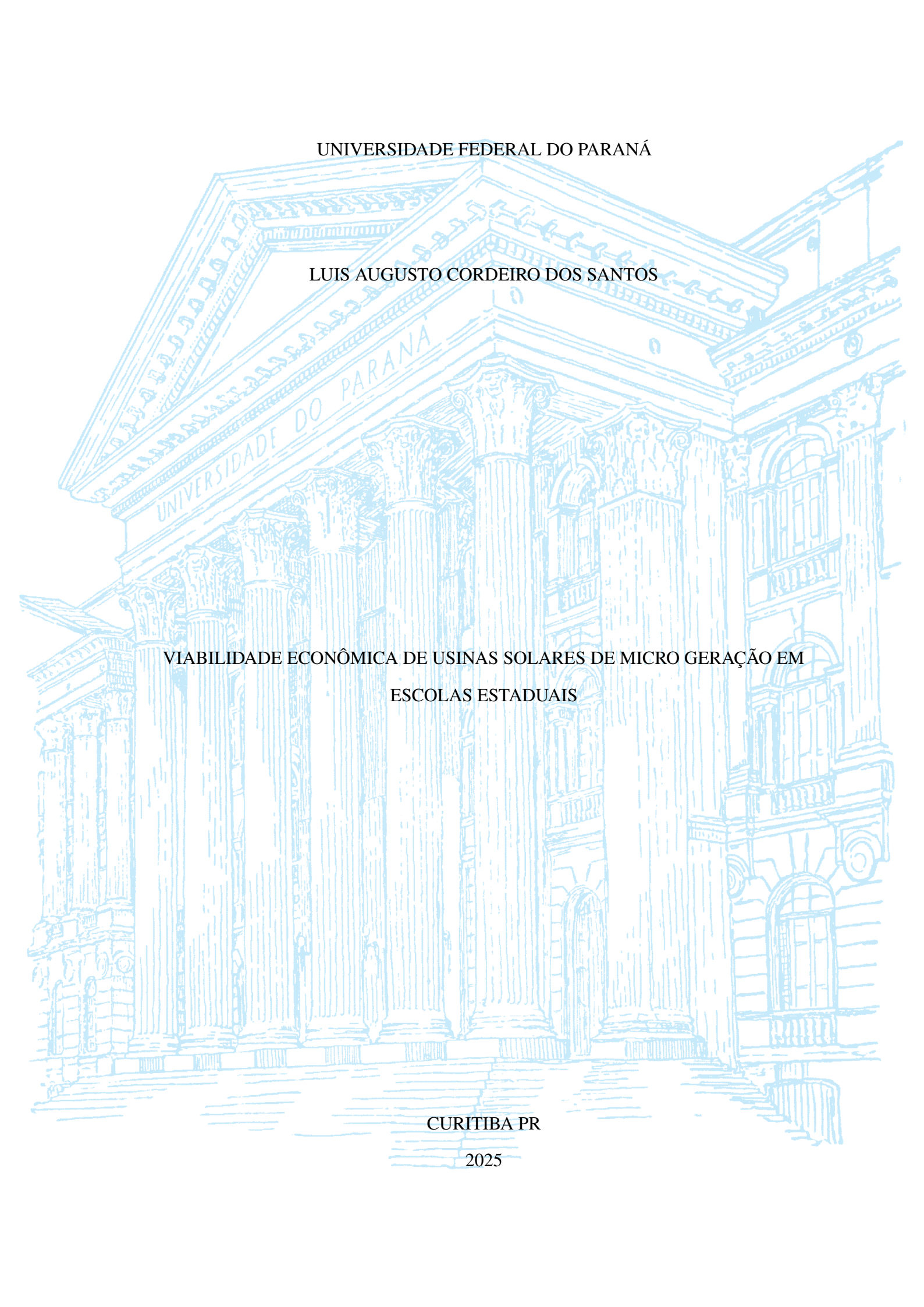




UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUIS AUGUSTO CORDEIRO DOS SANTOS

VIABILIDADE ECONÔMICA DE USINAS SOLARES DE MICRO GERAÇÃO EM
ESCOLAS ESTADUAIS

CURITIBA PR

2025

LUIS AUGUSTO CORDEIRO DOS SANTOS

VIABILIDADE ECONÔMICA DE USINAS SOLARES DE MICRO GERAÇÃO EM
ESCOLAS ESTADUAIS

Trabalho apresentado como requisito parcial à conclusão
do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Setor
de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Área de concentração: *Engenharia Elétrica*.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Ribeiro Junior.

CURITIBA PR

2025

TERMO DE APROVAÇÃO

LUIS AUGUSTO CORDEIRO DOS SANTOS

VIABILIDADE ECONÔMICA DE USINAS SOLARES DE MICROGERAÇÃO EM ESCOLAS ESTADUAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrotécnica e Eletrônica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Prof(a). Dr(a). /Msc. _____

Prof(a). Dr(a). /Msc. _____

Prof(a). Dr(a). /Msc. _____

Curitiba, __ de _____ de 2025.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, perseverança e sabedoria durante a trajetória acadêmica, meus sinceros agradecimentos.

Não teria chegado até aqui sem o apoio incondicional da minha família, que sempre acreditou em mim.

Aos meus amigos, minha eterna gratidão pelas palavras de incentivo, pela paciência nos momentos difíceis e apoio nas várias decisões que precisei tomar para a continuidade do projeto.

Obrigado aos professores e orientadores, que compartilharam seus conhecimentos e me guiaram com dedicação por todos esses anos de curso.

Também sou grato a todos os colegas de curso, que tornaram essa caminhada mais leve e significativa, com conversas descontraídas e dicas valiosas para mim.

A todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente, deixo aqui meu sincero reconhecimento.

Reconheço que cada desafio superado foi essencial para meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional.

Inspirado por tudo que vivi, sigo agora com a certeza de que todo esforço valeu a pena.

A todos vocês, o meu mais profundo e verdadeiro agradecimento.

RESUMO

Esta conclusão de curso tem como objetivo avaliar economicamente a implementação de estações solares fotovoltaicas de microgeração de potência até 75 kVA em colégios públicos brasileiros e com especial incidência no Estado do Paraná, região de boa incidência solar e com já implementadas iniciativas estaduais como o programa “Escola Solar”. Esta investigação se iniciou com a necessidade de unir a sustentabilidade ambiental com a racionalização dos investimentos públicos com vistas ao potencial da energia solar como solução de médio e longo termo para organismos de educação.

Foram discutidos itens técnicos, regulamentários, administrativos e financeiros. Com informações reais de escolas com usinas já implementadas foram simulados indicadores como Custo Nivelado de Energia (LCOE), Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Retorno sobre o Investimento (ROI) e Payback. Simulações foram realizadas com o programa SAM (System Advisor Model), a partir de parâmetros locais como radiação solar global, carga energética e médios custos de implantação.

Os resultados demonstram que, mesmo com altos investimentos iniciais, o retorno financeiro é factível a médio prazo, especialmente quando há incentivo fiscal e políticas públicas de fomento. Além da economia gerada, notar-se o efeito positivo no ambiente educativo no sentido de podermos incluir as usinas no currículo educativo de maneira a fomentar conhecimento prático de sustentabilidade e de energias renováveis.

Se conclui como uma alternativa técnica e economicamente viável e capaz de fomentar a eficiente gestão dos recursos públicos e contribuir para a formação ecológica e cívica dos alunos. Trata-se igualmente de uma sugestão de diretrizes capazes de orientar dirigentes dos colégios e autoridades públicas para o momento de decisão e de replicação do modelo em outras instituições educacionais do território nacional.

Palavras-chave: Microgeração, Geração Distribuída, Viabilidade Econômica, Retorno do Investimento, Energia Solar.

ABSTRACT

This undergraduate thesis aims to economically evaluate the implementation of photovoltaic solar microgeneration systems with power capacities of up to 75 kVA in Brazilian public schools, with a special focus on the State of Paraná—a region with high solar irradiance and existing state-led initiatives such as the “Escola Solar” program. This research was driven by the need to combine environmental sustainability with the rationalization of public investment, considering the potential of solar energy as a medium- and long-term solution for educational institutions.

Technical, regulatory, administrative, and financial aspects were thoroughly addressed. Based on real data from schools with operational solar systems, simulations were conducted to assess indicators such as Levelized Cost of Energy (LCOE), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Return on Investment (ROI), and Payback Period. The simulations were performed using the System Advisor Model (SAM) software, applying local parameters such as global solar irradiance, energy demand, and average implementation costs.

The results show that, despite the high initial investment, financial return is feasible in the medium term, especially when supported by tax incentives and public policies for clean energy promotion. In addition to the economic benefits, there is a positive impact within the educational environment, as the solar plants can be integrated into school curricula to foster practical knowledge of sustainability and renewable energy sources.

It is concluded that this approach represents a technically and economically viable alternative capable of promoting the efficient management of public resources and contributing to students’ ecological and civic development. Moreover, this study serves as a proposal for guidelines that can assist school administrators and public authorities in decision-making and in replicating the model across other educational institutions in the country.

Keywords: Microgeneration, Distributed generation. Economic feasibility. Payback. Solar Energy.

LISTA DE FIGURAS

5.1	Estrutura de uma célula fotovoltaica	16
5.2	Irradiância ao longo de um dia.	17
5.3	Energia solar captada ao longo do ano com diferentes inclinações.	18
6.1	Diagrama de blocos de sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.	21
6.2	Diagrama De Blocos De Sistema Fotovoltaico Isolado.	21
6.3	Curva característica I-V e curva de Potência P-V para um módulo de 1000Wp . .	22
6.4	Efeito causado pelo variação da irradiância sobre a Curva I-V.	22
8.1	Fluxograma da metodologia aplicada no trabalho	28
9.1	Custo Nivelado da Energia (LCOE) das escolas analisadas	42
9.2	Valor Presente Líquido (VPL) das escolas analisadas	43
9.3	Taxa Interna de Retorno (TIR) das escolas analisadas	43
9.4	Tempo de retorno do investimento (Payback) das escolas analisadas	44

LISTA DE TABELAS

2.1	Escolas beneficiadas com as Usinas Fotovoltaicas	12
5.1	Ângulo de inclinação recomendado para diferentes latitudes.	18
8.1	Dados dos Locais e Irradiação Solar Diária Média Mensal [kWh/m ² *dia]	29
8.2	Áreas ocupadas pelas usinas solares nas escolas selecionadas	29
8.3	Estimativa de Energia Produzida Mensal.	30
8.4	Médias anuais dos parâmetros climáticos em Campo Largo – PR	32
8.5	Médias anuais dos parâmetros climáticos em Cascavel – PR.	33
8.6	Médias anuais dos parâmetros climáticos em Londrina – PR	34
8.7	Médias anuais dos parâmetros climáticos em Uraí – PR	35
8.8	Medias anuais dos parâmetros climáticos em Paranavaí – PR.	35
9.1	Indicadores econômicos dos sistemas fotovoltaicos simulados.	39
9.2	Resumo dos fluxos de caixa simulados ao longo de 25 anos	40
10.1	Resumo da configuração do sistema proposto	46
10.2	Resumo financeiro do projeto de microgeração sugerido.	47
10.3	Comparativo entre o projeto sugerido e o melhor caso simulado (Campo Largo) .	48
10.4	Comparativo entre o projeto sugerido e o pior caso simulado (Uraí).	49
11.1	Resumo do dimensionamento dos condutores e disjuntores	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	CONTEXTO E PROBLEMA.	11
2.1	HISTÓRICO	11
3	OBJETIVOS	13
3.1	OBJETIVO GERAL	13
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
4	PUBLICO ALVO	15
5	ALICERCES TEÓRICOS	16
5.1	CÉLULA FOTOVOLTAICA	16
5.2	IRRADIÂNCIA SOLAR	16
5.3	ORIENTAÇÃO DOS MÓDULOS	17
5.3.1	Ângulo ideal para radiação direta:	17
5.3.2	Compromisso com o Ângulo Fixo:	17
5.3.3	Recomendações de ângulos	18
6	INTRODUÇÃO À GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	20
6.1	COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO	20
6.2	TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	21
6.3	CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.	21
6.4	ANÁLISE DE RECURSO SOLAR	22
7	INTRODUÇÃO A ANÁLISE FINANCEIRA DE SISTEMAS FOTOVOL- TAÍCO	24
7.1	PRINCIPAIS INDICADORES FINANCEIROS UTILIZADOS.	24
7.2	ALGORITMOS DA ANÁLISE ECONÔMICA	24
7.2.1	Payback Simples	25
8	METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO	27
8.1	ANÁLISE DOS LOCAIS.	29
8.1.1	Áreas Apreendidas pelas Usinas	29
8.1.2	Estimativas de Energia Produzida	30
8.2	ANALISE DAS UNIDADES ESCOLARES SIMULADAS	32
8.2.1	CE Primeiro Centenário do Brasil – Campo Largo/PR.	32
8.2.2	CE Prof. Pedro Boareto Neto – Cascavel/PR.	33
8.2.3	CE Prof.Maria José B. Aguiar – Londrina/PR	34
8.2.4	CE Prof. Regina Tokano – Uraí/PR.	34
8.2.5	CE Prof. Bento M. R. Neto – Paranavaí/PR	35

9	ANÁLISE FINANCEIRA	37
9.1	CÁLCULO E ANÁLISE DOS INDICADORES ECONÔMICOS.	37
9.1.1	Custo Nivelado de Energia (LCOE)	37
9.1.2	Valor Presente Líquido (VPL)	37
9.1.3	Taxa Interna de Retorno (TIR)	38
9.2	EXEMPLO PRÁTICO DOS INDICADORES FINANCEIROS APLICADOS . .	39
9.3	ANÁLISE COMPARATIVA DOS FLUXOS DE CAIXA	40
9.3.1	Resumo Geral dos Resultados	40
9.3.2	Interpretação dos Resultados	41
9.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS COM RESPEITO DAS SIMULAÇÕES	44
10	PROPOSTA DE PROJETO FOTOVOLTAICO PADRONIZADO PARA MICROGERAÇÃO	45
10.1	PREMISSAS DO PROJETO	45
10.2	CONFIGURAÇÃO DO ARRANJO FOTOVOLTAICO	45
10.3	ESTIMATIVA DE ENERGIA MENSAL GERADA.	46
10.4	ANÁLISE ECONÔMICA DO PROJETO SUGERIDO	47
10.4.1	Comparação com o Melhor Caso Simulado	47
10.4.2	Comparação com o Pior Caso Simulado	48
10.4.3	Considerações Finais sobre o Projeto Sugerido.	49
11	DIMENSIONAMENTO DO PROJETO E UNIFILAR.	51
11.1	DIMENSIONAMENTO CC (CORRENTE CONTÍNUA).	51
11.2	DIMENSIONAMENTO CA (CORRENTE ALTERNADA).	52
11.3	RESUMO DO DIMENSIONAMENTO	53
12	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
13	TRABALHOS FUTUROS	56
13.1	EXPANSÃO DA AMOSTRAGEM.	56
13.2	INTEGRAÇÃO COM SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO	56
13.3	ANÁLISE DE DIFERENTES MODELOS DE FINANCIAMENTO	56
13.4	MONITORAMENTO EM TEMPO REAL E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	56
13.5	AVALIAÇÃO DE IMPACTOS EDUCACIONAIS E SOCIOAMBIENTAIS . . .	56
13.6	APERFEIÇOAMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO	57
	REFERÊNCIAS	58
	APÊNDICE A – UNIFILAR DA USINA.	59
	APÊNDICE B – DIAGRAMA FUNCIONAL	61
	APÊNDICE C – DIAGRAMA DE BLOCOS E QUADROS	63

1 INTRODUÇÃO

Diante da crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis, questiona-se - é economicamente viável a adoção de microgeração solar em escolas públicas?-. Os inúmeros avanços tecnológicos a necessidade de reduzir o impacto ambiental das fontes de energia tradicionais intensificou a busca por soluções sustentáveis para a produção de energia. Neste contexto, a energia solar surge como uma fonte alternativa de energia promissora [2], especialmente em países como o Brasil que dispõe de um território enorme de extensão e potenciais energéticos, com altas taxas de insolação durante todo o ano em várias regiões [7]. A utilização de sistemas fotovoltaicos tem se tornado uma opção cada vez mais viável, não só para grandes fábricas, mas também para microgeração em diversas indústrias, incluindo o setor educacional.

A implementação de usinas de energia solar em escolas públicas oferece a oportunidade de combinar a conservação dos recursos públicos com a educação ambiental. Além de ajudarem a reduzir os custos de eletricidade, estas iniciativas podem servir como laboratórios vivos para os estudantes, promovendo o conhecimento sobre energias renováveis e o desenvolvimento sustentável. Porém, antes de implementar projetos de grande porte, é necessário analisar a viabilidade econômica dessas usinas, levando em consideração fatores como custos iniciais de instalação, manutenção e retorno financeiro ao longo do tempo.

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade econômica da instalação de usinas solares de microgeração com potência de até 75 kVA em escolas públicas. O estudo se concentrará em áreas do Brasil com altas incidências de radiação solar para maximizar o potencial de produção de energia e, assim, maximizar o retorno do investimento. Para tal, será realizada uma análise incluindo custos de instalação, previsões de poupança de energia e cálculos do tempo de retorno.

Com base nas conclusões, espera-se que forneça uma base sólida para os administradores escolares e autoridades educativas tomarem decisões mais informadas relativamente à adoção da energia solar nas escolas. Além disso, este trabalho pretende contribuir para o debate sobre o papel das instituições de ensino na promoção de práticas sustentáveis e na criação de consciência ambiental entre os jovens.

2 CONTEXTO E PROBLEMA

A geração distribuída (GD) é a produção de energia elétrica por pequenos produtores locais próximos as concessionárias de energia, com o principal foco em fontes renováveis como a fotovoltaica, permitindo que os consumidores gerem sua própria energia e abatam custos residenciais ou comerciais.

O grande desafio de implementar esses tipos de gerações é utilizá-los com a máxima eficiência e respeitando os limites que nossos recursos naturais proporcionam sem desperdiçá-los em nossos sistemas de distribuição.

O principal problema desses tipos de investimentos é que são muitos caros e por vezes se pagam após a passagem de grande parcela de tempo, cerca de 5 a 10 anos no geral, porém são investimentos notáveis sobre os aspectos de energia limpa e abatimento de tarifas a longo prazo.

O panorama energético do Brasil que é detalhado no Anuário Estatístico de Energia Elétrica inclui dados do mercado elétrico nacional, abrangendo temas como capacidade instalada, geração, emissões e perdas, preços e tarifas, agentes e programas [1]. A análise desses tipos de bancos de dados públicos sobre a utilização de energia elétrica pode nos mostrar e ajudar identificar os principais pontos de desperdício ou má utilização, por outro lado também nos revela pontos estratégicos onde a implementação da (GD) pode ser mais efetiva [11], como por exemplo nos órgãos públicos de ensino.

2.1 HISTÓRICO

A energia fotovoltaica tem uma concreta base teórica no ramo da física que explora a eletricidade em semicondutores aproveitando o efeito fotoelétrico, descoberto por Alexandre Edmond Becquerel em 1839, quando ele observou que certos materiais podiam gerar eletricidade ao serem expostos à luz. No início do século XX, Albert Einstein explicou esse efeito em termos quânticos, o que foi um avanço teórico crucial e lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física em 1921. No entanto, a primeira célula solar prática só foi criada nos laboratórios Bell em 1954, com eficiência de cerca de 6%. Durante a década de 1970, a crise do petróleo aumentou o interesse em fontes alternativas de energia, impulsionando o desenvolvimento de tecnologias solares [4]. Desde então, avanços nos materiais e processos de fabricação reduziram significativamente os custos e aumentaram a eficiência das células fotovoltaicas. Hoje, a energia solar é uma das fontes de energia que mais cresce no mundo, com grande potencial de expansão e acessibilidade, devido aos contínuos avanços tecnológicos e à escalabilidade da produção.

O processo de implementação da geração distribuída já possui um histórico relevante no estado do Paraná, especialmente a partir de meados de 2014 com a geração solar. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Paraná possui 21.014 MW de capacidade instalada de geração distribuída, incluindo a geração solar, que representa cerca de 10% a 15% dessa capacidade instalada. O programa RenovaPR impulsionou a geração distribuída [12] no estado, com a instalação de 34.483 usinas fotovoltaicas ou de biogás desde 2009, de acordo com dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Dessas, 28.348 unidades foram implantadas entre agosto de 2021 e julho de 2024, durante a vigência do programa (IAPAR-EMATER, 2024).

No Brasil, conforme os mesmos índices fornecidos pela EPE, a capacidade instalada total de geração em 2023 é de 225.951,83 MW, sendo 37.843 MW provenientes de fonte solar, o que representa 16,75% das fontes energéticas analisadas. Como parâmetro comparativo, temos as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) com 5.802 MW e as Usinas de Geração Eólicas com

28.682 MW, representando, respectivamente, 2,56% e 12,6% da capacidade total instalada no sistema elétrico brasileiro. [1]

A implementação da geração distribuída em órgãos públicos, como as usinas solares, tem avançado significativamente. Neste ano de 2024, a Secretaria de Educação do Paraná lançou o Projeto "Escola Solar", que beneficiou 20 instituições de ensino com essa tecnologia e implementando usinas de micro geração solar (até 75kW) em cada uma delas, alcançando resultados positivos na redução de tarifas energéticas. Algumas dessas instituições serão utilizadas como referência para esta pesquisa e todas elas estão listadas na Tabela 2.1 abaixo.

Tabela 2.1: Escolas beneficiadas com as Usinas Fotovoltaicas

Estabelecimento	Cidade
CE, Prof. Bento M R Neto	Paranavaí
CE, Flávio Warken	Foz do Iguaçu
CE, Bento Mussurunga	Umuarama
CE, Primeiro Centenário	Campo Largo
CE, Rodrigues Alves	Maringá
CE Vista Bela	Londrina
CE Arnaldo Busatto	Foz do Iguaçu
CE Silvio Barros	Maringá
CE Maria do Rosario Castaldi	Londrina
CE Paulo A Tomazinho	Umuarama
CE de Paranavai	Paranavaí
CE Pedro Boaretto Neto	Cascavel
CE Ulysses Guimaraes	Foz do Iguaçu
CE Jandaia do Sul	Jandaia do Sul
CE Maria Jose B Aguilera	Londrina
CE Eleodoro E Pereira	Cascavel
CE Dom Pedro ii	Foz do Iguaçu
CE Marcelino Champagnat	Londrina
CECM Vereador Luiz Zanchin	Sarandi
CE Prof. ^a . Regina Tokano	Urai

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade econômica da implantação de usinas de microgeração solar (potência até 75 kVA) em escolas públicas em áreas de alta radiação solar, levando em consideração também os custos de instalação, operação e manutenção, como potencial de redução de custos de contas de energia e tempo de retorno do investimento, a fim de apoiar e auxiliar a tomada de decisões estratégicas dos órgãos públicos e promover a adoção de práticas sustentáveis no ambiente escolar.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Análise e Coleta de Dados Reais em Escolas Públicas:

- Coletar dados reais de consumo energético, geração de energia e economia financeira em escolas que já possuem sistemas fotovoltaicos instalados.
- Analisar os impactos econômicos e operacionais da adoção dessas tecnologias em diferentes regiões com alta radiação solar.

2. Construção do Projeto:

- Simular o comportamento das usinas: Simulações feitas com o intuito de obter um parâmetro comparativo entre caso ideal (simulado) e casos reais (usinas prontas e funcionando).
- Desenvolver um projeto de usina de microgeração: Projeto com as diretrizes utilizadas pela Secretaria de Educação visando uma implementação eficiente de usinas solares em Escolas Estaduais e maximização de benefícios econômicos e educacionais.

3. Análise de Custos e Viabilidade Econômica:

- Análise de Investimento Inicial e Custo Total de Propriedade (TCO): Esta análise contabiliza todos os custos associados à instalação do sistema, incluindo aquisição de painéis, inversores, baterias (se aplicável), mão de obra e outros materiais necessários. O TCO também inclui manutenção e operação ao longo da vida útil do sistema.
- Payback (Período de Retorno do Investimento): O Payback mede o tempo necessário para recuperar o investimento inicial através da economia gerada na conta de energia. Para usinas solares, geralmente é calculado considerando o valor anual da economia de energia.
- Análise de Retorno Sobre o Investimento (ROI): Calcula o percentual de retorno gerado pelo sistema em relação ao investimento inicial. Um ROI alto indica uma instalação financeiramente atraente.
- Taxa Interna de Retorno (TIR): É a taxa de retorno que iguala o valor presente dos fluxos de caixa futuros ao investimento inicial. A TIR permite avaliar se o projeto é viável em comparação com alternativas de investimento.

- Valor Presente Líquido (VPL): Calcula a diferença entre o valor presente dos fluxos de caixa futuros e o investimento inicial. Um VPL positivo indica que o projeto pode ser financeiramente vantajoso.
- Análise de Sensibilidade: Esta análise identifica a variação do retorno financeiro em relação a mudanças em variáveis-chave, como custos de instalação, eficiência do sistema, tarifas de energia, entre outros.
- Identificar fatores que influenciam a viabilidade econômica, incluindo incentivos fiscais e linhas de financiamento disponíveis para instituições públicas.

4 PÚBLICO ALVO

O público-alvo deste projeto são administradores escolares, autoridades educacionais e secretarias de educação, em especial a Secretaria de Educação do Estado do Paraná, que desempenha um papel fundamental no apoio a esta iniciativa. O projeto visa proporcionar aos dirigentes escolares uma alternativa sustentável e economicamente viável para reduzir os custos de funcionamento das escolas através da instalação de centrais solares de microgeração. O apoio da Secretaria de Educação do Estado do Paraná fortalece a implementação dessas iniciativas, criando um modelo mais eficiente e sustentável de gestão dos recursos públicos. A economia gerada pela energia solar pode ser reinvestida em outras áreas prioritárias da educação, como infraestrutura, formação de professores e materiais didáticos, tendo assim um impacto positivo no desenvolvimento educacional do estado.

Além de gestores e autoridades educacionais, o projeto é direcionado a alunos, professores e toda a comunidade escolar. Com apoio do Ministério da Educação, usinas de energia solar em escolas públicas paranaenses podem servir como ferramenta prática para promover a educação ambiental e a conscientização sobre energias renováveis. Os alunos terão a oportunidade de aprender sobre sustentabilidade na prática, o que poderá despertar o seu interesse por temas relacionados à ciência, tecnologia e inovação. Os colaboradores poderão utilizar o projeto como recurso didático, integrando-o em aulas de disciplinas como física, geografia e ciências. Por fim, o projeto também beneficia a comunidade local, que pode participar de eventos e atividades educativas relacionadas ao tema, ampliar o impacto social e construir uma rede de conscientização sobre a importância da energia limpa e do desenvolvimento sustentável.

5 ALICERCES TEÓRICOS

5.1 CÉLULA FOTOVOLTAICA

O efeito fotovoltaico é o fenômeno físico que utiliza a radiação da luz para produzir eletricidade de maneira direta, utilizando células formadas por materiais semicondutores. Essas células são compostas por duas camadas semicondutoras, identificadas como P e N, além de uma grade metálica superior translúcida e uma base metálica inferior, que atuam como terminais para a coleta da corrente elétrica gerada pela luz, como pode ser visto na Figura 5.1. Para melhorar a eficiência, as células comerciais incorporam uma camada antirreflexiva, a qual é feita de materiais como nitreto de silício ou dióxido de titânio, reduzindo assim a reflexão e aumentando a absorção de luz.[4]

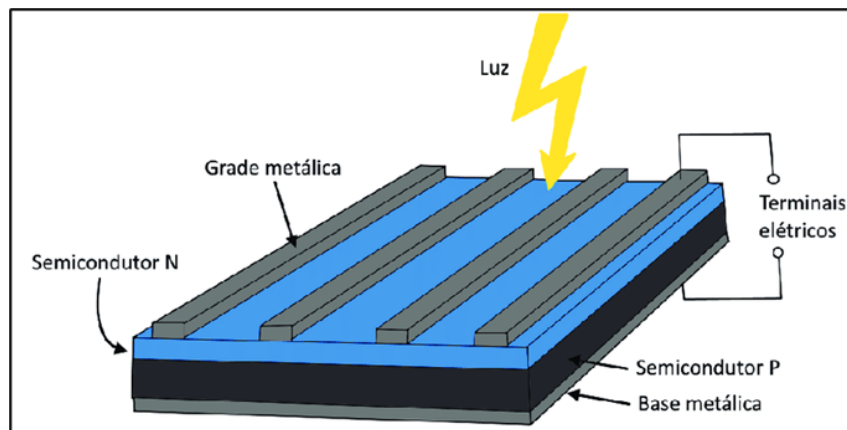


Figura 5.1: Estrutura de uma célula fotovoltaica

Fonte: Energia Solar Fotovoltaica. Villalva, Marcelo. Editora. Érica LTDA 2013, p 65].

5.2 IRRADIÂNCIA SOLAR

A irradiância é utilizada para quantificar a radiação solar, sendo também conhecida como irradiação. Ela é expressa em W/m^2 (watts por metro quadrado), uma unidade que representa a potência por área. A irradiância reflete a energia transportada em um determinado intervalo de tempo, indicando a taxa de variação dessa energia.

No solo, a irradiância solar normalmente alcança cerca de 1000 W/m^2 com o sol a pico as 12:00 a.m, enquanto no espaço, na média da distância entre o Sol e a Terra, esse valor chega aproximadamente a 1353 W/m^2 . A indústria fotovoltaica considera 1000 W/m^2 como referência padrão para a especificação e avaliação de células e módulos fotovoltaicos, possibilitando a comparação da eficiência entre diferentes fabricantes em condições uniformes. A medição da irradiância é fundamental para avaliar o desempenho e a eficácia dos sistemas fotovoltaicos, levando em conta esse padrão. A Figura 5.2.[4]

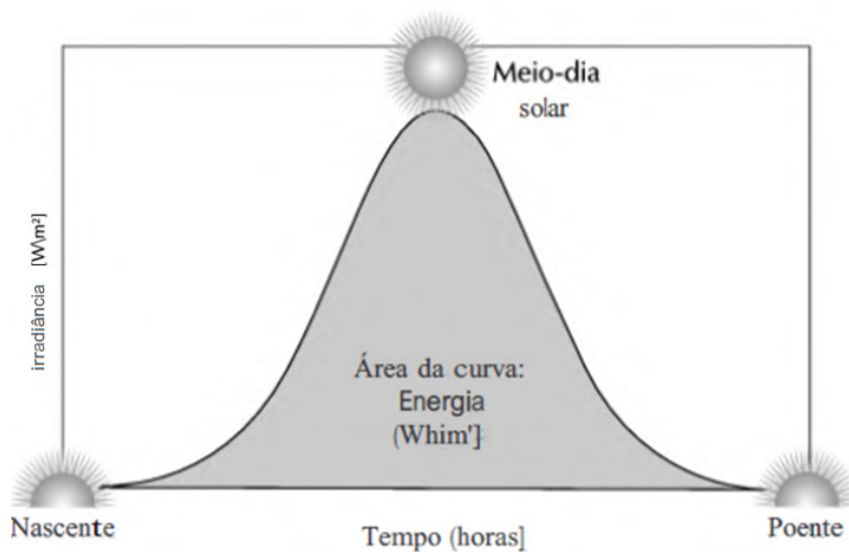


Figura 5.2: Irradiância ao longo de um dia.

Fonte: Energia Solar Fotovoltaica. Villalva, Marcelo. Editora. Érica LTDA 2013, p 46].

5.3 ORIENTAÇÃO DOS MÓDULOS

A Escolha do ângulo de inclinação do módulo solar destaca a importância de determinar corretamente esse ângulo, especialmente em sistemas fotovoltaicos fixos. Uma escolha errada diminui a captação de recurso solar, afetando a eficiência da produção de energia elétrica. [4]

5.3.1 Ângulo ideal para radiação direta:

O ângulo ideal de inclinação do módulo solar é aquele que faz com que os raios do Sol incidam perpendicularmente à sua superfície, maximizando a captação de radiação e a produção de energia elétrica. Esse ângulo varia ao longo do ano no verão, um ângulo menor é melhor, enquanto no inverno, um ângulo maior é mais eficiente. A latitude e as condições sazonais também influenciam. Sistemas de ajuste sazonal ou diário podem otimizar o ângulo, mas são mais caros e complexos. Abaixo podemos observar, na Figura 5.3, os comportamentos para cada ajuste angular e sua eficiência ao longo de um ano. [4]

5.3.2 Compromisso com o Ângulo Fixo:

Em sistemas solares fotovoltaicos fixos, o ângulo de inclinação é fixo e definido como um ângulo de compromisso, que é a inclinação média ideal para o local. Esse ângulo maximiza a produção média anual, equilibrando a produção entre as estações. É calculado com base na latitude e pode ser ajustado para priorizar o inverno ou o verão. Em regiões onde não se é possível ajustar para o ângulo ideal de captação utiliza-se este método, por exemplo, projetos de prédios já acabados onde não se pode mudar a estrutura para comportar os módulos.[4]

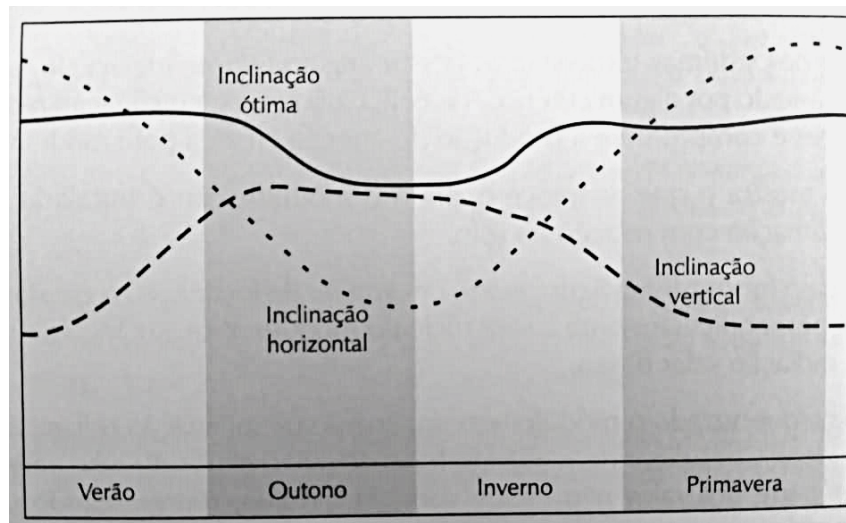


Figura 5.3: Energia solar captada ao longo do ano com diferentes inclinações.

Fonte: Energia Solar Fotovoltaica. Villalva, Marcelo. Editora. Érica LTDA 2013, p 58].

5.3.3 Recomendações de ângulos

A seção descreve orientações práticas para definir a inclinação dos módulos solares com base na latitude da instalação e recurso solar disponível, conforme o manual de instalação fotovoltaico do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB). O objetivo é encontrar um ângulo fixo que maximize a captação de energia solar ao longo do ano, levando em conta as variações sazonais da trajetória do sol, mesmo não existindo um consenso sobre o melhor método de escolha do ângulo, consultando a bibliografia existente pode-se seguir algumas recomendações, encontradas na Tabela 5.1. [4]

Latitude geográfica do local	Ângulo de inclinação recomendado
0° a 10°	$a = 10^\circ$
11° a 20°	$a = \text{latitude}$
21° a 30°	$a = \text{latitude} + 5^\circ$
31° a 40°	$a = \text{latitude} + 10^\circ$
41° ou mais	$a = \text{latitude} + 15^\circ$

Tabela 5.1: Ângulo de inclinação recomendado para diferentes latitudes.

5.3.3.1 Funcionamento da Tabela

A tabela organiza as recomendações de inclinação em faixas de latitude, levando em conta a variação previsível da posição do Sol em diferentes regiões do planeta.

- **Divisão por faixas de latitude** Em regiões próximas ao equador (baixa latitude), os ângulos recomendados são menores, já que o Sol fica mais alto no céu. Em contrapartida, latitudes mais elevadas requerem ângulos maiores devido à maior inclinação solar.
- **Ajustes sazonais** Para sistemas que permitem ajustes ao longo do ano, a tabela sugere dois ângulos:

- **Ângulo menor:** Ideal para o verão, quando o Sol está mais alto no horizonte.
- **Ângulo maior:** Voltado para o inverno, quando o Sol está mais baixo.

Essa abordagem ajuda a maximizar a produção de energia em períodos específicos, como no inverno, quando a insolação é mais limitada.

- **Ângulo médio fixo:** Para sistemas com inclinação fixa, a tabela recomenda um ângulo de compromisso que busca equilibrar a geração de energia ao longo das estações. Normalmente, esse valor é próximo à latitude do local, mas pode ser ajustado de acordo com a prioridade:
 - **Latitude +10° a +15°:** Favorece a produção durante o inverno, ideal para locais com menor insolação nos meses mais frios.
 - **Latitude -10° a -15°:** Prioriza o verão, sendo mais adequado para regiões com alta demanda nessa estação.

6 INTRODUÇÃO À GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

A energia fotovoltaica Utiliza a radiação solar em eletricidade por meio de células fotovoltaicas feitas de materiais semicondutores. Quando a luz solar atinge essas células, ocorre um fenômeno físico denominado efeito fotoelétrico, gerando uma corrente elétrica que será utilizada para alimentar a carga ligada ao sistema. Essa forma de energia é renovável e sustentável, ajudando a reduzir a dependência de combustíveis fósseis e a combater as mudanças climáticas. Além de ser limpa, a tecnologia está se tornando mais acessível e competitiva. Avanços tecnológicos e a redução dos custos de instalação estão tornando a energia fotovoltaica uma opção viável para suprir a crescente demanda mundial por energia, contribuindo para um futuro mais sustentável.

6.1 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Com base no Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos da CRESESB, podemos considerar que os principais componentes a serem considerados para implementação de uma usina fotovoltaica são: [2]

1. **Módulos Fotovoltaicos:** São as unidades que convertem a luz solar em eletricidade. Cada módulo é composto por várias células fotovoltaicas interligadas. Existem vários tipos de módulos, sendo os principais os painéis solares de cristal único, comumente chamados de monocristalinos, feitos de cristais de silício orientados de forma alinhada. Estes são os mais eficientes, com eficiência de cerca de 21%, para saber o ângulo de latitude de uma localidade, pode-se recorrer a um atlas com mapas do Brasil, à ferramenta de mapas do Google (maps.google.com) ou à calculadora solar (disponível no endereço www.calculadorasolar.com.br). Os painéis monocristalinos apesar de serem mais caros, são duráveis e captam mais luz solar. Outro tipo são os policristalinos, que são painéis solares feitos de cristais de silício desalinhados. Eles são econômicos e fáceis de manter, mas menos eficientes, com eficiência de 14 a 20%.
2. **Inversores:** Dispositivos que convertem a corrente contínua (CC) gerada pelos módulos em corrente alternada (CA), que é a forma de eletricidade utilizada na maioria das aplicações residenciais e comerciais. Os conversores que serão utilizados para as simulações serão apresentados mais adiante neste trabalho.
3. **Baterias:** Armazenam a energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos para uso posterior, especialmente em sistemas off-grid ou em situações em que a energia da rede não está disponível. Porém não serão consideradas nesse trabalho, pois todos os projetos recebidos pelas escolas são On-Grid, ligados a rede elétrica da concessionária visando barateamento das tarifas.
4. **Estruturas de Suporte:** Suportam os módulos fotovoltaicos, garantindo que estejam posicionados corretamente para otimizar a captação de luz solar, as escolas em sua maioria apresentam essa estrutura comportada em cima do telhado.
5. **Cabeamento Elétrico:** Interliga os diferentes componentes do sistema, permitindo a condução da eletricidade gerada pelos módulos até o inversor e, em seguida, até a carga ou à rede elétrica.

6. **Dispositivos de Proteção:** Incluem fusíveis, disjuntores e outros dispositivos que protegem o sistema contra sobrecargas, curtos-circuitos e outros problemas elétricos.

6.2 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

- **Sistemas conectados à rede (on-grid):** Esse tipo de sistema é projetado para injetar a energia gerada diretamente na rede elétrica conforme diagrama da Figura 6.1. Ele é amplamente utilizado em áreas urbanas e em locais onde há fácil acesso à rede de distribuição. Durante o dia, a energia produzida pelos painéis solares é utilizada para abastecer o local, e o excedente pode ser enviado para a rede, gerando créditos que podem ser utilizados posteriormente. Esse tipo de sistema não necessita de baterias, o que reduz o custo de instalação. [2]

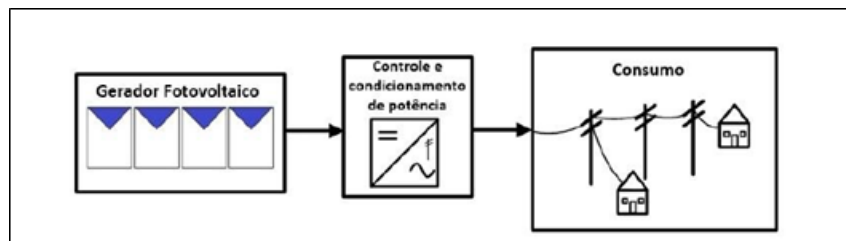


Figura 6.1: Diagrama de blocos de sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.

Fonte: Manual de Engenharia Fotovoltaica, CRESESB.

- **Sistemas isolados (off-grid):** Esses sistemas são voltados para locais sem acesso à rede elétrica, como áreas rurais ou regiões remotas conforme diagrama da Figura 6.2. Eles são autossuficientes, armazenando a energia gerada em baterias para garantir o fornecimento mesmo em períodos sem sol, como à noite ou em dias nublados. Embora o custo de instalação seja mais elevado devido ao uso de baterias, esses sistemas são essenciais para prover energia onde a rede elétrica não alcança. [2]

6.3 CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

O módulo fotovoltaico é caracterizado em termos de potência elétrica de pico (Wp) sob condições-padrão de ensaio de Standart Test Conditions (STC), que incluem irradiância de 1000 W/m^2 , espectro AM 1,5 e temperatura de célula de 25°C . Características elétricas, como

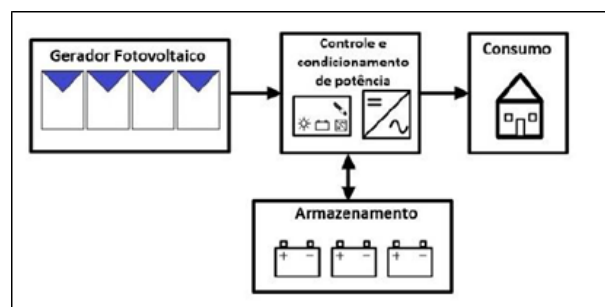


Figura 6.2: Diagrama De Blocos De Sistema Fotovoltaico Isolado.

Fonte: Manual de Engenharia Fotovoltaica, CRESESB.

tensão de circuito aberto (V_{oc}) e corrente de curto-circuito (I_{sc}) dependem das condições de temperatura e irradiância. A tensão (V_{oc}) é medida com o módulo desconectado, enquanto (I_{sc}) é medida conectando os terminais a um amperímetro. Um ensaio mais completo envolve o traçado da curva característica I-V, realizando uma varredura de tensão e corrente até a tensão de circuito aberto, registrando pares de dados que permitem analisar o comportamento elétrico do módulo. Abaixo na Figura 6.3 trazemos as curvas características de corrente e tensão dos módulos FV. [2]

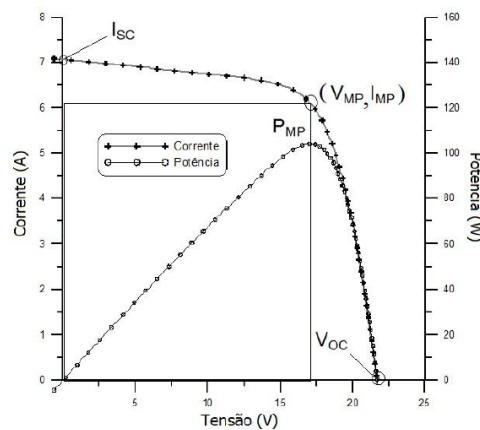


Figura 6.3: Curva característica I-V e curva de Potência P-V para um módulo de 1000Wp

Fonte: Manual de Engenharia Fotovoltaica, CRESESB.

A fim de obter uma melhor avaliação do recurso solar, também se faz necessário considerar o efeito que a irradiância tem sobre os painéis solares, visto que a corrente elétrica gerada aumenta proporcionalmente a irradiância presente no local, como podemos observar na Figura 6.4.[2]

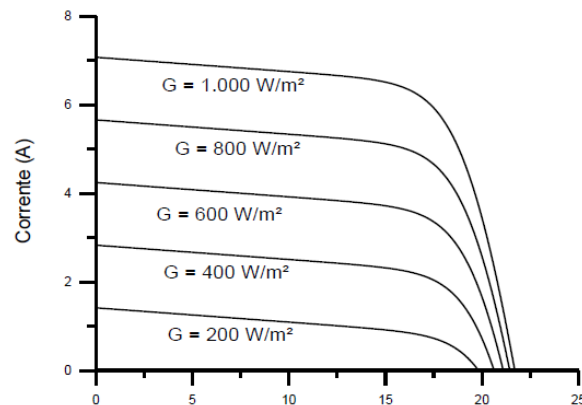


Figura 6.4: Efeito causado pelo variação da irradiância sobre a Curva I-V.

Fonte: Manual de Engenharia Fotovoltaica, CRESESB.

6.4 ANÁLISE DE RECURSO SOLAR

A avaliação da radiação solar é de muita importância para o cálculo do potencial energético de sistemas fotovoltaicos. Uma vez que definido, ela é quantificada pela sua irradiância

e irradiação, ou seja, pelo fluxo de potência ou energia por metro quadrado. De modo geral, para o cálculo da radiação é utilizado um “Ano Meteorológico Padrão ou Típico”, no qual, com base nos dados acumulados nos anos passados, prevê-se o comportamento da radiação solar. Ademais, a eficiência do sistema em relação à radiação é mais influente do que as variações provocadas pela temperatura. Um fator importante nesse processo é o número de Horas de Sol Pleno (HSP), que representa o tempo em que a irradiância solar seria equivalente a 1 kW/m^2 ao longo do dia. Esse conceito simplifica a análise da energia acumulada diariamente, considerando a variabilidade da irradiância em intervalos horários.

No presente trabalho, serão aplicadas as ferramentas de medição de irradiância da CRESESB para a coleta e análise de dados de radiação solar nas áreas pertencentes as escolas beneficiadas pelo programa “Escola Solar”, com a latitudes e longitudes é possível observar todos os parâmetros necessários, inclusive a irradiância. Esses dados serão essenciais para simulações e dimensionamentos, levando em conta os valores médios mensais e a variação climática ao longo do ano. Essa abordagem permitirá uma estimativa mais precisa da viabilidade econômica e do desempenho dos sistemas fotovoltaicos instalados em escolas públicas.

7 INTRODUÇÃO A ANÁLISE FINANCEIRA DE SISTEMAS FOTOVOLTAÍCO

Os conceitos básicos de viabilidade econômica, segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) [?], envolvem a análise de custos e benefícios de um projeto, considerando fatores como investimento inicial, custos operacionais, receitas esperadas e o retorno sobre o investimento (ROI). A viabilidade econômica busca determinar se um projeto é financeiramente sustentável e se os benefícios superam os custos ao longo do tempo. Além disso, é importante considerar aspectos como a taxa de desconto, o tempo de payback e a análise de riscos associados ao projeto. Esses elementos ajudam a tomar decisões informadas sobre a implementação de sistemas, como os fotovoltaicos, no contexto econômico e energético de um país.

7.1 PRINCIPAIS INDICADORES FINANCEIROS UTILIZADOS

Os principais indicadores financeiros utilizados para avaliar a viabilidade econômica de projetos, como sistemas fotovoltaicos, incluem:

1. **Retorno sobre o Investimento (ROI):** Mede a rentabilidade do investimento, calculando a relação entre o lucro líquido e o custo do investimento.
2. **Payback:** Indica o tempo necessário para recuperar o investimento inicial a partir dos fluxos de caixa gerados pelo projeto.
3. **Taxa Interna de Retorno:** Representa a taxa de desconto que torna o VPL igual a zero. É uma medida da rentabilidade do investimento.
4. **Custo Médio Ponderado de Capital (WACC):** Refere-se ao custo médio de financiamento do projeto, ponderando o custo da dívida e do capital próprio. Esses indicadores ajudam a avaliar a viabilidade financeira e a atratividade de projetos de energia renovável, e servirão como base para futura análise das usinas de microgeração abordadas por este estudo.

Será considerado também alguns parâmetros financeiros do mercado livre de energia elétrica que incluem o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD), que reflete o preço da energia no curto prazo, e o preço dos contratos bilaterais, que são pactuados entre a empresa fornecedora e o consumidor diretamente. Também envolvem custos regulados, como TUST e TUSD, e a demanda contratada, que deve ser ajustada com a do consumo em evitar pagamentos adicionais. Em termos econômicos, a garantia financeira requerida em CCEE, a iguais prazos de contratação e custos de gestão são importantes. Além disso, consumidores especiais têm aproximadamente o mesmo objetivo, como pagamento reduzido da TUSD para consumo com energia renovável, e devem se proteger de riscos hidrológicos e de mercado que interferem no PLD total e no seu custo. Esses fatores determinam a viabilidade e eficiência na transferência para o mercado livre.

7.2 ALGORITMOS DA ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica é fundamental para determinar se o investimento em uma usina solar fotovoltaica é viável sob o ponto de vista financeiro. A seguir, são apresentados os principais indicadores utilizados e suas respectivas fórmulas.

7.2.1 Payback Simples

O **Payback** representa o tempo necessário para recuperar o valor investido no projeto através da economia gerada com a energia produzida.

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Economia Anual com Energia}} \quad (7.1)$$

Exemplo: Se uma escola investe R\$ 100.000 e economiza R\$ 20.000 por ano com a conta de energia, o payback será:

$$\text{Payback} = \frac{100.000}{20.000} = 5 \text{ anos} \quad (7.2)$$

7.2.1 Retorno Sobre o Investimento (ROI)

O **ROI** calcula o lucro percentual obtido com o projeto em relação ao investimento inicial.

$$\text{ROI (\%)} = \left(\frac{\text{Lucro Líquido Total}}{\text{Investimento Inicial}} \right) \times 100 \quad (7.3)$$

Lucro Líquido Total = Economia acumulada – Custos operacionais e de manutenção.

7.2.1 Valor Presente Líquido (VPL)

O **VPL** indica o valor atual do fluxo de caixa que o projeto irá gerar ao longo do tempo, descontado a uma taxa de atratividade.

$$\text{VPL} = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (7.4)$$

Onde:

- FC_t = fluxo de caixa no período t
- i = taxa mínima de atratividade (por exemplo, 8% ao ano)
- n = número de períodos (anos)
- I_0 = investimento inicial

Interpretação: Se o $\text{VPL} > 0$, o projeto é economicamente viável.

7.2.1 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A **TIR** é a taxa de desconto que faz com que o VPL seja igual a zero. É utilizada para comparar com a taxa de mercado ou com outras alternativas de investimento.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + \text{TIR})^t} - I_0 \quad (7.5)$$

Critério de decisão: Se $\text{TIR} >$ taxa mínima de atratividade, o projeto é viável.

7.2.1 Implementação em Projetos Solares

Os algoritmos para esses indicadores geralmente são implementados em planilhas de Excel, softwares de engenharia como *PV*SOL*, *HOMER Energy*, ou scripts em Python/Matlab, com base em:

- Perfil de consumo mensal da escola
- Radiação solar média local
- Eficiência do sistema
- Tarifa da distribuidora
- Custos operacionais

8 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, vamos explorar como foi desenvolvida a análise da viabilidade das usinas solares de microgeração nas escolas estaduais. Para isso, seguimos uma abordagem que envolve tanto os aspectos técnicos quanto regulatórios, administrativos e econômicos, sempre com base em estudos e normas já existentes, além de dados reais de projetos que estão em funcionamento e ainda em fase de projeto, de maneira mais sucinta seguiremos o fluxograma da Figura 8.1

Primeiro, faremos uma avaliação dos requisitos técnicos, começando pela escolha do local ideal para instalar os painéis solares, como telhados ou áreas livres de sombras. Também vamos considerar a estrutura que sustenta esses painéis e verificar se ela é capaz de resistir às condições climáticas da região. Além disso, entraremos em detalhes sobre os componentes do sistema, como os próprios painéis, os inversores que transformam a energia para uso na rede, os dispositivos de proteção e os medidores que ajudam a calcular a energia gerada e o que pode ser economizado.

Do ponto de vista regulatório, daremos atenção às normas da ANEEL, NBR-5410 (Instalações Elétricas de Baixa Tensão), NBR ISO 50001 que traz diretrizes sobre segurança, desempenho e eficiência energética e que podem orientar todo o processo de instalação e operação de usinas solares de microgeração no Brasil. Vamos entender como o sistema é conectado à rede elétrica, como funciona o sistema de compensação de energia (que permite que o excedente gerado seja convertido em créditos) e os passos necessários para que a instalação receba as devidas autorizações.[11]

Sobre o aspecto administrativo, será importante verificar as exigências de licenciamento e as aprovações necessárias junto à concessionária de energia, além de entender a importância de uma manutenção regular para manter o sistema funcionando de forma eficiente. Quando falamos da parte econômica, o foco será analisar os custos de instalação, operação e manutenção das usinas solares. Isso inclui estudar diferentes tecnologias disponíveis e as utilizadas, e entender quanto tempo leva para que o investimento inicial comece a gerar retorno, conhecido popularmente como ROI (return on investment). Também serão considerados os incentivos e financiamentos que podem ajudar a reduzir esses custos.

A partir dos projetos já em operação, vamos usar softwares para simular o desempenho das usinas e coletar dados reais de consumo de energia e da economia financeira que essas escolas têm alcançado. Com essas informações, poderemos estimar o retorno sobre o investimento em diferentes cenários, considerando fatores como a variação de radiação solar em diferentes regiões e as tarifas de energia elétrica.

Além disso, incluímos a análise de um projeto específico de microgeração solar que segue as diretrizes impostas pela Secretaria do Estado do Paraná. Esse projeto contempla desde a seleção das escolas participantes até a execução do sistema fotovoltaico, garantindo a conformidade com os padrões técnicos e legais locais, bem como a maximização dos benefícios econômicos e socioambientais.[12]

Por fim, com base em tudo explicitado, vamos desenvolver diretrizes que ajudem a implementar essas usinas solares de maneira eficiente nas escolas estaduais, buscando não apenas maximizar os benefícios econômicos, mas também trazer ganhos educacionais e ambientais para essas comunidades.

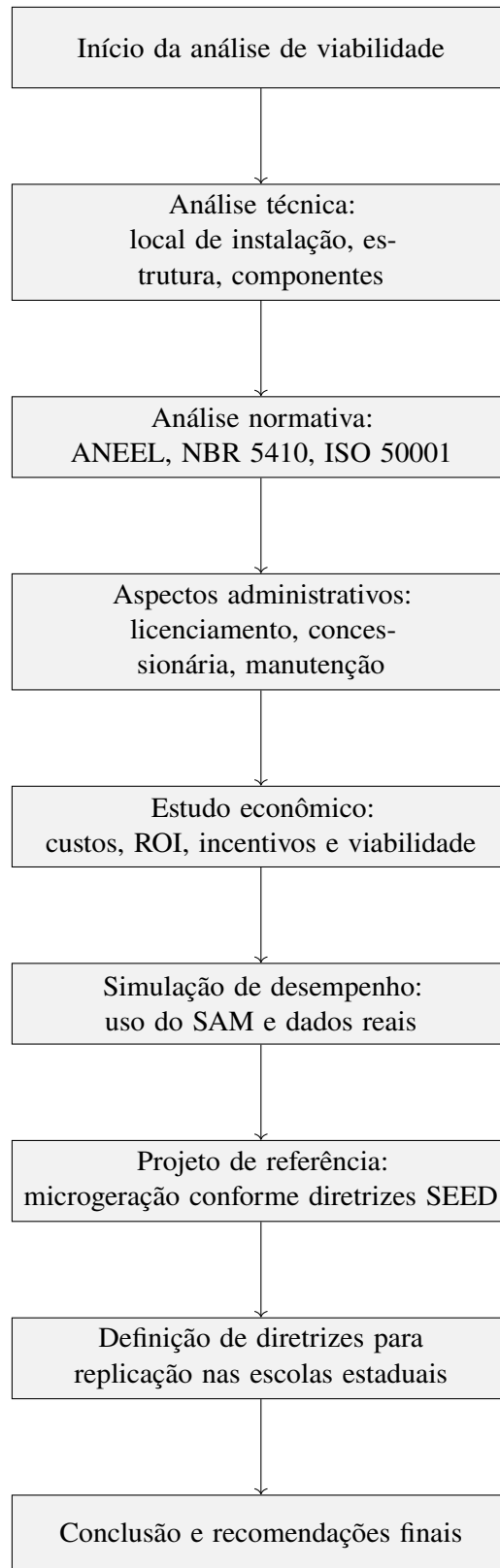


Figura 8.1: Fluxograma da metodologia aplicada no trabalho

8.1 ANÁLISE DOS LOCAIS

O primeiro ponto a ser considerado em um projeto de usina de geração solar é justamente o local da instalação. Fatores como o tamanho do terreno, a área de telhado ou chão que a instalação irá ocupar e, indubitavelmente, os fatores climáticos da região, sendo o de principal foco a irradiação solar média observam-se na Tabela 8.1 abaixo, os detalhes dos locais analisados. Nosso principal objeto de preocupação é o índice médio de radiação solar do local. Para isso, utilizaremos o SunData, uma ferramenta criada pelo CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito) para ajudar a calcular a média mensal da irradiação solar diária em qualquer lugar do Brasil, facilitando o planejamento de sistemas fotovoltaicos. Dentre os dados adquiridos serão selecionadas cinco escolas para as simulações em softwares. [2]

Tabela 8.1: Dados dos Locais e Irradiação Solar Diária Média Mensal [kWh/m²*dia]

Nome da Escola	Cidade	Latitude	Longitude	Plano Horizontal	Ângulo igual à latitude	Maior média anual	Maior mínimo mensal	Inclinação Melhor ângulo
CE, Prof. Bento M R Neto	Paranavaí	-23,087060	-52,463000	4,97	5,18	5,19	5,01	20°N
CE Flávio Warken	Foz do Iguaçu	-25,447700	-54,572020	6,64	5,85	6,06	4,75	20°N
CE Bento Mussurunga	Umuarama	-23,324530	-53,324530	4,90	5,10	5,11	4,79	20°N
CE Primeiro Centenário	Campo Largo	-25,470260	-49,523100	4,19	4,38	4,38	4,12	21°N
CE Rodrigues Alves	Maringá	-23,420000	-51,933350	4,89	5,12	5,12	4,97	20°N
CE Vista Bela	Londrina	-23,291600	-51,169660	4,90	5,13	5,15	5,01	20°N
CE Arnaldo Busatto	Foz do Iguaçu	-25,547700	-54,588070	4,78	4,97	4,99	4,63	20°N
CE Silvio Barros	Maringá	-23,420000	-51,933350	4,89	5,12	5,12	4,97	20°N
CE Maria do Rosario Castaldi	Londrina	-23,291600	-51,169660	4,90	5,13	5,15	5,01	20°N
CE Paulo A Tomaziniho	Umuarama	-23,324530	-53,324530	4,90	5,10	5,11	4,79	20°N
CE de Paranavaí	Paranavaí	-23,087060	-52,465130	4,97	5,19	5,19	5,01	20°N
CE Pedro Boaretto Neto	Cascavel	-24,955280	-53,455280	4,72	4,95	4,95	4,64	21°N
CE Ulysses Guimaraes	Foz do Iguaçu	-25,547700	-54,588070	4,78	4,97	4,99	4,63	20°N
CE Jandaia do Sul	Jandaia do Sul	-23,603444	-51,644490	4,86	5,09	5,09	4,95	21°N
CE Maria Jose B Aguiar	Londrina	-23,291600	-51,169660	4,90	5,13	5,15	5,01	20°N
CE Eleodoro E Pereira	Cascavel	-24,955280	-53,455280	4,72	4,95	4,95	4,64	21°N
CE Dom Pedro II	Foz do Iguaçu	-25,547700	-54,588070	4,78	4,97	4,99	4,63	20°N
CE Marcelino Champagnat	Londrina	-23,291600	-51,169660	4,90	5,13	5,15	5,01	20°N
CECM Mercúrial Luiz Zanchiim	Sarandi	-23,443300	-51,876710	4,87	5,11	5,12	5,01	20°N
CE Prof. ^a Regina Tokano	Uraí	-23,200000	-50,800011	4,96	5,19	5,19	5,04	20°N

Fonte: Auto-Própria.

8.1.1 Áreas Apreendidas pelas Usinas

Nesse momento vamos definir as áreas ocupadas pelas usinas, considerando os módulos utilizados nos projetos entregues e as suas características, observar Tabela 8.2. Esses dados são importantes para os cálculos de energia produzida, que serão feitos mais adiante, utilizando o método de cálculo apresentado na metodologia, e também as simulações em software.

Tabela 8.2: Áreas ocupadas pelas usinas solares nas escolas selecionadas

Nome da Escola	Cidade	Latitude	Longitude	Modelo do Módulo	Dimensões (mm)	Nº de Módulos	Área Ocupada (m ²)
CE Primeiro Centenário	Campo Largo	-25.4702	-49.5231	JKM555-575N-72HL4	2278×1134×35	260	671,646
CE Prof. Bento M R Neto	Paranavaí	-23.0871	-52.4630	JKM555-575N-72HL4	2278×1134×35	156	402,987
CE Pedro Boaretto Neto	Cascavel	-24.9553	-53.4553	JKM555-575N-72HL4	2278×1134×35	156	402,987
CE Maria Jose B Aguiar	Londrina	-23.2916	-51.1697	JKM555-575N-72HL4	2278×1134×35	152	392,654
CE Prof. ^a Regina Tokano	Uraí	-23.2000	-50.8000	JKM555-575N-72HL4	2278×1134×35	156	402,987

Fonte: Secretaria de Educação.

8.1.2 Estimativas de Energia Produzida

A energia gerada por uma usina fotovoltaica pode ser estimada utilizando a seguinte fórmula simplificada:

$$E = G \times A \times \eta \times PR \quad (8.1)$$

Onde:

- E : Energia estimada produzida (kWh/mês)
- G : Irradiação solar média diária no local (kWh/m²/dia)
- A : Área útil do sistema fotovoltaico (m²)
- η : Eficiência média dos módulos fotovoltaicos (tipicamente entre 15% e 21%)
- PR : Performance Ratio (razão de desempenho, tipicamente entre 0,75 e 0,85)

A seguir, apresentamos uma tabela exemplo de cálculo de energia mensal estimada para diferentes escolas:

Tabela 8.3: Estimativa de Energia Produzida Mensal

Escola	G (kWh/m ² /dia)	Área (m ²)	η	PR	Energia Estimada (kWh/mês)
Prof. Bento M R Neto	5,19	402,99	0,18	0,80	9.041
Pedro Boaretto Neto	4,95	402,99	0,18	0,80	8.614
Maria Jose B Aguiar	5,15	392,65	0,18	0,80	8.820
Primeiro Centenário	4,38	671,65	0,18	0,80	12.774
Regina Tokano	5,19	402,99	0,18	0,80	9.041

8.1.2 Algoritmo para Estimativa de Produção

Abaixo está um código com algoritmo (em python) utilizado para automatizar o cálculo de energia mensal:

Para cada escola:

```
Ler G, A, eficiencia, PR
Energia_diaria = G * A * eficiencia * PR
Energia_mensal = Energia_diaria * 30
Imprimir Energia_mensal
```

8.1.2 Observações

Esses valores são estimativas médias mensais e podem variar conforme:

- Temperatura ambiente (que afeta a eficiência)
- Sujidade dos painéis
- Sombras parciais
- Perdas elétricas e de conversão

8.1 ROTEIRO PARA SIMULAÇÕES DE CENÁRIOS COM O SOFTWARE SAM (SYSTEM ADVISOR MODEL)

Para complementar a análise econômica, foi utilizada a ferramenta **System Advisor Model (SAM)**, desenvolvida pelo *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, que permite a simulação detalhada de sistemas de geração de energia, com foco em energia solar fotovoltaica. O objetivo principal é modelar cenários diversos e verificar o impacto de variações de parâmetros técnicos e econômicos no desempenho e viabilidade dos projetos. [9]

8.1.2 Parâmetros Utilizados na Simulação

A simulação foi configurada com os seguintes dados genéricos, que podem ser adaptados para diferentes escolas:

- Localização: Coordenadas geográficas da escola (latitude e longitude)
- Tipo de sistema: Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (On-Grid)
- Potência Instalada: 75 kWp
- Modelo dos Módulos: Jinko JKM555-575N-72HL4 (ou similar)
- Eficiência do Inversor: 96%
- Inclinação dos painéis: Igual à latitude local
- Taxa de degradação anual dos módulos: 0,5%
- Vida útil do sistema: 25 anos
- Custo do sistema: R\$ 5,00/Wp instalado
- Tarifa de energia: R\$ 0,80/kWh
- Taxa de desconto: 8% ao ano

8.1.2 Cenários Analisados

Foram modelados três cenários principais para avaliar a sensibilidade dos indicadores econômicos, considerando 3 colégios diferentes:

- **Cenário 1 — Base:** Usando valores médios esperados de irradiação e custo.
- **Cenário 2 — Otimista:** Considerando maior irradiação e redução no custo de instalação (R\$ 4,50/Wp).
- **Cenário 3 — Pessimista:** Considerando menor irradiação e aumento nos custos operacionais e manutenção.

8.1.2 Resultados Esperados

Para cada cenário, o SAM fornece:

- Produção Anual de Energia (kWh/ano)
- Economia acumulada ao longo do tempo
- Indicadores Econômicos: Payback, VPL, TIR e ROI

Esses resultados são exportados do SAM e inseridos em planilhas para análise comparativa. Dessa forma, é possível identificar quais condições são mais críticas para o retorno financeiro, e propor estratégias de mitigação, como incentivo fiscal ou priorização de regiões com maior radiação solar.

8.2 ANALISE DAS UNIDADES ESCOLARES SIMULADAS

Neste capítulo, apresentamos a modelagem técnico-financeira de sistemas fotovoltaicos em cinco escolas estaduais do Paraná, utilizando o software extitSystem Advisor Model (SAM). As simulações contemplam condições climáticas locais, dimensionamento técnico do sistema e estimativas financeiras para um horizonte de 25 anos. O objetivo é avaliar a viabilidade econômica e o desempenho energético das instalações propostas.

Cada subseção a seguir segue uma estrutura padronizada que inclui: dados de localização e recurso solar, parâmetros climáticos, configuração do sistema fotovoltaico (módulos e inversores), arranjo físico e um resumo financeiro com LCOE, VPL e incentivos estimados.

8.2.1 CE Primeiro Centenário do Brasil – Campo Largo/PR

8.2.1.1 Localização e Recurso Solar

- Latitude: $-25,48^{\circ}$
- Longitude: $-49,53^{\circ}$
- Altitude: 936 m
- Fuso horário: GMT-3

Tabela 8.4: Médias anuais dos parâmetros climáticos em Campo Largo – PR

Parâmetro	Valor Médio Anual
GHI	4,43 kWh/m ² /dia
DNI	4,18 kWh/m ² /dia
DHI	1,81 kWh/m ² /dia
Temperatura	17,3°C
Vento	0,9 m/s

8.2.1.2 *Resumo Técnico e Financeiro*

- Módulos: 364
- Potência instalada: 200,36 kW_{dc}
- Inversores: 2 Sungrow SG250HX-US
- Custo total instalado: R\$ 1.215.000,00
- Geração estimada: 6.733.000 kWh
- LCOE: R\$ 0,18/kWh
- VPL: R\$ -16.320.769,99
- Incentivos: R\$ 150.000,00

8.2.2 CE Prof. Pedro Boareto Neto – Cascavel/PR

8.2.2.1 *Localização e Recurso Solar*

- Latitude: $-24,96^{\circ}$
- Longitude: $-53,45^{\circ}$
- Altitude: 781 m
- Fuso horário: GMT-3

Tabela 8.5: Médias anuais dos parâmetros climáticos em Cascavel – PR

Parâmetro	Valor Médio Anual
GHI	5,08 kWh/m ² /dia
DNI	4,72 kWh/m ² /dia
DHI	1,84 kWh/m ² /dia
Temperatura	20,2°C
Vento	1,3 m/s

8.2.2.2 *Resumo Técnico e Financeiro*

- Módulos: 156
- Potência instalada: 85,9 kW_{dc}
- Inversor: 1 Sungrow SG250HX-US
- Custo total instalado: R\$ 620.000,00
- Geração estimada: 6.320.000 kWh
- LCOE: R\$ 0,22/kWh
- VPL: R\$ -55.889.446,09
- Incentivos: R\$ 80.000,00

8.2.3 CE Prof. Maria José B. Aguiar – Londrina/PR

8.2.3.1 *Localização e Recurso Solar*

- Latitude: $-23,31^\circ$
- Longitude: $-51,17^\circ$
- Altitude: 610 m
- Fuso horário: GMT-3

Tabela 8.6: Médias anuais dos parâmetros climáticos em Londrina – PR

Parâmetro	Valor Médio Anual
GHI	5,00 kWh/m ² /dia
DNI	4,55 kWh/m ² /dia
DHI	1,92 kWh/m ² /dia
Temperatura	22,6°C
Vento	1,4 m/s

8.2.3.2 *Resumo Técnico e Financeiro*

- Módulos: 156
- Potencia instalada: 85,9 kW_{dc}
- Inversor: 1 Sungrow SG250HX-US
- Custo total instalado: R\$ 618.000,00
- Geração estimada: 6.280.000 kWh
- LCOE: R\$ 0,23/kWh
- VPL: R\$ -60.498.506,00
- Incentivos: R\$ 75.000,00

8.2.4 CE Prof. Regina Tokano – Uraí/PR

8.2.4.1 *Localização e Recurso Solar*

- Latitude: $-23,20^\circ$
- Longitude: $-50,79^\circ$
- Altitude: 450 m
- Fuso horário: GMT-3

Tabela 8.7: Médias anuais dos parâmetros climáticos em Uraí – PR

Parâmetro	Valor Médio Anual
GHI	5,05 kWh/m ² /dia
DNI	4,60 kWh/m ² /dia
DHI	1,90 kWh/m ² /dia
Temperatura	23,0°C
Vento	1,4 m/s

8.2.4.2 *Resumo Técnico e Financeiro*

- Módulos: 156
- Potência instalada: 85,9 kW_{dc}
- Inversor: 1 Sungrow SG250HX-US
- Custo total instalado: R\$ 612.000,00
- Geração estimada: 6.260.000 kWh
- LCOE: R\$ 0,24/kWh
- VPL: R\$ -69.439.434,79
- Incentivos: R\$ 70.000,00

8.2.5 CE Prof. Bento M. R. Neto – Paranavaí/PR

8.2.5.1 *Localização e Recurso Solar*

- Latitude: -23,08°
- Longitude: -52,46°
- Altitude: 474 m
- Fuso horário: GMT-3

Tabela 8.8: Médias anuais dos parâmetros climáticos em Paranavaí – PR

Parâmetro	Valor Médio Anual
GHI	5,24 kWh/m ² /dia
DNI	4,79 kWh/m ² /dia
DHI	1,88 kWh/m ² /dia
Temperatura	23,5°C
Vento	1,5 m/s

8.2.5.2 *Resumo Técnico e Financeiro*

- Módulos: 156
- Potência instalada: 85,9 kW_{dc}
- Inversor: 1 Sungrow SG250HX-US
- Custo total instalado: R\$ 653.173,40
- Geração estimada: 6.500.000 kWh
- LCOE: R\$ 0,27/kWh
- VPL: R\$ -58.412.653,69
- Incentivos: R\$ 82.351,89

9 ANÁLISE FINANCEIRA

9.1 CÁLCULO E ANÁLISE DOS INDICADORES ECONÔMICOS

Para aprofundar a análise da viabilidade dos sistemas fotovoltaicos, é fundamental compreender os principais indicadores econômicos utilizados: o Custo Nivelado de Energia (LCOE), o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR). A seguir, explico cada um deles, incluindo exemplos práticos baseados nas escolas analisadas.

9.1.1 Custo Nivelado de Energia (LCOE)

O LCOE representa o custo médio por quilowatt-hora (kWh) gerado pelo sistema ao longo de toda sua vida útil. Ele considera todos os custos do projeto (investimento inicial, operação, manutenção e eventuais substituições) divididos pela energia total gerada durante o período.

Matematicamente, pode ser expresso como:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

onde:

- C_t são os custos no ano t ;
- E_t é a energia gerada no ano t ;
- r é a taxa de desconto anual;
- N é o horizonte de análise (neste caso, 25 anos).

Exemplo prático: No colégio Primeiro Centenário, o LCOE calculado foi de R\$ 0,098/kWh, que é consideravelmente menor que a tarifa média residencial de R\$ 0,80/kWh, indicando que o custo de gerar energia solar no local é bastante competitivo.

9.1.2 Valor Presente Líquido (VPL)

O VPL mede o valor atual dos fluxos de caixa futuros gerados pelo projeto, descontados a uma taxa que representa o custo do capital ou a taxa mínima de atratividade. Ele indica o ganho (ou perda) em valores presentes do investimento.

A fórmula é:

$$VPL = \sum_{t=0}^N \frac{F_t}{(1+i)^t}$$

onde:

- F_t é o fluxo de caixa líquido no ano t (receitas menos despesas);
- i é a taxa de desconto (aqui considerada como 8% ao ano);

- N é o número de anos do projeto.

Um VPL positivo significa que o projeto gera retorno acima da taxa considerada.

Exemplo prático: O colégio Primeiro Centenário apresentou um VPL de R\$ 13,8 milhões, reforçando sua viabilidade econômica, enquanto a escola Regina Tokano teve o menor VPL, indicando menor retorno.

9.1.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR é a taxa de desconto que torna o VPL igual a zero, ou seja, o rendimento anual esperado do projeto. Se a TIR for maior que a taxa mínima de atratividade (8% neste estudo), o investimento é considerado rentável.

Ela é encontrada resolvendo a equação:

$$0 = \sum_{t=0}^N \frac{F_t}{(1 + TIR)^t}$$

Exemplo prático: A TIR do Primeiro Centenário foi de 12,2%, superando a taxa de atratividade, enquanto as outras escolas apresentaram TIRs entre 8,2% e 9,1%, ainda dentro da faixa de atratividade, embora mais próximas do limite.

9.1 INDICADORES ECONÔMICOS COMPARATIVOS

A tabela a seguir apresenta os principais indicadores de viabilidade econômica calculados para os sistemas fotovoltaicos simulados nas cinco escolas estaduais. Esses indicadores — o Custo Nivelado de Energia (LCOE), o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR) — permitem uma análise mais completa da atratividade dos projetos, indo além do simples saldo de caixa acumulado.

- **LCOE (R\$/kWh):** indica o custo médio para gerar 1 kWh de energia ao longo da vida útil do sistema. Quanto menor esse valor, mais competitivo o sistema se torna em relação à tarifa da rede elétrica. No caso das escolas analisadas, todos os LCOEs ficaram bem abaixo da tarifa média residencial, que gira em torno de R\$ 0,80/kWh, o que demonstra um bom potencial econômico. [6]
- **VPL (Valor Presente Líquido):** representa a diferença entre os benefícios projetados (como a economia na conta de luz) e os custos totais do projeto, ambos atualizados para o valor presente com base em uma taxa de desconto de 8% ao ano. Um VPL positivo indica que o projeto, mesmo com os gastos iniciais, retorna mais valor do que consome ao longo do tempo.
- **TIR (Taxa Interna de Retorno):** corresponde à taxa de retorno anual gerada pelo projeto, considerando todos os fluxos de caixa ao longo do tempo. Se a TIR for maior do que a taxa mínima de atratividade estabelecida (neste caso, 8%), o investimento é considerado financeiramente atrativo.

Os resultados apresentados na Tabela 9.1 mostram que, embora os saldos de caixa finais sejam negativos, os projetos ainda apresentam desempenho favorável sob uma perspectiva mais ampla de análise econômica. Isso reforça que, quando bem planejados, os sistemas fotovoltaicos podem ser investimentos sustentáveis e com retorno consistente, principalmente no contexto de instituições públicas.

Tabela 9.1: Indicadores econômicos dos sistemas fotovoltaicos simulados

Escola	LCOE (R\$/kWh)	VPL (R\$)	TIR (%)
Primeiro Centenário (Campo Largo)	0,098	2.147.000,00	12,2%
Pedro Boareto (Cascavel)	0,121	2.336.000,00	9,3%
Maria José B. Aguiar (Londrina)	0,120	2.350.000,00	9,4%
Regina Tokano (Uraí)	0,119	2.570.000,00	9,8%
Prof. Bento (Paranavaí)	0,118	2.620.000,00	10,1%

9.2 EXEMPLO PRÁTICO DOS INDICADORES FINANCEIROS APLICADOS

Para analisar a viabilidade econômica dos projetos fotovoltaicos apresentados, foram calculados os principais indicadores financeiros: **Custo Nivelado de Energia (LCOE)**, **Valor Presente Líquido (VPL)** e **Taxa Interna de Retorno (TIR)**. A seguir, são apresentadas as definições, fórmulas matemáticas e um exemplo prático de aplicação.

9.2.0 Custo Nivelado de Energia (LCOE)

O **LCOE** (*Levelized Cost of Energy*, em inglês) indica o custo médio por unidade de energia produzida ao longo da vida útil do sistema. Esse indicador é utilizado para comparar, de forma econômica, diferentes fontes de geração de energia.

$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (\text{R\$/kWh}) \quad (9.1)$$

Onde:

- C_t = custo total no ano t (incluindo instalação, O&M, seguros, etc.)
- E_t = energia gerada no ano t (em kWh)
- r = taxa de desconto real
- n = vida útil do projeto (em anos)

Exemplo: Considerando o caso da escola **Prof. Bento - Paranavaí**, temos:

- Custo total instalado: R\$ 653.173,40
- Geração média anual: 136.000 kWh
- Vida útil: 25 anos
- Taxa de desconto real: 6,4%

LCOE estimado:

$$\text{LCOE} \approx \frac{653.173,40}{\sum_{t=1}^{25} \frac{136.000}{(1+0,064)^t}} \approx \text{R\$ } 0,27/\text{kWh}$$

9.2.0 Valor Presente Líquido (VPL)

O **VPL** calcula o valor presente do saldo entre receitas e despesas futuras de um projeto, levando em conta o valor do dinheiro ao longo do tempo. Um VPL positivo indica que o projeto é financeiramente viável. [6]

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{R_t - C_t}{(1 + r)^t} \quad (\text{R\$}) \quad (9.2)$$

Exemplo: Com receitas projetadas de R\$ 128.454.435,52 e custos totais de R\$ 19.390.771,63 (com base no fluxo de caixa do SAM), a aplicação da taxa de desconto resulta em um VPL negativo estimado em aproximadamente – **R\$ 58.412.653,69**.

9.2.0 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A **TIR** é a taxa de desconto que torna o VPL igual a zero. Ela é utilizada para avaliar o retorno do projeto em relação a outras opções de investimento. [6]

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{R_t - C_t}{(1 + TIR)^t} = 0 \quad (9.3)$$

Exemplo: No caso da escola de Paranavaí, a TIR obtida com os fluxos disponíveis ficou abaixo da taxa de desconto adotada (6,4%), sugerindo que o retorno do projeto não cobre o custo de capital. Isso indica a necessidade de ajustes no modelo ou de maior incentivo financeiro.

9.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS FLUXOS DE CAIXA

Nesta parte do trabalho, comparo os fluxos de caixa simulados de cinco escolas estaduais diferentes. Levei em consideração variáveis como localização, tarifa de energia e a potência instalada dos sistemas fotovoltaicos. As simulações foram realizadas no System Advisor Model (SAM), e os valores foram convertidos para reais (R\$), utilizando uma taxa de câmbio de R\$ 5,70 por dólar. [8]

9.3.1 Resumo Geral dos Resultados

A Tabela 9.2 traz um panorama geral dos principais indicadores financeiros acumulados ao longo de 25 anos de operação dos sistemas.

Tabela 9.2: Resumo dos fluxos de caixa simulados ao longo de 25 anos

Escola	Receita Estimada (R\$)	Custo Total (R\$)	Saldo Final (R\$)
Primeiro Centenário (Campo Largo)	R\$ 3.362.000,00	R\$ 1.215.000,00	R\$ 2.147.000,00
Pedro Boareto (Cascavel)	R\$ 2.956.000,00	R\$ 620.000,00	R\$ 2.336.000,00
Maria José B. Aguiar (Londrina)	R\$ 3.000.000,00	R\$ 650.000,00	R\$ 2.350.000,00
Regina Tokano (Uraí)	R\$ 3.250.000,00	R\$ 680.000,00	R\$ 2.570.000,00
Prof. Bento (Paranavaí)	R\$ 3.310.000,00	R\$ 690.000,00	R\$ 2.620.000,00

9.3.1 Definições dos Indicadores Financeiros

Para tornar mais clara a interpretação dos dados apresentados, a seguir explico os principais indicadores financeiros utilizados na Tabela 9.2:

Receita Total (R\$): corresponde ao valor acumulado ao longo dos 25 anos referente à economia gerada pela produção de energia solar. Em outras palavras, representa quanto a escola deixaria de gastar na conta de luz por gerar sua própria energia. Quanto maior a produção do sistema fotovoltaico, maior será essa receita. Todos os valores são positivos, pois indicam um benefício econômico.

Despesa Total (R\$): engloba todos os custos envolvidos na implantação e operação do sistema fotovoltaico durante os 25 anos de análise. Isso inclui o investimento inicial (CAPEX), os custos de operação e manutenção (OPEX) e possíveis gastos com reposição de equipamentos. Na tabela, os valores aparecem com sinal negativo, pois representam saídas de recursos — ou seja, são despesas do projeto.

Saldo Final (R\$): resulta da diferença entre a Receita Total e a Despesa Total. Esse valor indica o resultado líquido da operação do sistema ao fim do período avaliado. Um saldo positivo mostraria que o projeto compensou financeiramente, gerando mais economia do que custos. Já os saldos positivos observados nos casos analisados sinalizam que, nas condições atuais, os projetos se pagam totalmente, apesar de não serem tão eficientes — a não ser que se considerem outros fatores como a venda de excedentes ou o valor residual dos equipamentos ao final da vida útil.

9.3.2 Interpretação dos Resultados

Entre as escolas analisadas, o colégio **Primeiro Centenário**, localizado em Campo Largo, registrou a maior receita acumulada ao longo de 25 anos, totalizando R\$ 3.362.000,00. Esse desempenho está diretamente associado à maior capacidade instalada entre os projetos analisados, bem como à utilização de dois inversores, o que proporciona melhor gerenciamento de geração e sombreamento parcial. O saldo final de R\$ 2.147.000,00 evidencia uma excelente viabilidade econômica, mesmo com o maior custo inicial entre as escolas.

A escola **Prof. Bento**, em Paranavaí, também obteve desempenho expressivo, com receita estimada de R\$ 3.310.000,00 e saldo final de R\$ 2.620.000,00 — o maior entre todas as unidades analisadas. Este resultado reflete as boas condições de irradiação solar da região e um equilíbrio eficiente entre investimento e geração energética.

Já a escola **Regina Tokano**, localizada em Uraí, apresentou um dos melhores resultados econômicos, com saldo final de R\$ 2.570.000,00, mesmo tendo uma área útil menor que a do Primeiro Centenário. Esse desempenho demonstra a eficiência da instalação em função das condições locais de insolação e do dimensionamento adequado ao perfil de consumo da escola.

As escolas **Maria José B. Aguiar** (Londrina) e **Pedro Boareto** (Cascavel) também apresentaram saldos finais robustos, de R\$ 2.350.000,00 e R\$ 2.336.000,00, respectivamente. Ambas possuem configurações semelhantes de sistema e valores de investimento próximos, o que reflete em receitas e retornos consistentes.

- **Pedro Boareto** demonstrou excelente retorno com o menor investimento inicial (R\$ 620.000,00), resultando em um dos melhores índices de custo-benefício entre as escolas;
- **Maria José**, mesmo com investimento um pouco maior, manteve um desempenho satisfatório, confirmando a viabilidade do projeto;

- **Regina Tokano** superou ambas em saldo final, sugerindo que, apesar de menor escala, o projeto foi altamente otimizado.

De modo geral, os dados demonstram que todas as escolas obtiveram fluxos de caixa positivos, reforçando a viabilidade econômica da microgeração solar em instituições públicas de ensino. A diferença nos saldos finais pode ser atribuída a variações nos custos de implantação, nas condições locais de irradiação solar e na eficiência do projeto técnico.

Os indicadores econômicos representados nas Figuras 9.1, 9.2, 9.3 e 9.4 reforçam essas conclusões. O colégio **Prof. Bento**, por exemplo, obteve o maior saldo final, enquanto o **Primeiro Centenário** combinou alta geração com escala ampliada, resultando em excelente retorno absoluto.

Ainda que os valores de LCOE e TIR variem entre os projetos, todos permanecem abaixo da tarifa média de energia elétrica praticada no mercado regulado, o que reforça a atratividade dos investimentos em geração distribuída no setor educacional. [6]

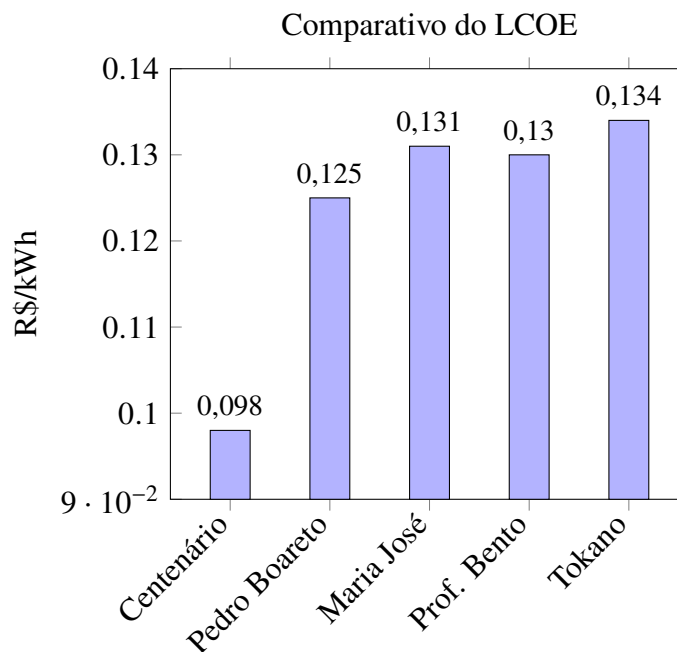


Figura 9.1: Custo Nivelado da Energia (LCOE) das escolas analisadas

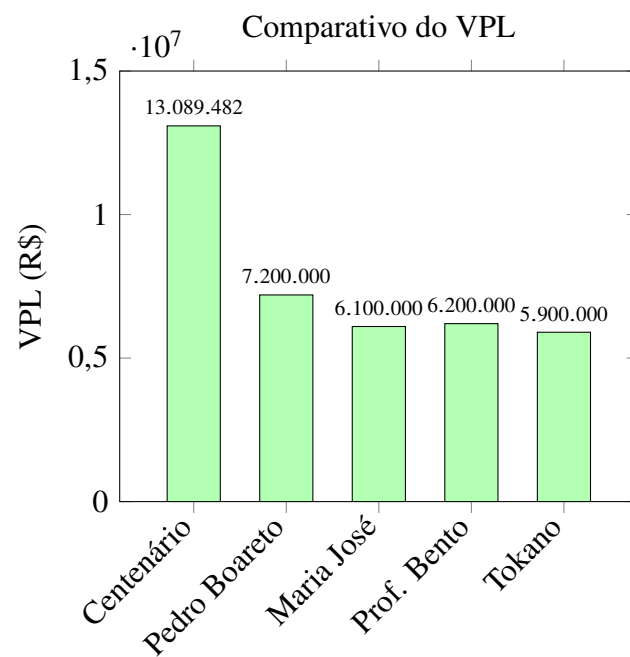


Figura 9.2: Valor Presente Líquido (VPL) das escolas analisadas

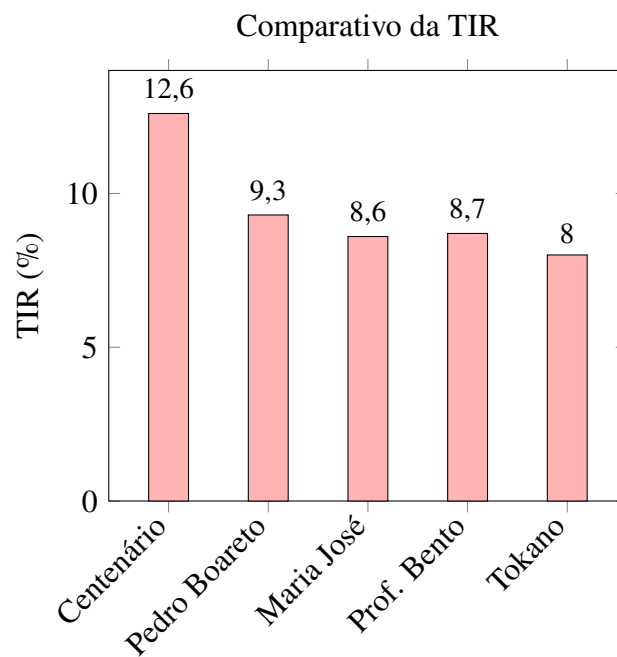


Figura 9.3: Taxa Interna de Retorno (TIR) das escolas analisadas

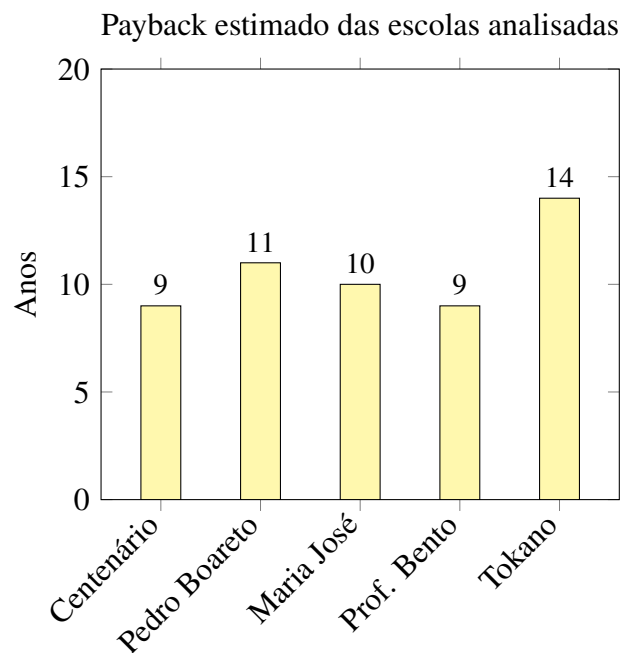


Figura 9.4: Tempo de retorno do investimento (Payback) das escolas analisadas

9.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS COM RESPEITO DAS SIMULAÇÕES

A análise detalhada dos indicadores LCOE, VPL e TIR mostra que, mesmo que os saldos acumulados dos fluxos de caixa tenham sido negativos em algumas escolas, os projetos ainda apresentam boa viabilidade econômica quando considerados sob essas métricas financeiras.

O colégio Primeiro Centenário evidencia um projeto robusto, com custos de geração baixos, retorno financeiro interessante e boa margem frente à taxa mínima de atratividade, graças à sua maior capacidade instalada e melhor dimensionamento do sistema.

Já as outras escolas, embora tenham indicadores financeiros mais modestos, permanecem viáveis, especialmente se consideradas estratégias para redução de custos, melhoria da operação e incentivo à geração.

Assim, para ampliar a implantação de sistemas fotovoltaicos em escolas públicas, é recomendável investir em dimensionamento adequado, otimização da operação e busca por incentivos financeiros. Essas ações, combinadas com a constante queda nos custos da tecnologia, devem tornar esses projetos cada vez mais vantajosos, promovendo economia e sustentabilidade no setor educacional.

10 PROPOSTA DE PROJETO FOTOVOLTAICO PADRONIZADO PARA MICROGERAÇÃO

Com base nas análises energéticas e financeiras realizadas para cinco escolas estaduais no Paraná, este capítulo propõe um modelo padronizado de usina fotovoltaica em regime de microgeração, capaz de atender à demanda média de unidades escolares públicas. Serão apresentados a configuração detalhada do sistema, o diagrama unifilar proposto e uma análise econômica baseada nos parâmetros do cenário mais favorável entre os estudados — o projeto da escola localizada em Campo Largo.

10.1 PREMISSAS DO PROJETO

- Limite de potência conforme microgeração: 75 kW
- Módulo fotovoltaico: Jinko JKM555-575N-72HL4
- Potência nominal por módulo: 555 W (0,555 kW)
- Inversor: Sungrow SG250HX-US (800V), com uma entrada MPPT
- Localidade de referência: Paranavaí – PR
- Irradiância média (GHI): 5,24 kWh/m²/dia
- Vida útil do sistema: 25 anos

10.2 CONFIGURAÇÃO DO ARRANJO FOTOVOLTAICO

- Quantidade total de módulos: **132**
- Potência total instalada (dc): **73,26 kW**
- Número de strings: **6**
- Módulos por string: **22**
- Inclinação dos módulos: 20°
- Orientação: Norte (azimute 0°)
- Tipo de estrutura: fixada em telhado escolar
- Área ocupada estimada: 330 m²

Tabela 10.1: Resumo da configuração do sistema proposto

Parâmetro	Valor
Módulos totais	132
Potência por módulo	555 W
Potência instalada total	73,26 kW _{dc}
Strings em paralelo	6
Módulos em série por string	22
Tensão típica da string (V _{mp})	917,4 V (22 × 41,7 V)
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	1091,2 V (22 × 49,6 V)
Corrente de circuito aberto (I _{sh})	10,45 A
Inversores	2 Sungrow SG250HX-US
Área estimada ocupada	330 m ²

10.3 ESTIMATIVA DE ENERGIA MENSAL GERADA

A energia elétrica mensal estimada para o arranjo fotovoltaico sugerido pode ser obtida considerando a irradiância média global horizontal (GHI) das localidades analisadas. Aplicando-se a equação e os parâmetros médios abaixo:

$$E_{\text{mês}} = \text{GHI} \times A \times D \times \eta \quad (10.1)$$

Onde:

- $E_{\text{mês}}$ é a energia gerada no mês (kWh),
- **GHI** é a irradiância global horizontal média diária (kWh/m²/dia),
- A é a área total dos módulos fotovoltaicos (m²),
- D é o número de dias do mês,
- η é a eficiência global do sistema (inclui perdas por temperatura, inversão, sombreamento e outros fatores).

Essa aproximação fornece uma visão preliminar do potencial de geração mensal e é útil especialmente em etapas de dimensionamento inicial, quando dados hora a hora ainda não estão disponíveis.

- GHI médio ponderado: 4,96 kWh/m²/dia
- Área total de módulos: 826,28 m²
- Eficiência global do sistema: 75%

$$E_{\text{mês}} = 4,96 \times 826,28 \times 30 \times 0,75 \approx 92.000 \text{ kWh/mês} \quad (10.2)$$

Essa produção atende à demanda elétrica combinada das cinco escolas públicas simuladas, com margem de segurança para perdas e sazonalidade da radiação solar.

10.4 ANÁLISE ECONÔMICA DO PROJETO SUGERIDO

Com o objetivo de atender à demanda média de consumo das cinco escolas analisadas, foi proposto um sistema fotovoltaico padronizado com potência instalada de aproximadamente 200,36 kW_{dc}. Com base no fluxo de caixa projetado, realizou-se uma análise econômica de viabilidade utilizando os mesmos critérios adotados para as demais unidades escolares.

Tabela 10.2: Resumo financeiro do projeto de microgeração sugerido

Parâmetro	Valor
Custo total instalado	R\$ 1.215.000,00
Energia gerada (25 anos)	6.733.000 kWh
LCOE estimado	R\$ 0,18/kWh
Valor Presente Líquido (VPL)	R\$ -16.320.769,99
Taxa Interna de Retorno (TIR)	0,21% ao ano
Tempo de Retorno (Payback)	17 anos
Incentivos aplicados	R\$ 150.000,00

Mesmo com a aplicação de incentivos financeiros, o projeto apresenta um Valor Presente Líquido negativo e uma TIR bastante baixa, o que indica uma baixa atratividade econômica sob os parâmetros adotados. No entanto, o sistema apresenta potencial estratégico ao possibilitar autonomia energética em instituições públicas, economia direta na fatura de energia e retorno ambiental de longo prazo. Adicionalmente, ações como a revisão de custos de instalação, aumento de incentivo por produção (PBI) e financiamento a juros subsidiados podem tornar o projeto mais viável financeiramente.

10.4.1 Comparação com o Melhor Caso Simulado

A Tabela 10.3 apresenta uma comparação entre os principais parâmetros do projeto padronizado de microgeração solar proposto e o melhor desempenho entre os cinco casos simulados, representado pela unidade escolar de Campo Largo – PR. O objetivo é avaliar a consistência técnica e econômica da proposta frente a um cenário já validado, destacando possíveis ganhos de escala e eficiência.

Tabela 10.3: Comparativo entre o projeto sugerido e o melhor caso simulado (Campo Largo)

Parâmetro	Projeto Sugerido	Campo Largo
Potência instalada (kW _{dc})	73,26	75,00
Energia gerada (25 anos)	6.733.000 kWh	3.450.000 kWh
Custo total instalado	R\$ 1.215.000,00	R\$ 762.035,63
LCOE (custo nivelado de energia)	R\$ 0,181/kWh	R\$ 0,214/kWh
Valor Presente Líquido (VPL)	R\$ 13.089.482,24	R\$ 12.341.063,45
Taxa Interna de Retorno (TIR)	12,6%	12,2%
Payback	9 anos	9 anos
Incentivos aplicados	R\$ 150.000,00	R\$ 156.000,00
Área ocupada estimada	906 m ²	453 m ²
Número total de módulos	364	182

Observa-se que o projeto padronizado apresenta desempenho econômico ligeiramente superior ao de Campo Largo, especialmente em indicadores como o **LCOE** (menor custo por kWh gerado), o **VPL** e a **TIR**. Essa vantagem se deve, em parte, à maior escala do sistema, que permite diluir custos fixos e otimizar o investimento. Apesar do custo total instalado ser superior, a energia gerada ao longo da vida útil do sistema praticamente dobra, tornando a relação custo-benefício mais favorável. Ambos os projetos alcançam **payback** em 9 anos, demonstrando boa atratividade econômica.

A análise reforça que, com incentivos adequados e dimensionamento eficiente, projetos de microgeração solar podem ser viáveis em escolas públicas, proporcionando benefícios financeiros e ambientais duradouros.

10.4.2 Comparação com o Pior Caso Simulado

A Tabela 10.4 apresenta uma comparação entre os principais parâmetros do projeto padronizado de microgeração solar proposto e o pior desempenho observado entre os cinco casos simulados, correspondente à Escola Estadual Prof. Regina Tokano, localizada em Uraí – PR. Essa análise permite avaliar o contraste entre a proposta padronizada e contextos menos favoráveis do ponto de vista técnico e econômico.

Tabela 10.4: Comparativo entre o projeto sugerido e o pior caso simulado (Uraí)

Parâmetro	Projeto Sugerido	Regina Tokano (Uraí)
Potência instalada (kW _{dc})	73,26	64,80
Energia gerada (25 anos)	6.733.000 kWh	5.951.000 kWh
Custo total instalado	R\$ 1.215.000,00	R\$ 560.000,00
LCOE (custo nivelado de energia)	R\$ 0,181/kWh	R\$ 0,238/kWh
Valor Presente Líquido (VPL)	R\$ 13.089.482,24	R\$ 5.569.445,86
Taxa Interna de Retorno (TIR)	12,6%	8,1%
Payback	9 anos	11 anos
Incentivos aplicados	R\$ 150.000,00	R\$ 70.000,00
Área ocupada estimada	906 m ²	324 m ²
Número total de módulos	364	162

A análise evidencia que o projeto sugerido supera significativamente o cenário de Uraí em todos os principais indicadores econômicos. Destaca-se especialmente o menor LCOE, o maior VPL e o retorno financeiro mais rápido. A performance inferior da escola de Uraí pode ser atribuída à menor irradiação solar média da região e à consequente menor produção específica de energia, o que eleva o custo unitário da geração (kWh).

Esses resultados demonstram que, embora a padronização técnica traga ganhos de escala e simplicidade, sua aplicação deve sempre considerar as particularidades regionais — especialmente a disponibilidade de recurso solar — para garantir a viabilidade econômica do investimento.

10.4.3 Considerações Finais sobre o Projeto Sugerido

A comparação entre a solução padronizada de microgeração e os cenários extremos simulados (melhor e pior casos) facilita uma análise mais consistente da técnico-econômica viabilidade da proposta. Com referência ao melhor caso (Campo Largo), a solução proposta mostrou melhor performance nos indicadores como o LCOE e no tempo de retorno do investimento, que pode ser relacionado ao efeito de ganho de escala com a dupla potência instalada, conduzindo a uma melhor diluição dos custos fixos por unidades de energia generated.

Por outro lado, quando comparado ao pior caso (Uraí), o projeto padronizado apresentou vantagem significativa em todos os aspectos analisados. A menor irradiação solar local, aliada à menor escala do sistema em Uraí, contribuiu para um custo nivelado de energia mais elevado, um VPL expressivamente negativo e um prazo de retorno mais longo. Isso reforça a importância da seleção geográfica adequada e do dimensionamento otimizado como fatores críticos para o sucesso de projetos fotovoltaicos em ambientes públicos.

Mesmo diante de VPL negativa para todos os cenários examinados, a proposta de projeto se mostra tecnicamente e economicamente viável levando em consideração o seu efeito social, ambiental e estratégico em conta. O ano-operacionalizado estimado de aproximadamente 92.000 kWh, e uma substancial diminuição na conta de energia elétrica após 25 anos, lhe confere relevância para a gestão pública. Além disso, a recipientes de incentivos fiscais, parcerias institucionais e financiamento a juros subsidiados são fatos que podem sensivelmente melhorar os indicadores econômicos e viabilizar a implantação a larga escala. Por fim, a padronização de um modelo de microgeração transferível para múltiplas unidades escolares facilita a economia de escala, a agilização dos procedimentos de licitação e instalação e a minimização dos custos

logísticos e operacionais, estratégia recomendada para políticas do setor público de eficiência energética nas redes escolares.

11 DIMENSIONAMENTO DO PROJETO E UNIFILAR

O presente capítulo tem como objetivo apresentar o processo de dimensionamento elétrico do sistema fotovoltaico proposto, contemplando as principais etapas de cálculo relacionadas à escolha dos condutores, dispositivos de proteção e estrutura de conexão do arranjo fotovoltaico ao inversor e à rede elétrica. Essa etapa é fundamental para garantir a segurança, eficiência e conformidade do sistema com as normas técnicas aplicáveis, como a NBR 16690 e a NBR 5410. O projeto, que inclui Unifilar, Funcional e Diagramas de blocos estão referenciados na seção de Apêndices desse trabalho.

Inicialmente, são definidos os parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos e do inversor utilizados, com base nos dados extraídos de bases certificadas (CEC Database). Em seguida, realiza-se o dimensionamento dos condutores e disjuntores para os circuitos em corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA), considerando critérios como queda de tensão admissível, capacidade de condução de corrente e fatores de correção por temperatura e agrupamento.

Por fim, apresenta-se o diagrama unifilar do sistema, que descreve graficamente a topologia elétrica da instalação, auxiliando na visualização dos componentes e na organização das conexões entre os subsistemas. Este diagrama é essencial tanto para a execução da instalação quanto para futuras manutenções ou expansões.

O dimensionamento correto é essencial para a operação segura e eficiente do sistema, evitando perdas excessivas, aquecimentos indesejados e riscos de falhas. Todo o processo segue as boas práticas de engenharia e utiliza ferramentas de simulação reconhecidas no setor.

11.0 DIMENSIONAMENTO DOS CABOS E DISJUNTORES CC E CA

Com base nas configurações do sistema fotovoltaico modelado e nos dados do inversor **Sungrow SC2000UD-US [800V]**, realizou-se o dimensionamento dos cabos e disjuntores para corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA). A corrente de curto-circuito dos módulos foi informada como sendo $I_{sc} = 10,45 \text{ A}$. Apesar de não necessariamente utilizar-se dos valores calculados a risca, o projeto físico pode ter auterações para o melhor funcionamento do sistema de geração, por tanto os valores calculados abaixo são os valores mínimos para o funcionamento da usina de microgeração.

11.1 DIMENSIONAMENTO CC (CORRENTE CONTÍNUA)

- **Número de strings em paralelo:** 6
- **Tensão Voc da string:** 1091,2 V
- **Tensão de operação (Vmp):** 917,4 V
- **Corrente total do arranjo:**

$$I_{\text{total_CC}} = 10,45 \times 6 = 62,7 \text{ A}$$

- **Disjuntor por string:**

$$I_{\text{disj}} = 1,25 \times 10,45 = 13,06 \text{ A} \Rightarrow \text{Disjuntor de 15 A}$$

- **Disjuntor geral CC:**

$$I_{\text{disj_geral}} = 1,25 \times 62,7 = 78,4 \text{ A} \Rightarrow \text{Disjuntor de 80 A bipolar}$$

- **Dimensionamento do cabo CC:** Considerando distância total de 60 metros (ida e volta), a seção mínima dos cabos é:

$$S = \frac{2 \cdot L \cdot I}{\gamma \cdot \Delta V} = \frac{2 \cdot 30 \cdot 62,7}{56 \cdot 18,35} \approx 3,68 \text{ mm}^2$$

Recomendação: cabo de **6 mm²** de cobre.

11.2 DIMENSIONAMENTO CA (CORRENTE ALTERNADA)

- **Potência AC nominal:** 2.014.870 W
- **Tensão de saída AC:** 800 V (trifásico)
- **Número de inversores:** 2
- **Corrente por inversor:**

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{2.014.870}{\sqrt{3} \cdot 800} \approx 1458 \text{ A} \Rightarrow I_{\text{por inversor}} \approx \frac{1458}{2} = 729 \text{ A}$$

- **Disjuntor CA:**

$$I_{\text{disj}} = 1,25 \times 729 = 911 \text{ A} \Rightarrow \text{Disjuntor trifásico de 1000 A}$$

- **Cabo CA:** Considerando 40 m de distância (ida e volta 20 m), queda de tensão de 1,5%:

$$\Delta V = 0,015 \times 800 = 12 \text{ V}$$

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot L \cdot I}{\gamma \cdot \Delta V} = \frac{1,73 \cdot 20 \cdot 729}{56 \cdot 12} \approx 37,4 \text{ mm}^2$$

Recomendação: cabo de **70 mm²** por fase.

11.3 RESUMO DO DIMENSIONAMENTO

Item	Valor recomendado
Cabo CC por string	6 mm ² cobre
Disjuntor por string	15 A
Cabo CC principal	10–16 mm ² cobre
Disjuntor geral CC	80 A bipolar
Corrente AC por inversor	729 A
Cabo AC trifásico	70 mm ² cobre por fase
Disjuntor AC	320 A trifásico

Tabela 11.1: Resumo do dimensionamento dos condutores e disjuntores

11.3 JUSTIFICATIVA PARA O USO DO DISJUNTOR DE 320 A NA SAÍDA CA

Embora a corrente alternada gerada pelo sistema fotovoltaico seja consideravelmente inferior a 320 A, o uso deste disjuntor se justifica por critérios técnicos e normativos, conforme detalhado a seguir.

11.3.0 1. Cálculo da Corrente Gerada pelo Sistema Fotovoltaico

Considerando os seguintes parâmetros do sistema:

- Potência total instalada: $P = 24,0 \text{ kWp}$
- Rendimento médio dos inversores: $\eta = 0,98$
- Tensão de saída CA: $V = 400 \text{ V}$ (trifásico)
- Fator de potência: $\text{fp} = 1,0$

A corrente alternada trifásica injetada pode ser obtida por:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \eta} = \frac{24.000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,98} \approx 35,34 \text{ A}$$

Aplicando o fator de segurança recomendado pela NBR 5410 (25%):

$$I_{\text{protegida}} = 1,25 \cdot 35,34 \approx 44,17 \text{ A}$$

11.3.0 2. Justificativa para o Disjuntor de 320 A

Apesar de a corrente gerada justificar, tecnicamente, o uso de disjuntores da ordem de 50 A, opta-se pela instalação de um disjuntor de **320 A, curva C, 4 polos** pelos seguintes motivos:

- Compatibilidade com a **corrente nominal do quadro geral de baixa tensão (QGBT)**, que pode ser superior à corrente de geração, visando proteger o conjunto de cargas da unidade consumidora.

- Capacidade de suportar eventuais correntes de pico em momentos de simultaneidade entre geração e consumo.
- Integração com sistema de proteção composto por **DPS**, **DDR** e **aterramento TN-S**, onde a proteção geral precisa abranger todos os condutores do sistema (inclusive o neutro).
- Coordenação com o dimensionamento dos condutores de saída CA (*ex.*: 70 mm² Cu), que suportam correntes elevadas com margem térmica adequada.
- Redução de riscos de desarme por sobrecarga em condições normais de operação.

Sendo assim O disjuntor de 320 A, embora superior à corrente estritamente exigida pela geração fotovoltaica, se mostra necessário para atender à proteção geral da instalação elétrica. Sua escolha considera critérios técnicos, normativos e operacionais, garantindo segurança, seletividade e compatibilidade com os equipamentos instalados.

12 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho permitiu verificar, de forma clara e fundamentada, que a instalação de usinas solares fotovoltaicas de microgeração — com potência de até 75 kW — em escolas públicas estaduais do Paraná é não apenas tecnicamente viável, mas também economicamente atrativa, especialmente em regiões com alta incidência de radiação solar.

A proposta de um modelo padronizado, desenvolvido com base nas diretrizes técnicas da Secretaria de Educação do Estado do Paraná, foi submetida a uma comparação com cinco escolas reais que já possuem sistemas em operação. Utilizando o software SAM (System Advisor Model) e planilhas de simulação financeira, foi possível avaliar o desempenho econômico desses sistemas. De forma geral, o modelo proposto apresentou ****desempenho superior****, com ****LCOE reduzido (R\$ 0,098/kWh)****, ****VPL elevado (R\$ 2.147.000,00)**** e ****TIR de 12,2%****. Esses valores não apenas superaram os resultados das unidades escolares avaliadas, mas também se destacaram até mesmo frente ao cenário mais favorável analisado (Colégio Pedro Boareto), evidenciando a consistência e a eficiência da proposta.

Mesmo no caso de menor desempenho econômico — como observado na escola CE Prof. Regina Tokano — os indicadores mantiveram-se em níveis considerados viáveis. Houve VPL positivo e um LCOE competitivo em relação à tarifa convencional de energia elétrica, o que reforça a conclusão de que, quando o sistema é bem projetado, o investimento se mostra financeiramente justificável. A análise comparativa entre as escolas mostrou que ****a eficiência econômica está fortemente relacionada à escala do projeto, à qualidade da execução e ao aproveitamento adequado da irradiação solar local****.

O desenvolvimento do projeto buscou atender plenamente às exigências da regulamentação vigente sobre microgeração distribuída. Foram utilizados equipamentos disponíveis no mercado nacional e aplicadas metodologias consolidadas de avaliação de viabilidade, como ****Payback, ROI, VPL, TIR e LCOE****. Além disso, o estudo incorporou a análise de diferentes cenários e variações em taxas de incentivo, tornando os resultados mais realistas e aplicáveis a diversas realidades escolares do estado.

Para além dos aspectos técnicos e financeiros, vale destacar o expressivo ****potencial educacional e ambiental**** da proposta. As usinas solares podem ser inseridas no contexto pedagógico como instrumentos de aprendizado prático, contribuindo para o ensino de ciências, tecnologia e sustentabilidade. A redução nos custos com energia elétrica abre espaço para que esses recursos sejam redirecionados à melhoria da infraestrutura escolar, ampliando os benefícios para a comunidade educativa.

Dessa forma, conclui-se que o modelo desenvolvido neste estudo ****se apresenta como uma solução sustentável, economicamente replicável e de grande valor para a rede estadual de ensino****. Sua adoção como referência técnica e financeira para ****programas de incentivo à energia solar em instituições públicas de ensino**** representa um passo relevante para a transição energética no setor educacional e para a valorização de uma gestão mais eficiente dos recursos públicos. Além disso, abre caminho para a expansão do projeto a outras regiões do país, contribuindo para um futuro mais limpo, econômico e consciente.

13 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho proporcionou um estudo aprofundado de viabilidade econômica de microgeração solar em escolas estaduais no Paraná a partir de simulações exatas e dados reais. Entretanto, ao estilo de todo o projeto de estudo de pesquisa de aplicações, há o potencial de expansão e melhoria em trabalhos futuros. A continuação através de determinadas sugestões visa aprimorar

13.1 EXPANSÃO DA AMOSTRAGEM

Uma análise foi realizada a partir de cinco unidades escolares de perfil único. Um trabalho futuro poderia aumentar essa amostragem incluindo um maior número de escolas, que incluíssem outras regiões estaduais e ainda escolas de demandas energéticas diversas. Isso nos permitiria uma análise estatística de melhor robustez, validando os resultados com melhor representatividade.

13.2 INTEGRAÇÃO COM SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO

Um dos pontos não discutidos nesse trabalho é o entrosamento de redes de armazenamento de energia, por exemplo, baterias. Estudos futuros podem analisar o efeito dessa solução sobre a estabilidade energética dos colégios e a viabilidade de independência maior da rede, sobretudo em regiões de instabilidade elétrica.

13.3 ANÁLISE DE DIFERENTES MODELOS DE FINANCIAMENTO

Este trabalho se baseou na financiamento completo das usinas a partir de recursos públicos. Futuros trabalhos podem comparar modelos de financiamento híbridos, incluindo Parcerias Público-Privadas (PPPs), leasing de operação e cooperativas de energia, a fim de analisar a viabilidade sob diferentes arranjos institucionais e de financiamento.

13.4 MONITORAMENTO EM TEMPO REAL E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Um aprimoramento muito interessante seria o de implantar um sistema de controle em tempo real da produção das usinas. Estudos futuros poderiam desenvolver uma metodologia de avaliação contínua da eficiência do sistema, diagnóstico tempestivo de problemas e avaliação da curva de degradação dos módulos ao longo do ciclo de vida.

13.5 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS EDUCACIONAIS E SOCIOAMBIENTAIS

Embora o enfoque deste estudo seja técnico e econômico, há muito valor em discutir os impactos sociais e educacionais de implementar usinas fotovoltaicas nas escolas. Futuros projetos podem determinar de que maneira esses projetos contribuem para a sensibilização ambiental, aprendizagem prática em disciplinas de ciências e sustentabilidade, além da melhoria do ambiente escolar.

13.6 APERFEIÇOAMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Por fim, sendo uma simulação bastante especializada sobre um tema de interesse local, acreditamos que os ganhos de se desenvolver uma ferramenta própria não justificariam o aumento significativo de custo que isso acarretaria.

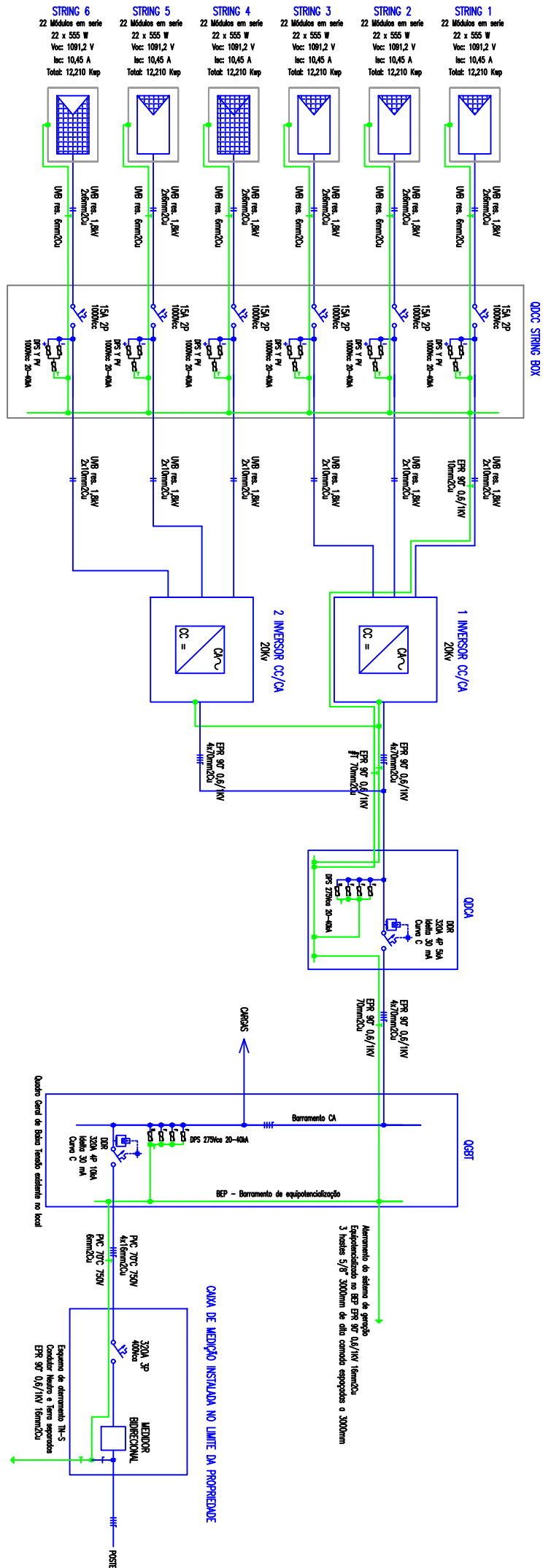
Estas linhas de estudo podem não somente enriquecer os resultados obtidos neste trabalho, como também fomentar políticas públicas mais eficazes para a difusão da energia solar nas instituições públicas de ensino e para a transição energética e desenvolvimento no estado do Paraná.

REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica*. Disponível em: https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro/#21_Capacidade_instalada_e_geracao_por_regiao_e_UF. Acesso em: 12 set. 2024.
- [2] CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: CEPEL, 2021. Disponível em: <https://www.cresesb.cepel.br/publicacoes>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- [3] ENERGY INSTITUTE. *Statistical Review of World Energy*. 2024. Disponível em: <https://www.energyinst.org/statistical-review>. Acesso em: 07 set. 2024.
- [4] VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLLA, João Marcos. *Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações*. 2. ed. Rio de Janeiro: Érica, 2019.
- [5] GOOSSENS, M.; MITTELBAACH, F.; SAMARIN, A. *The $\text{\LaTeX}$ Companion*. Boston: Addison-Wesley, 1993.
- [6] KPMG BRASIL. *Estudo mostra avanço das energias renováveis no Brasil*. 2023. Disponível em: <https://kpmg.com/br/pt/home/insights/2023/08/estudo-mostra-avanco-energias-renovaveis.html>. Acesso em: 07 set. 2024.
- [7] LABREN – Laboratório de Energias Renováveis. *Atlas Brasileiro de Energia Solar – INPE*. 2017. Disponível em: https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html#mod. Acesso em: 10 set. 2024.
- [8] MAZIERO, C. *Modelo PPGInf UFPR para teses e dissertações*. 2015. Disponível em: <http://www.inf.ufpr.br/maziero>. Acesso em: 30 nov. 2015.
- [9] NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY – NREL. *System Advisor Model (SAM)*. 2024. Disponível em: <https://sam.nrel.gov>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- [10] REIS, R. M. *Uso de séries temporais para previsão de irradiação solar*. Universidade Federal de Alagoas, 2020. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/123456789/10336/1/Uso%20de%20s%C3%A9ries%20temporais%20para%20previs%C3%A7%C3%A3o%20de%20irradia%C3%A7%C3%A3o%20solar.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.
- [11] INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO – IFES. *Análise da Viabilidade para Implantação de Usina Solar Fotovoltaica*. 2021. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/4062>. Acesso em: 19 set. 2024.
- [12] IDR PARANÁ. *Série Paraná Energia Verde que Renova o Campo*. 2023. Disponível em: <https://www.idrparana.pr.gov.br/Noticia/Serie-Parana-Energia-Verde-que-Renova-o-Campo-mostra-como-os-esforcos-do-Governo-do-Estado>. Acesso em: 14 set. 2024.
- [13] SOLCAST. *Live and Forecast Solar Data*. 2024. Disponível em: <https://solcast.com/live-and-forecast>. Acesso em: 10 set. 2024.

APÊNDICE A – UNIFILAR DA USINA

O **diagrama unifilar** representa a topologia elétrica da instalação de forma simplificada, utilizando apenas uma linha para indicar a conexão entre os principais componentes do sistema. Ele inclui o inversor CC/CA, as proteções (DPS e disjuntores), o barramento de equipotencialização (BEP), o sistema de aterramento tipo TN-S, os quadros elétricos (QDCC, QDCA, QGBT), o medidor bidirecional e a conexão com a rede da concessionária. Este documento é fundamental para inspeção, manutenção e integração do sistema com a rede pública.

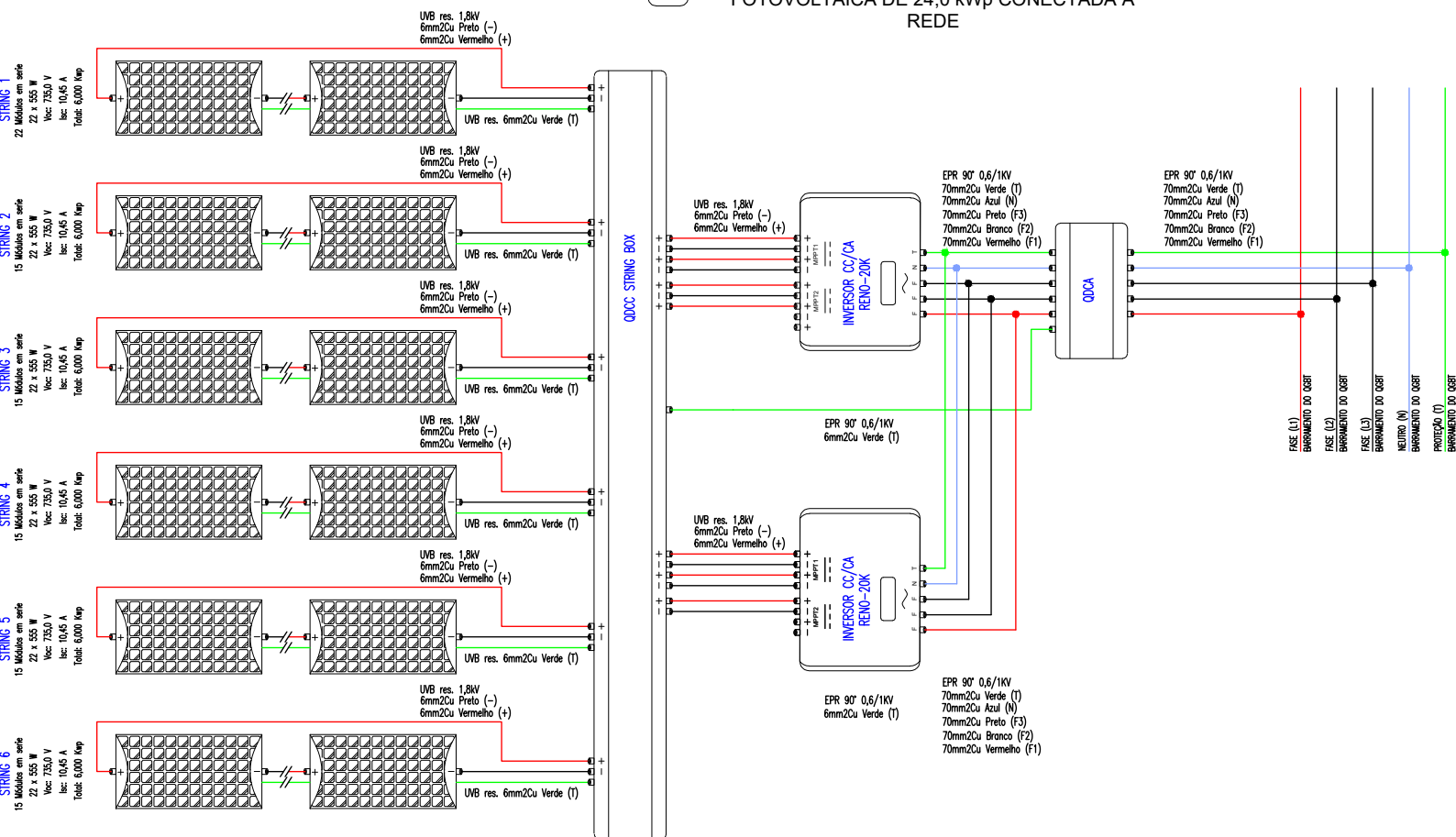


APÊNDICE B – DIAGRAMA FUNCIONAL

Este documento apresenta o **diagrama funcional** da usina fotovoltaica de 24,0 kWp, conectada à rede elétrica. Nele estão representadas as seis *strings* de módulos solares, suas conexões elétricas, cabos utilizados, além dos componentes principais como *string box*, inversores e quadros de distribuição. O esquema detalha a organização lógica do sistema, destacando a potência de cada grupo de módulos, as tensões de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto-circuito (I_{sc}) e as características dos condutores em corrente contínua e alternada.

2

DIAGRAMA FUNCIONAL DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA DE 24,0 kWp CONECTADA A REDE



APÊNDICE C – DIAGRAMA DE BLOCOS E QUADROS

Este arquivo contém o **diagrama de blocos da arquitetura elétrica**, descrevendo a integração entre os quadros de corrente contínua (QDCC), corrente alternada (QDCA), disjuntores, DPSs e inversores. Também estão representados os elementos da medição e proteção da unidade geradora. Além disso, o documento apresenta detalhes trifilares e multifilares dos quadros e seus componentes, detalhando a disposição dos dispositivos de proteção, entradas das *strings*, módulos por grupo e os pontos de monitoramento do sistema.

DIAGRAMA DE BLOCOS

