renováveis. Desse modo, fica como proposta para trabalhos futuros, estudos abordando os temas a seguir:

1. Análise considerando o *payback* descontado;
2. Análise financeira, levando em consideração custos com manutenções;
3. Considerar a migração da escola para o Ambiente de Contratação Livre;
4. Análise sobre as dificuldades existentes para a implantação de um sistema fotovoltaico em um ambiente público e os métodos financeiros para viabilização da instalação desse sistema;
5. Análise da implantação do sistema fotovoltaico considerando a utilização de micro inversores;
6. Utilização de um sistema de refrigeração para os módulos solares, tendo como hipótese que esse mecanismo resultará na diminuição das perdas por temperatura.

Referências

- ABNT, A. B. de N. T. Instalações elétricas de baixa tensão. **ABNT**, 2004. Citado na página 29.
- AMARAL, L. P. d. Sistema fotovoltaico em vila residencial: viabilidade técnica e econômica. **Trabalho d Conclusão de Curso.**, 2023. Citado na página 27.
- ANEEL. Resolução normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. **Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL**, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 45.
- ANEEL. Resolução normativa nº 1.059, de 07 de fevereiro de 2023. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2023. Citado na página 24.
- ANEEL, R. N. 414/2010. **Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. Brasília**, 2010. Citado na página 21.
- AURORA. **HelioScope**. 2024. Acesso em 12 de fevereiro de 2024. Disponível em: <<https://helioscope.aurorasolar.com/product/>>. Citado na página 25.
- BEN, B. E. B. Balanço energético nacional. 2023. Citado 3 vezes nas páginas 14, 16 e 17.
- BRASIL. Lei 14.300/22, de 6 de janeiro de 2022. **DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO**, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- BRASIL. Fontes de energia. **Empresa de Pesquisa Energética**, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>>. Acesso em: 22/09/2023. Citado na página 16.
- BRASIL., S. Sistemas de proteção para instalações fotovoltaicas. **Solar Brasil.**, 2023. Disponível em: <<https://www.solarbrasil.com.br/blog/sistemas-de-protecao-para-instalacoes-fotovoltaicas/>>. Acesso em: 23/09/2023. Citado na página 23.
- BRITO., C. de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Potencial solar - sundata. CRESESB., 2018. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 19/12/2023. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 34.
- CARVALHO, J. F. de. Energia e sociedade. 2014. Acesso em: 18/03/2024. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- COELHO, G. A.; OLIVEIRA, R. C. D. Viabilidade econômica do uso de painéis solares no condomínio horizontal bela vista: estudo de caso. **Uningá Review**, v. 28, n. 3, 2016. Citado na página 28.
- CRESCER. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. **CRESCER, Rio de Janeiro**, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- EASY., S. Medidor bidirecional de energia. **Soluções em Energia Solar MS, Solar Easy.**, 2023. Disponível em: <<https://solareasy.com.br/produto/produtos/medidor-bidirecional-de-energia>>. Acesso em: 25/09/2023. Citado na página 24.
- ECOQUECEDORES. Energia solar fotovoltaica off grid. EcoAquecedores., 2023. Acesso em: 20/08/2023. Citado na página 19.

ELÉTRICA, A. N. de E. Base de dados das tarifas das distribuidoras de energia elétrica. **Site Oficial ANEEL**, 2024. Disponível em: <<https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/basestarifas#!>> Acesso em: 04/03/2024. Citado na página 31.

ENERGIA., C. B1, b3, a4, a3a...qual é a melhor tarifa de energia? **Soluções em Energia Solar MS, Solar Easy.**, 2020. Disponível em: <<https://clarke.com.br/melhor-tarifa-de-energia/>>. Acesso em: 25/09/2023. Citado na página 21.

EXPERIAN, S. Payback: o que é, para que serve e tutorial para calcular. 2024. Disponível em: <<https://www.serasaexperian.com.br/blog-pme/payback-o-que-e/>>. Acesso em: 12/02/2024. Citado na página 18.

GOOGLE. **Google Earth**. 2024. Acesso em 14 de março de 2024. Disponível em: <<https://www.google.com/intl/pt-BR/earth/about/>>. Citado na página 29.

GOV. Em nova meta, brasil irá reduzir emissões de carbono em 50% até 2030. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2021. ISSN 1677-7042. Disponível em: <<https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2021/10/em-nova-meta-brasil-ira-reduzir-emissoes-de-carbono-em-50-ate-2030>>. Acesso em: 27/07/2023. Citado na página 14.

LOPES, V.; RODRÍGUEZ, D.; HENRÍQUEZ, J. R. Análise da viabilidade técnica, econômica e financeira de cenários de geração solar fotovoltaica aplicados ao campus recife da universidade federal de pernambuco. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

MACEDO, C. F. D. C.; ECONÔMICA, D. E. A. D. V.; ARCOS-MG, E. E. Instituto federal de minas gerais–campus formiga bacharelado em engenharia elétrica. 2017. Citado 4 vezes nas páginas 23, 27, 28 e 29.

NATIONS., U. Take action for the sustainable development goals. United Nations., 2015. Disponível em: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>>. Acesso em: 19/09/2023. Citado na página 14.

NUBANK. Payback: o que é e como calcula?. 2024. Disponível em: <<https://blog.nubank.com.br/payback/>>. Acesso em: 12/02/2024. Citado na página 18.

PERNAMBUCO, N. Aneel define índice de reajuste das tarifas da neoenergia pernambuco. **Neoenergia Pernambuco**, 2024. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/web/pernambuco/w/aneel-define-indice-de-reajuste-das-tarifas>>. Acesso em: 29/02/2024. Citado na página 31.

PERNAMBUCO, N. Tabela de tarifas de energia elétrica. **Neoenergia Pernambuco**, 2024. Disponível em: <https://servicos.neoenergiapernambuco.com.br/residencial-rural/Documents/01_NEOENERGIA%20PERNAMBUCO_TARIFAS%20DE%20ENERGIA%20EL%C3%89TRICA%20GRUPO%20B%20MAIO_2023_REH_N%C2%BA%203.195.pdf>. Acesso em: 29/02/2024. Citado na página 42.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. 2014. **Citado**, v. 3, p. 144, 2014. Citado na página 22.

RIBEIRO., T. B. Sistema on grid: O processo de produção de energia solar fotovoltaica. **EcoAquecedores.**, 2022. Disponível em: <<https://baoribeiro.com.br/blog/sistema-de-energia-on-grid-como-funciona/>>. Acesso em: 20/08/2023. Citado na página 20.

SANTOS, P. R. G. dos et al. Fontes renováveis e não renováveis geradoras de energia elétrica no Brasil. 2015. Citado na página 16.

SANTOS, R. B. D.; MARTINS, V. R.; BORGES, R. R. de S. Sistema de energia solar a partir de células fotovoltaicas: Estacionamento solar do centro universitário unievangélica/solar energy system from photovoltaic cells: Solar parking at the unievangélica university center. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 20097–20106, 2020. ISSN 2525-8761. Citado na página 19.

SANTOS, T. Bem-vindo ao maior distribuidor de energia solar do Brasil.

Oca Energia, 2024. Disponível em: <<https://www.ocaenergia.com/blog/gestao/como-fazer-um-orcamento-para-prestacao-de-servico-na-area-solar/>>. Acesso em: 28/02/2024. Citado na página 30.

SILVA, P. E. A. d. et al. Dimensionamento e implementação de um sistema fotovoltaico com ênfase na economia de energia gerada em Uberlândia–mg. Universidade Federal de Uberlândia, 2023. Citado 5 vezes nas páginas 19, 23, 26, 27 e 29.

SOL, B. Inversores solar fotovoltaico: O que É, como funciona e tipos. **Blue Sol, energia solar.**, 2021. Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/inversor-fotovoltaico-o-que-e-como-funciona/>>. Acesso em: 23/09/2023. Citado na página 23.

SOL, B. Módulo fotovoltaico. **Blue Sol, energia solar.**, 2023. Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/modulo-fotovoltaico/>>. Acesso em: 23/09/2023. Citado na página 23.

SOLAR, A. Bem-vindo ao maior distribuidor de energia solar do Brasil. 2024. Disponível em: <<https://www.aldo.com.br/>>. Acesso em: 27/02/2024. Citado 3 vezes nas páginas 30, 37 e 39.

SOLAR., A. Inversor solar on grid. **Aldo Solar.**, 2024. Disponível em: <<https://www.aldo.com.br/produto/117720-6/inversor-solar-fotovoltaico-on-grid-growatt-mac36ktl3-xl-36kw-trifasico-220v-3mppt-monitoramento>>. Acesso em: 28/01/2024. Citado na página 37.

SOLAR., A. Painel solar. **Aldo Solar.**, 2024. Disponível em: <<https://www.aldo.com.br/categoria/energia-solar/produtos/painel-solar>>. Acesso em: 08/01/2024. Citado na página 26.

SOLAR., P. Energia solar no Brasil. Portal Solar., 2019. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-no-brasil.html>>. Acesso em: 19/09/2023. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.

SOLAR, P. Módulo fotovoltaico. **Portal Solar**, 2023. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/modulo-fotovoltaico>>. Acesso em: 23/09/2023. Citado na página 23.

SOLAR, P. Taxa mínima de luz: saiba tudo sobre custo de disponibilidade. 2024. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/qual-o-valor-da-taxa-minima-de-energia-eletrica-tudo-sobre-custo-de-disponibilidade>>. Acesso em: 18/02/2024. Citado na página 21.

SOLAR, P. Valor da energia solar: quanto custa para instalar energia solar? 2024. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/quanto-custa-para-instalar-energia-solar.html>>. Acesso em: 20/02/2024. Citado na página 18.

SOLMAIS. Energia solar no Brasil: cenário, desafios e futuro! **Blog Solmais**, 2023. Disponível em: <https://solmais.com.br/blog/energia-solar-no-brasil/?gclid=EAIaIQobChMIjPu99YO_gQMV9RqtBh2HowMTEAAYASAAEgLkqPD_BwE>. Acesso em: 22/09/2023. Citado na página 16.

WEG, C. Catálogo de inversores da weg. **Catálogo de Inversores da WEG.**, 2023. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/c/INVERSOR-SOLAR-SIW300H-M050-L1/p/15403814>. Acesso em: 23/09/2023. Citado na página 24.