

**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Goiás

PATRICK COSTA VASCONCELOS

**ESTUDO DOS IMPACTOS DA
ENERGIA FOTOVOLTAICA EM
REDES ELÉTRICAS CONVENCIONAIS**

VALPARAÍSO DE GOIÁS - GO

2025



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS VALPARAISO

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Documento 525092

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia - Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho apresentado em evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome completo do(a) autor(a): Patrick Costa Vasconcelos

Matrícula: 20201150050283

Título do trabalho: YYYYYYYYYYYYYYYYYYYY

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

() O documento está sujeito a registro de patente.

() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.

() Outra justificativa: _____.

Declaração de distribuição não-exclusiva

O(A) referido(a) autor(a) declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Valparaíso de Goiás, 3 de abril de 2024.

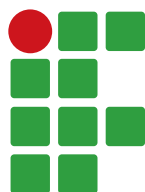
(assinado eletronicamente)

PATRICK COSTA VASCONCELOS

Autor(a) e/ou Detentor(a) dos Direitos Autorais

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

BR 040, KM 6, Avenida Saia Velha, S/Nº, Área 8, None, Parque Esplanada V, VALPARAÍSO DE GOIÁS / GO, CEP 72876-601
(61) 3615-9210 (ramal: 9210)



**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Goiás

PATRICK COSTA VASCONCELOS

**ESTUDO DOS IMPACTOS DA
ENERGIA FOTOVOLTAICA EM
REDES ELÉTRICAS CONVENCIONAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Valparaíso, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: PROFA. DRA. JESSICA SANTORO GONÇALVES PENA, IFG

VALPARAÍSO DE GOIÁS - GO

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

V331e Vasconcelos, Patrick Costa

Estudo dos impactos da energia fotovoltaica em redes elétricas convencionais / Patrick Costa Vasconcelos. 2025.

Dados eletrônicos (1 arquivo).

67 f. : il. color.

Orientadora: Profa. Dra. Jéssica Santoro Gonçalves Pena.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, câmpus Valparaíso, 2025.

Modo de acesso: World Wide Web.

Arquivo de texto em formato PDF.

Disponível em: <https://repositorio.ifg.edu.br>.

1. Sistemas de energia elétrica - Energia fotovoltaica. 2. Sistemas de energia elétrica - Geração distribuída. 3. Energia elétrica - Políticas públicas 4. Eficiência energética. I. Título. II. Pena, Jéssica Santoro Gonçalves, orient.

CDD 621.3191

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulada **ESTUDO DOS IMPACTOS DA ENERGIA FOTOVOLTAICA EM REDES ELÉTRICAS CONVENCIONAIS**, sob orientação de Jessica Santoro Goncalves Pena , apresentada pelo aluno **Patrick Costa Vasconcelos (20201150050283)** do Curso **Bacharelado em Engenharia Elétrica (Câmpus Valparaíso)**. Os trabalhos foram iniciados às **19:15** do dia **18/08/2025** pela Professora presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Jessica Santoro Goncalves Pena** (Presidente)
- **Alisson Lima Silva** (Examinador Interno)
- **Pedro Henrique Franco Moraes** (Examinador Interno)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Trabalho de Conclusão de Curso, passou à arguição do candidato. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo aluno, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

☒ Aprovado

☐ Reprovado

Nota : 8,5

Observação / Apreciações:

Fazer as correções indicadas pela banca.

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Jessica Santoro Goncalves Pena** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Jessica Santoro Goncalves Pena** (669.604.441-87), em **18/08/2025 20:31:22** com chave **7392f7da7c8b11f0a483005056a537a4**.
- **Pedro Henrique Franco Moraes** (006.467.361-83), em **18/08/2025 20:31:44** com chave **807c17607c8b11f08ec4005056a537a4**.
- **Alisson Lima Silva** (059.617.316-42), em **18/08/2025 20:33:08** com chave **b2a20eac7c8b11f08d42005056a537a4**.

Este documento foi emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifg.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Ata de Projeto Final

Data da Emissão: 18/08/2025

Código de Autenticação: 3430c6



Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de expressar minha sincera gratidão aos meus pais, Terezinha Rodrigues Vasconcelos e Antonio do Nascimento Costa, por me proporcionarem as oportunidades necessárias para que eu pudesse cursar Engenharia Elétrica.

Agradeço também à minha orientadora, Profa. Dra. Jéssica Santoro Gonçalves Pena, pelo apoio constante durante todo o percurso deste trabalho. Suas orientações, conselhos e críticas construtivas foram fundamentais para o desenvolvimento deste projeto.

Agradeço aos meus colegas do curso de Engenharia Elétrica, cujo incentivo e apoio foram essenciais para que eu continuasse a trilhar meu caminho até a conclusão da graduação.

Minha gratidão se estende à instituição IFG - Campus Valparaíso de Goiás, que ofereceu professores capacitados e contribuiu significativamente para minha formação acadêmica.

Finalmente, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

Este trabalho analisa o impacto da integração da energia fotovoltaica nas redes elétricas convencionais, com foco no estado de Goiás. A geração distribuída fotovoltaica tem crescido de forma expressiva, segundo dados de órgãos reguladores, trazendo benefícios como baixo impacto ambiental e melhoria nos níveis de tensão, especialmente em regiões de alta irradiação solar. Entretanto, a predominância de sistemas *on-grid*, que injetam excedentes na rede, pode comprometer a qualidade da energia. O estudo, baseia-se em dados de entidades reguladoras e avalia os impactos técnicos, econômicos e ambientais da expansão da GDFV. São discutidos desafios como a intermitência das fontes renováveis, a dependência das condições climáticas e a necessidade de modernização da infraestrutura elétrica. Tecnologias emergentes, como *smart grids* e sistemas de armazenamento, são exploradas como soluções para estabilidade e eficiência. Também são analisadas políticas públicas, incentivos e casos de sucesso no Brasil e no exterior, com destaque para Goiás. Conclui-se pela necessidade de investimentos em infraestrutura e tecnologias que possibilitem a transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável, garantindo qualidade e confiabilidade no fornecimento de energia elétrica.

Palavras-Chave: Energias Renováveis; Geração Distribuída Fotovoltaica; Qualidade de Energia; Rede Elétrica Pública.

Abstract

This work studies the integration of photovoltaic (PV) energy into conventional power grids, focusing on Goiás. Distributed photovoltaic generation (DPVG) has grown significantly, according to regulatory data, offering benefits such as low environmental impact and improved voltage levels, especially in high-irradiance regions like Goiás. However, most DPGV systems are on-grid, injecting surplus energy into the grid, which may affect power quality. This study analyzes the technical, economic, and environmental impacts of such integration, based on a theoretical approach using data from Brazilian electricity regulatory agencies. It examines how renewable sources influence power quality, particularly with the increasing installation of PV panels, and addresses challenges from intermittency and climatic dependence. The need for modernization of transmission and distribution infrastructure is discussed, along with emerging solutions like *smart grids* and energy storage. Public policies and incentives for renewable adoption are evaluated, with national and international case studies, emphasizing Goiás. The conclusions highlight the need for infrastructure investments and advanced technologies to enable a cleaner, sustainable energy matrix while maintaining quality and reliability of supply.

Keywords: Renewable Energy; Photovoltaic Distributed Generation; Energy Quality; Public Electrical Grid.

Lista de Figuras

2.1	Integração de fontes renováveis (solar, eólica) ao sistema elétrico por meio de <i>smart grids</i>	21
3.1	Perfil de tensão ao longo do dia com e sem geração distribuída de fontes variáveis (GDFV).	30
3.2	Sistema fotovoltaico conectado à rede com conversor boost e inversor	31
3.3	Potência do painel fotovoltaico em função da Irradiação (Solar)	32
3.4	Tensão do Barramento	33
3.5	Corrente Trifásica Corrente de Referência.....	33
3.6	Potência ativa do Inversor Potência reativa do inversor	34
3.7	Distorção Harmônica Total	35

Lista de Tabelas

1.1	Custo estimado para implantação das fontes renováveis de energia.....	15
1.2	China: consumo de energia primária por fonte (2020)	16
3.1	Comparativo entre Tecnologias Fotovoltaicas.....	38
4.1	Comparativo de Potência Instalada em Geração Fotovoltaica por Estado (2025).....	52

Lista de Abreviaturas e Símbolos

Lista de Abreviaturas

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CAES	<i>Compressed Air Energy Storage</i>
CC	Corrente Contínua
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CO2	Gás Carbônico
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GDFV	Geração Distribuída de Fontes Variáveis
GEE	Gases de Efeito Estufa
GW	Gigawatts
GWp	GigaWatt-pico
HJT	<i>Heterojunction Technology</i>
HTJ	<i>Hybrid Tunneling-Junction</i>
Hz	Hertz
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
km	Quilômetro
LCL	Indutor-Capacitor-Indutor
MME	Ministério de Minas e Energia
MNRE	Ministério de Energia Nova e Renovável
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MW	Megawatts
MWh	MegaWatt-hora
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
POE	Polioléfina Elastomérica
REBE	Programa Renda Básica Energética
SEE	Sistema Elétrico de Energia
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SFV	Sistema Fotovoltaico
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
TJGO	Tribunal de Justiça de Goiás
TOPCon	<i>Tunnel Oxide Passivated Contact</i>
UFV	Usina Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	VISÃO GERAL	14
1.2	MOTIVAÇÃO	16
1.3	OBJETIVOS	16
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
1.5	METODOLOGIA	18
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	19
2.1	REDES ELÉTRICAS CONVENCIONAIS	19
2.2	ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	22
2.3	INTEGRAÇÃO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NAS REDES ELÉTRICAS ...	25
3	PRINCIPAIS ASPECTOS DA INTEGRAÇÃO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS	27
3.1	ASPECTOS TÉCNICOS	27
3.2	ANÁLISE TÉCNICA DETALHADA – SISTEMA FOTOVOLTAICO CONEC- TADO À REDE (SIMULAÇÃO AVANÇADA)	30
3.2.1	VISÃO GERAL	30
3.2.2	COMPONENTES DO SISTEMA E SUAS FUNÇÕES	30
3.2.3	OBSERVAÇÕES DE DESEMPENHO.....	34
3.3	IMPACTOS ECONÔMICOS.....	35
3.3.1	EVOLUÇÃO E TECNOLOGIAS DE MERCADO.....	36
3.3.2	CÉLULAS PERC (<i>Passivated Emitter and Rear Cell</i>)	36
3.3.3	CÉLULAS HJT (<i>Heterojunction Technology</i>)	36
3.3.4	CÉLULAS TOPCON (<i>Tunnel Oxide Passivated Contact</i>)	37
3.4	ASPECTOS REGULATÓRIOS E ECONÔMICOS	38

3.4.1	O MODELO DE <i>Net Metering</i> E SUA REGULAMENTAÇÃO	38
3.4.2	BENEFÍCIOS PARA O MERCADO E A MÃO DE OBRA	39
3.5	ASPECTOS SOCIOAMBIENTAIS.....	40
4	ANÁLISE DO CENÁRIO ATUAL DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	43
4.1	EXEMPLOS DE PAÍSES QUE INTEGRARAM ENERGIAS RENOVÁVEIS	43
4.2	ANÁLISE DE PROJETOS LOCAIS.....	46
4.3	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO ESTADO DE GOIÁS	50
5	TECNOLOGIAS E SOLUÇÕES PARA INTEGRAÇÃO	53
5.1	<i>Smart Grids</i> (REDES INTELIGENTES).....	53
5.2	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	55
6	CONCLUSÕES.....	58
6.1	CONCLUSÕES GERAIS	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

Capítulo 1

Introdução

1.1 Visão Geral

A energia elétrica é um elemento indispensável na vida moderna, estando presente em diversos aspectos do cotidiano, desde o uso de aparelhos eletrônicos, como celulares, até a produção em larga escala, exemplificada por usinas hidrelétricas. O uso da energia elétrica tornou-se fundamental para a sobrevivência humana, impulsionando avanços sociais e tecnológicos. No entanto, essa dependência automática criou uma sociedade altamente dependente da eletricidade. Com o consumo de eletricidade sendo essencial para o bem-estar e a sobrevivência da população, houve um aumento gradual no consumo, tanto em residências quanto em empresas. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [1] o consumo de energia elétrica no Brasil tem crescido consistentemente, refletindo a expansão do acesso à eletricidade e o aumento das demandas dos setores residencial e industrial.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [3], a matriz energética brasileira ultrapassou a marca de 7 gigawatts (GW) em novas usinas instaladas em 2024, refletindo um crescimento significativo na capacidade de geração de energia no país. Esse avanço é parte de uma expansão histórica, como destacado pela ANEEL, que aponta um aumento de 10,9 GW na matriz elétrica em 2024, a maior expansão já registrada na série histórica. Essa expansão inclui a instalação de 203 novas usinas, abrangendo fontes diversificadas, como usinas fotovoltaicas, termoeletricas, pequenas hidrelétricas e usinas hidrelétricas [4].

Tabela 1.1: Custo estimado para implantação das fontes renováveis de energia

Fonte	Custo de instalação (R\$/kW)	Tendência (10–15 anos)
Biomassa (cana de açúcar)	3.000,00	↓
Eólica	3.350,00	↓
Geotérmica	3.000,00	→
Hidráulica (UHEs)	3.345,00	↑
Hidráulica (PCHs)	5.000,00	→
Mar (Ondas)	9.800,00	↓
Mar (Correntes marítimas)	7.770,00	↓
Solar (UFV)	5.100,00	↓

Fonte: Adaptado de [2].

No contexto da crescente demanda energética e da necessidade de diversificação da matriz elétrica, a análise comparativa dos custos e das fontes de energia torna-se fundamental. A 1.1 apresenta uma estimativa dos custos de implantação das principais fontes renováveis, evidenciando a tendência de redução de preços em tecnologias como a solar e a eólica, que se consolidam como alternativas cada vez mais competitivas frente às fontes tradicionais.

O aumento no consumo de energia elétrica já é evidenciado pelos dados comparativos entre os primeiros semestres de 2022 e 2024. Segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) [5], em 2022, o crescimento foi de 1,3 megawatts (MW), enquanto no primeiro semestre de 2024, o aumento foi de 6,8 megawatts médios. Esse salto reflete a crescente demanda por energia, impulsionada pelo desenvolvimento econômico e tecnológico do país.

Em uma perspectiva internacional, a 1.2 ilustra o consumo de energia primária na China em 2020, destacando a forte predominância do carvão, seguido do petróleo e do gás natural. Apesar de um avanço no uso de fontes renováveis, ainda se observa uma elevada dependência de combustíveis fósseis, o que reforça o contraste entre países em processo de transição energética e aqueles que já priorizam investimentos em tecnologias limpas.

Esses dados reforçam a importância de investimentos contínuos em novas fontes de energia, tanto para atender à demanda crescente quanto para garantir a sustentabilidade do sistema elétrico brasileiro. A diversificação da matriz energética, como a solar e a eólica, é um passo crucial para um futuro mais sustentável e resiliente.

Tabela 1.2: China: consumo de energia primária por fonte (2020)

Fonte	Participação (%)
Carvão	56,6
Petróleo	19,6
Gás Natural	8,2
Hidrelétricas	8,1
Renováveis	5,4
Nuclear	2,2

Fonte: BP Statistical Review of World Energy (2021).

1.2 Motivação

O presente trabalho tem como objetivo analisar o impacto da integração da geração fotovoltaica com a rede convencional e o aumento da produção dessa fonte, especialmente no estado de Goiás. Goiás é uma região que enfrenta os efeitos dos fenômenos meteorológicos *El Niño* e *La Niña*, os quais podem provocar variações na irradiação solar e nas condições meteorológicas, fatores cruciais para a geração de energia fotovoltaica [6]. Neste contexto, o estudo irá avaliar o impacto da geração distribuída de energia fotovoltaica quando combinada com energia fornecida pela distribuidora do estado de Goiás. A análise se concentrará na qualidade da energia elétrica injetada nas residências e nas linhas de transmissão, considerando os efeitos dessa integração.

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é analisar os impactos técnicos, econômicos, ambientais e regulatórios da integração da geração distribuída fotovoltaica nas redes elétricas convencionais, com foco no Estado de Goiás. Para isso, são utilizados informações de órgãos reguladores (ANEEL, ONS, ABSOLAR) e apresentados cenários nacionais e internacionais. O trabalho demonstra, com base em dados fornecidos por órgãos regulamentadores, maneiras de mitigar impactos negativos e potencializar o uso seguro e eficiente da energia solar na matriz energética goiana.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, cada um abordando aspectos específicos relacionados à integração de energias renováveis, com foco na energia fotovoltaica. A organização do trabalho foi pensada para proporcionar uma compreensão gradual e aprofundada do tema, partindo dos fundamentos teóricos até a análise de impactos e propostas de soluções tecnológicas.

No Capítulo 1, é apresentada uma visão geral do tema, destacando a importância da energia elétrica na sociedade moderna e o crescimento do consumo energético no Brasil. A motivação do trabalho é explicada, com foco na análise do impacto da geração distribuída fotovoltaica (GDFV) no estado de Goiás, considerando as variações climáticas e a qualidade da energia injetada na rede. Os objetivos do trabalho são delineados, com ênfase na análise dos impactos técnicos, econômicos e ambientais da integração de energias renováveis, bem como na promoção de medidas para melhorar a qualidade energética.

O Capítulo 2 fornece o embasamento teórico necessário para a compreensão do sistema elétrico brasileiro e das energias renováveis. São abordados os conceitos de redes elétricas convencionais, com destaque para os componentes do sistema de geração, transmissão e distribuição de energia. Além disso, são discutidas as principais fontes de energia renovável, com foco na energia solar fotovoltaica, e os desafios técnicos e operacionais relacionados à sua integração nas redes elétricas.

No Capítulo 3, são analisados os aspectos técnicos, econômicos e ambientais da integração de energias renováveis, especialmente a energia solar, nas redes elétricas convencionais. Os impactos técnicos incluem a estabilidade da rede, a intermitência da geração solar e a necessidade de modernização da infraestrutura. Os impactos econômicos abordam os custos de instalação, a viabilidade financeira e os benefícios a longo prazo. Por fim, os impactos ambientais discutem os benefícios da energia solar em comparação com fontes não renováveis, bem como os desafios relacionados à fabricação e instalação dos painéis solares.

O Capítulo 4 apresenta exemplos de países que integraram com sucesso energias renováveis em suas redes elétricas, com destaque para a Índia e seus grandes parques

solares. Além disso, são analisados projetos locais no Brasil, com foco no estado de Goiás, destacando iniciativas como o Complexo Solar Janatúba e a Usina Solar de Barro Alto. O capítulo também aborda os desafios e oportunidades para a expansão da energia solar no Brasil, considerando a dependência tecnológica e a necessidade de investimentos em infraestrutura.

No Capítulo 5, são discutidas as tecnologias emergentes que podem facilitar a integração de energias renováveis nas redes elétricas convencionais. Entre as soluções apresentadas estão as *Smart Grids*, que permitem o gerenciamento eficiente da geração e distribuição de energia, e os sistemas de armazenamento de energia, como baterias e hidrelétricas reversíveis, que ajudam a equilibrar a oferta e a demanda. Além disso, são abordados os Sistemas de Gestão de Energia EMS, que desempenham um papel crucial na otimização e controle da distribuição de energia.

Por fim, o Capítulo 6, apresenta as conclusões gerais do trabalho, destacando a importância da integração de energias renováveis para a sustentabilidade e a estabilidade do sistema elétrico. São discutidos os principais desafios enfrentados e as soluções propostas, com ênfase na necessidade de investimentos em infraestrutura, tecnologias de armazenamento e políticas públicas que incentivem a adoção de fontes renováveis. O capítulo também sugere direções futuras para pesquisas e implementações práticas no setor energético

1.5 Metodologia

A metodologia deste trabalho é predominantemente baseada em pesquisa bibliográfica e análise documental. Foram consultados relatórios técnicos da ANEEL, ONS, ABSOLAR, além da revisão de literatura científica e da investigação dos cenários nacionais e internacionais da energia fotovoltaica, visando compreender sua evolução e impactos. Para o Estado de Goiás, foram coletados dados sobre potência instalada, número de sistemas de geração distribuída, características climáticas e infraestrutura elétrica. O trabalho é de natureza qualitativa, focado na análise de dados existentes e na discussão de impactos e perspectivas futuras para a integração da geração distribuída fotovoltaica nas redes convencionais.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

2.1 Redes Elétricas Convencionais

As redes elétricas são sistemas de infraestrutura responsáveis por gerar, transmitir e distribuir eletricidade de forma eficiente para residências, indústrias e comércios. Elas podem ser alimentadas por fontes de energia convencionais, como usinas termelétricas, nucleares e hidrelétricas. Assim, podemos afirmar que a energia que chega às nossas residências percorre diversos caminhos até conseguir iluminar nossas casas, passando por vários componentes que formam as redes elétricas do nosso país [7].

Os componentes das redes elétricas que estão presentes no nosso cotidiano são constituídos por uma estrutura básica composta por Usinas de Geração de Energia (responsáveis por produzir a eletricidade), Subestações (que recebem a energia gerada pelas usinas e reduzem o nível de tensão para as linhas de transmissão), Linhas de Transmissão (que transportam a eletricidade por longas distâncias) e Distribuição de Energia (que distribui a eletricidade nas cidades) [8].

A Geração de Energia pode ser realizada de várias formas, mas as mais tradicionais no sistema brasileiro são por meio das usinas hidrelétricas (55%), eólicas (14,8%) e de biomassa (8,4%), além das fontes não renováveis, como gás natural (9%), petróleo (4%) e carvão mineral (1,75%)[7]. Assim, a maior fonte de geração de energia no Brasil é a energia hidrelétrica. O estado de Goiás, por exemplo, tem como sua maior fonte de produção de energia elétrica a Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa, localizada na

Bacia do Alto Tocantins, em Goiás. Essa usina é responsável pelo Sistema Interligado Sul/Sudeste/Centro-Oeste e também pela interligação dos sistemas Norte/Nordeste, sendo o elo da Interligação Norte-Sul [8].

A linha de transmissão é responsável por elevar a eletricidade gerada nas usinas para, durante o processo de transporte, minimizar as perdas de energia ao longo do trajeto até as subestações de distribuição. As linhas são compostas por cabos condutores, materiais capazes de conduzir corrente elétrica, como cobre e alumínio. Além dos materiais utilizados para transportar a energia, é importante citar também as estruturas metálicas que sustentam grandes quantidades de cabos. As torres são projetadas para garantir o transporte seguro da energia de um ponto a outro, mantendo os cabos a uma altura considerável para evitar riscos e garantir a segurança do processo. Sendo assim, as linhas de transmissão são projetadas para percorrer grandes distâncias, como pode ser observado em todo o território brasileiro, que é interligado de ponta a ponta, ligando as usinas geradoras às centrais de distribuição [7].

As subestações são responsáveis por interligar as linhas de transmissão com os centros de distribuição de energia. Elas cuidam da transformação da tensão (redução ou aumento da tensão), da proteção das linhas de transmissão e da manutenção, além da conexão e interligação do sistema e da distribuição da energia [8].

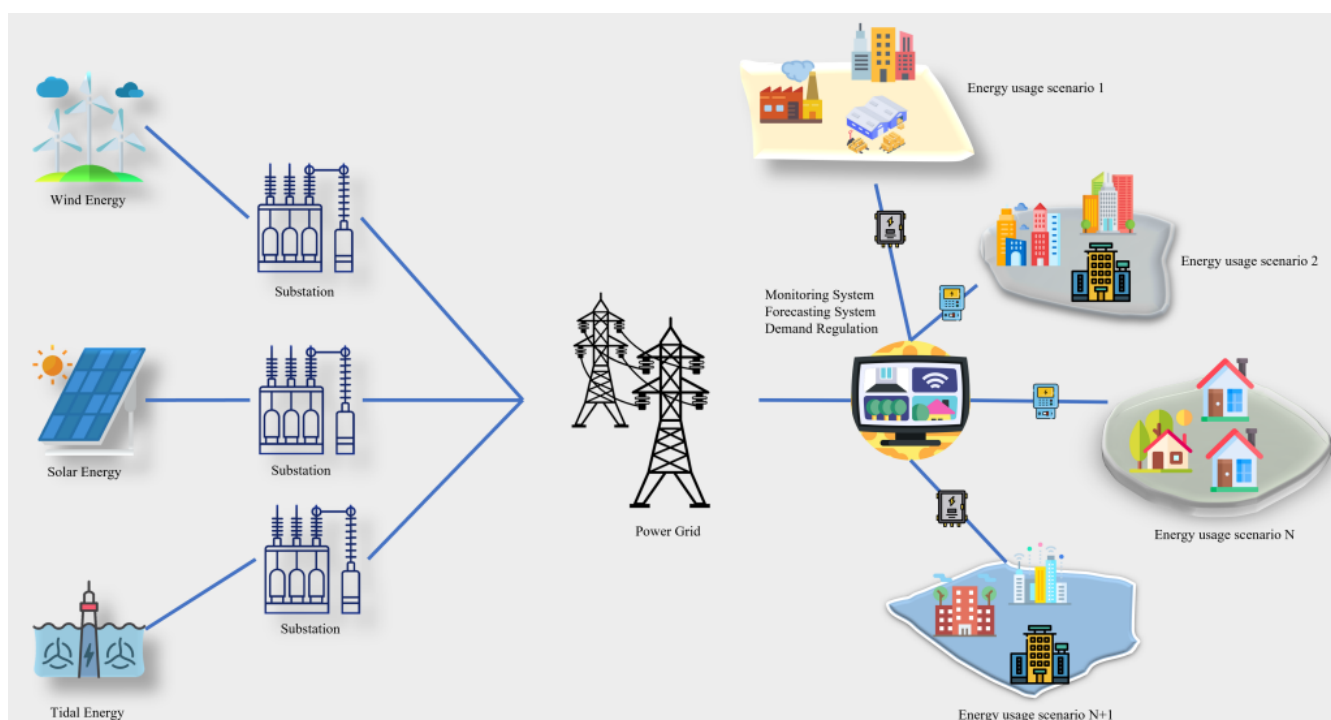
O processo de distribuição começa quando as subestações recebem a energia das linhas de transmissão e reduzem a tensão, para que assim possa ser redistribuída por meio de linhas de baixa tensão. Passando por essas linhas de baixa tensão, a energia chega aos transformadores de distribuição e, posteriormente, é entregue conforme os padrões de entrada de cada residência [7].

À medida que aumenta a demanda energética do nosso país para os diversos setores, novas usinas geradoras, linhas de transmissão e centros de distribuição precisam ser planejados ou até mesmo ampliados para que possam suprir as novas demandas de produção. Juntamente com o crescimento das novas linhas de transmissão, as linhas existentes também devem ser adaptadas para acompanhar esse aumento, garantindo o funcionamento e a estabilidade adequados da rede, sempre levando em consideração a confiabilidade, segurança, economia e o meio ambiente nos quais estão inseridas [7].

Devido ao avanço tecnológico, o setor elétrico brasileiro tem enfrentado novos desafios para implementar de maneira mais eficiente as fontes renováveis, como a energia eólica e solar, nas redes elétricas tradicionais. A integração de serviços como as *smart grids* (uso de tecnologia da informação para tornar o sistema mais eficiente) tem se tornado cada vez mais comum para o gerenciamento da eficiência na distribuição de energia, visando evitar falhas na rede. Além disso, tem-se buscado cada vez mais formas de reduzir o impacto ambiental causado pelas fontes de energia não renováveis, uma vez que a transição para fontes limpas e sustentáveis se torna cada vez mais evidente [9].

Conforme apresentado na Figura 2.1, observa-se a inserção de tecnologias das *smart grids* para otimizar a integração de fontes renováveis ao sistema elétrico.

Figura 2.1: Integração de fontes renováveis (solar, eólica) ao sistema elétrico por meio de *smart grids*.



Fonte: Adaptado de Predicting Short Term Energy Demand in Smart Grid: A Deep Learning Approach for Integrating Renewable Energy Sources in Line with SDGs [10]

2.2 Energias Renováveis

As energias renováveis são fontes de produção energética que utilizam recursos naturais e inesgotáveis. Elas aproveitam os recursos disponíveis na própria natureza, como a energia solar, que usa a radiação do sol para gerar eletricidade; a energia eólica, que utiliza o vento; e a bioenergia, gerada pela queima de matéria orgânica. Muitos estudos apontam que o desenvolvimento dessas fontes alternativas pode reduzir significativamente os impactos ambientais, oferecendo uma produção energética mais sustentável [9].

No Brasil, embora as hidrelétricas ainda representem 58% da matriz energética, o país alcançou, em 2023, a marca de 93,1% de sua produção de energia elétrica proveniente de fontes renováveis. Esse avanço posiciona o Brasil como um dos maiores produtores de energia limpa no mundo, conforme dados do Ministério de Minas e Energia (MME) [9]. A incorporação das energias renováveis à matriz energética brasileira traz benefícios importantes para as concessionárias de distribuição, especialmente durante períodos de escassez hídrica, comuns em algumas regiões. Nesse contexto, as energias renováveis se tornam uma alternativa crucial para compensar as flutuações na geração de energia das usinas hidrelétricas, ainda predominantes no país [7].

A utilização de fontes renováveis é uma excelente maneira de contribuir para matrizes energéticas mais limpas e sustentáveis, colaborando assim para a criação de estratégias que ajudem na mitigação dos efeitos climáticos causados pelas fontes de energia não renováveis. A energia eólica e solar são dois exemplos de fontes responsáveis pela diminuição significativa das emissões de CO₂, especialmente quando comparadas às fontes que utilizam combustíveis fósseis, os quais geram altas emissões de CO₂ [11].

A transição energética global, conforme apontado pela ANEEL, é um desafio considerável, especialmente no que diz respeito ao uso de fontes de energia menos poluentes para a geração em larga escala. Ao longo dos anos, as fontes renováveis têm se destacado cada vez mais no cenário global. Em 2021, o MME ressaltou o crescimento das matrizes energéticas sustentáveis, evidenciando que, naquele ano, a geração de energia eólica representou 10,9% da matriz elétrica brasileira, enquanto a energia solar

contribuiu com 2%. Embora esses números ainda sejam modestos diante da grande participação das hidrelétricas, o crescimento contínuo das energias renováveis é um indicativo claro do avanço rumo a um sistema energético mais sustentável [12].

A geração de energia eólica tem como principal fonte renovável a utilização dos ventos para produzir eletricidade. As turbinas eólicas, como são denominadas as pás, convertem a energia cinética do vento (movimento das moléculas de ar) em energia mecânica, que faz com que os motores funcionem e gerem energia [7].

Além de ser considerada uma fonte renovável devido à utilização dos ventos, a energia eólica oferece várias vantagens, como a redução de gases poluentes, como o CO₂, por não depender do uso de combustíveis fósseis. No entanto, a instalação de usinas eólicas enfrenta desafios devido à grande área necessária para a construção dessas usinas. Para que a geração de energia seja adequada e eficiente, é essencial que as usinas eólicas estejam localizadas em regiões que favoreçam sua produção, ou seja, em locais com ventos constantes e intensos. Nessas regiões, diversas usinas são instaladas, como no caso da região Nordeste, que se beneficia da produção de energia eólica [11].

No Brasil, embora a matriz hídrica ainda seja a principal fonte de energia do país, a energia eólica vem se expandindo gradativamente no fornecimento de eletricidade. Como já citado pela ANEEL, 14,8% da produção energética já provém de usinas eólicas. Assim, o Brasil se tornou um dos maiores produtores de energia eólica do mundo, devido à crescente implementação de novas usinas em seu território [7].

A crescente necessidade por fontes de energia renováveis, impulsionada pelas mudanças climáticas nos últimos anos, exige a redução das emissões de gases poluentes na atmosfera, já que muitas fontes de energia ainda geram emissões prejudiciais. Nesse contexto, a produção de energia solar tem sido cada vez mais explorada, dada a sua importância no cenário global e na diversificação das matrizes energéticas. A produção de energia solar vem sendo estudada há bastante tempo. Em 1839, o físico francês Edmond Becquerel fabricou e estudou a primeira célula fotovoltaica. O experimento consistiu em dois eletrodos imersos em uma solução ácida, que, ao serem iluminados, geram eletricidade. Desde então, cientistas de todo o mundo aprimoraram os estudos sobre as células fotovoltaicas [9].

Em 1883, Charles Fritts fez história ao criar o primeiro painel solar do mundo, utilizando um mineral de selênio coberto por uma camada extremamente fina de ouro. Embora esse dispositivo fosse simples em comparação com os padrões atuais, ele marcou o nascimento da indústria fotovoltaica, ao converter a luz em eletricidade, criando uma nova fonte de energia [13].

A utilização de energia fotovoltaica tem se tornado cada vez mais comum para a geração de eletricidade. Órgãos regulamentadores como ONS, MME, ANEEL e outros apontam um forte crescimento da matriz energética derivada da incidência solar. A ANEEL informou que, durante o ano de 2024, o Brasil registrou um aumento de 10.853,35 (MW) em sua capacidade instalada. Esse crescimento foi o maior já registrado desde a primeira medição do órgão em 1997, superando a meta prevista de 10.106 MW para 2024 [7].

A implementação de usinas fotovoltaicas tem crescido gradativamente a cada ano. Em 2024, conforme dados da ANEEL, foram instaladas 301 novas plantas em 16 estados brasileiros. Deste total, 91,13% da potência instalada foi proveniente de usinas fotovoltaicas, enquanto 39,26% veio de usinas eólicas. Entre as novas usinas fotovoltaicas, 147 plantas foram responsáveis por 5.629,69 MW de potência instalada. Dentre os estados que implementaram essas usinas, Minas Gerais se destacou com uma produção de 3.173,85 MW. Já Goiás obteve um crescimento mais modesto, ficando entre os últimos produtores, com uma produção de apenas 27,30 MW [7].

De acordo com a ABSOLAR, a Lei 8.922/20 garante a isenção do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) sobre a geração de energia de pequenos geradores solares fotovoltaicos, que injetam os excedentes na rede elétrica convencional. Além disso, a norma determina que as concessionárias beneficiem os microgeradores pela energia injetada, gerando créditos com base na energia produzida e injetada. Assim, o microgerador acumula créditos pelo excedente, que podem ser utilizados em meses com menor produção ou até em outras unidades vinculadas à mesma titularidade [11].

2.3 Integração das Energias Renováveis nas Redes Elétricas

A crescente demanda por fontes de energia limpa e sustentável tem impulsionado a adoção de fontes renováveis, como a solar e a eólica, para a produção de eletricidade. Contudo, a integração dessas fontes à rede elétrica convencional requer um estudo aprofundado, visto que traz desafios técnicos e operacionais significativos. À medida que o uso dessas fontes se expande, é crucial que concessionárias e órgãos reguladores fiquem atentos, a fim de prevenir problemas na distribuição de energia [14].

A integração da energia fotovoltaica, por exemplo, apresenta características diferentes das da energia eólica. A produção fotovoltaica ocorre principalmente por meio de painéis instalados em telhados de residências, enquanto a energia eólica exige grandes áreas de terreno e regiões com forte vento. Dessa forma, a incorporação dessas fontes renováveis na infraestrutura elétrica convencional requer adaptações específicas na rede de distribuição, garantindo que o sistema esteja preparado para absorver essas novas fontes e que a energia chegue ao consumidor final de maneira eficiente [15].

Além disso, a histórica dependência do Brasil de fontes hídricas para a geração de energia traz desafios adicionais. A intermitência das fontes solar e eólica — que são suscetíveis a variações climáticas locais — pode provocar flutuações na geração de eletricidade, o que resulta em variações nos níveis de tensão da rede. Essas oscilações aumentam a complexidade da integração de fontes renováveis à rede elétrica convencional, exigindo melhorias nas linhas de transmissão e ajustes no sistema para garantir sua estabilidade e a entrega eficiente de energia [14].

Com o objetivo de impulsionar a crescente implementação de fontes renováveis na rede elétrica, os órgãos reguladores devem investir gradualmente em pesquisas e no desenvolvimento de tecnologias que possibilitem o armazenamento e a distribuição eficientes dessa energia. Nesse contexto, é fundamental a modernização dos equipamentos e a expansão da infraestrutura de transmissão. Além disso, as entidades responsáveis pela distribuição devem incentivar a integração eficiente de novas fontes renováveis nas matrizes energéticas brasileiras, especialmente considerando a escassez hídrica enfrentada por diversas regiões do país. Ao fazer isso, é possível

aproveitar as fontes alternativas para atender à demanda necessária de energia [15].

Capítulo 3

Principais aspectos da integração das Energias Renováveis

3.1 Aspectos Técnicos

A crescente integração de fontes alternativas de energia, como a solar e a eólica, nas redes elétricas convencionais tem gerado novos desafios técnicos para as empresas responsáveis pela distribuição de energia no país. Essa evolução exige melhorias urgentes no sistema de distribuição para garantir sua eficiência e confiabilidade. A inserção dessas fontes de energia, inicialmente não previstas, pode causar instabilidades nas redes elétricas. Além disso, a infraestrutura existente precisa ser modernizada para suportar as novas tensões geradas por essas fontes, além de ser necessário adotar uma gestão eficaz da variabilidade e intermitência dessas fontes renováveis [16].

Com a implementação dessas novas fontes, é essencial garantir que o Sistema Elétrico de Energia (SEE) continue operando de maneira confiável e contínua, mesmo com a introdução de novas tensões na rede. Também é fundamental estudar os eventos gerados por essa nova demanda, que podem comprometer o funcionamento do sistema. Nesse contexto, torna-se imprescindível realizar um estudo de estabilidade do sistema elétrico. O estudo de estabilidade energética é um aspecto essencial para assegurar a operação adequada do SEE, uma vez que, com base nele, é possível aumentar a confiabilidade na distribuição de energia [17].

O estudo da estabilidade de um SEE refere-se à capacidade do sistema de retornar à sua condição inicial de operação após uma perturbação, como falhas ou variações inesperadas, restabelecendo seu equilíbrio operacional. Dessa forma, o sistema pode se recuperar dessas perturbações e operar normalmente sem grandes falhas ou danos. A estabilidade não deve ser vista como um estado fixo, mas como uma condição dinâmica, que pode variar ao longo do tempo, conforme as condições de operação do sistema evoluem [17].

Garantir a estabilidade do sistema elétrico é uma das principais preocupações para o seu bom funcionamento. Para manter sua eficiência, é essencial avaliar as condições da rede, a fim de evitar situações críticas, como o colapso ocorrido no Brasil em 2023, que deixou um terço do país sem energia. De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o blecaute foi causado por uma falha na interligação entre as regiões Norte e Sudeste [18] .

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são redes interconectadas que abrangem a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Eles são responsáveis por garantir que a energia seja produzida de forma eficiente, transmitida com segurança e distribuída de maneira confiável até o consumidor final. No entanto, os SEPs estão sempre suscetíveis a condições adversas e imprevisíveis, o que pode resultar em falhas ou até mesmo em operações inadequadas, como ocorreu no Brasil em 2023 [18].

A modernização das infraestruturas elétricas é impulsionada por estudos de médio prazo (PAR/PEL), cujo objetivo é consolidar as ampliações, os reforços e as melhorias na Rede Básica e nas demais instalações de transmissão. Essas instalações desempenham um papel essencial no planejamento da expansão do sistema de transmissão, pois, a partir desses estudos, são avaliados o desempenho das interligações e o dimensionamento adequado dos sistemas, garantindo a eficiência e a confiabilidade da rede [19].

Com o crescente aumento da inserção de fontes de energia renováveis, como a solar, o impacto delas no SEE deve ser cuidadosamente gerido pelo ONS. A geração das usinas fotovoltaicas é considerada intermitente, pois depende da disponibilidade de recursos naturais, como a luz solar, para produzir energia. A geração fotovoltaica varia conforme a posição do sol, a estação do ano e a presença de nuvens, o que

pode reduzir sua produção. No entanto, sua produção não é totalmente nula em dias nublados, pois o sistema ainda consegue operar com a difusão da luz solar [20].

A gestão da variabilidade é uma tarefa crítica para os operadores do sistema elétrico, que devem estar preparados para lidar com as flutuações da demanda, que podem ocorrer tanto para mais quanto para menos. Esses operadores precisam estudar constantemente as condições da rede para lidar com as incertezas e certezas impostas a ela. As flutuações podem se manifestar em variações de tensão, corrente ou até mesmo na frequência de operação (60 Hz), sendo causadas por alterações na carga elétrica, falhas momentâneas de componentes da rede (como transformadores, linhas de transmissão ou inversores), ou oscilações de carga resultantes de componentes que provocam variações [17].

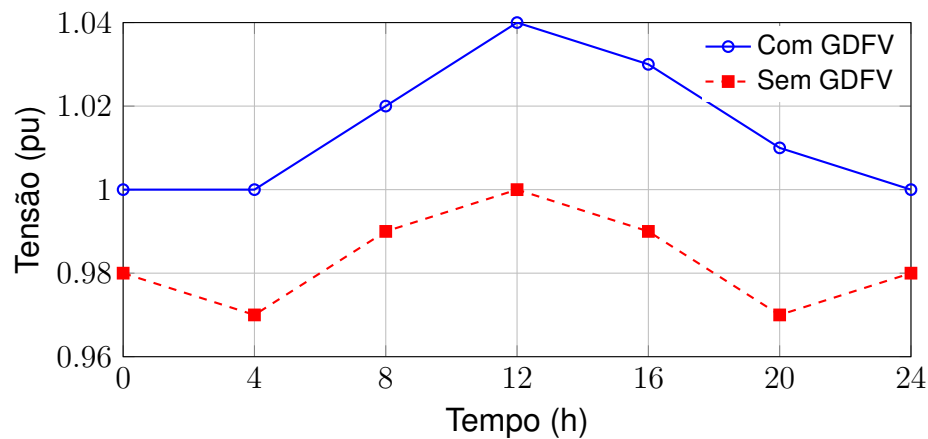
Além disso, a criação e o aprimoramento de novas tecnologias para a gestão do impacto da variabilidade e das flutuações causadas pela intermitência das fontes renováveis podem ser cruciais. A implementação de sistemas, como os *Smart Grids*, é um exemplo de como a automatização e o uso intensivo de tecnologias de informação e comunicação podem melhorar a operação do SEE. A ideia dos *Smart Grids* é permitir a comunicação eficiente entre os componentes da rede elétrica, o que possibilita a criação de estratégias de controle e otimização mais eficazes e estáveis. Isso facilita a adaptação do sistema a variações dinâmicas, garantindo maior resiliência e confiabilidade no fornecimento de energia [21].

Essas flutuações e desafios de controle de tensão podem ser visualmente observados e quantificados. A Figura 3.1 ilustra o comportamento da tensão em um sistema de distribuição ao longo de 24 horas, comparando a operação com e sem a presença de Geração Distribuída de Fontes Variáveis (GDFV).

Conforme demonstrado na 3.1, observa-se uma leve elevação nos níveis de tensão ao longo do dia em redes com alta penetração de GDFV. A curva "Com GDFV" (linha azul) mostra que a tensão atinge seu pico em torno do meio-dia, período de maior irradiação solar, atingindo níveis superiores a 1,04 pu. Em contraste, a curva "Sem GDFV" (linha vermelha tracejada) apresenta variações de tensão mais suaves e em patamares mais baixos, próximos de 0,98 pu. Esses resultados evidenciam a necessidade de estudos e ações para mitigação de sobretensões e impactos na qualidade

da energia, um desafio técnico diretamente relacionado à gestão da variabilidade das fontes renováveis.

Figura 3.1: Perfil de tensão ao longo do dia com e sem geração distribuída de fontes variáveis (GDFV).



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Análise Técnica Detalhada – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (Simulação Avançada)

3.2.1 Visão Geral

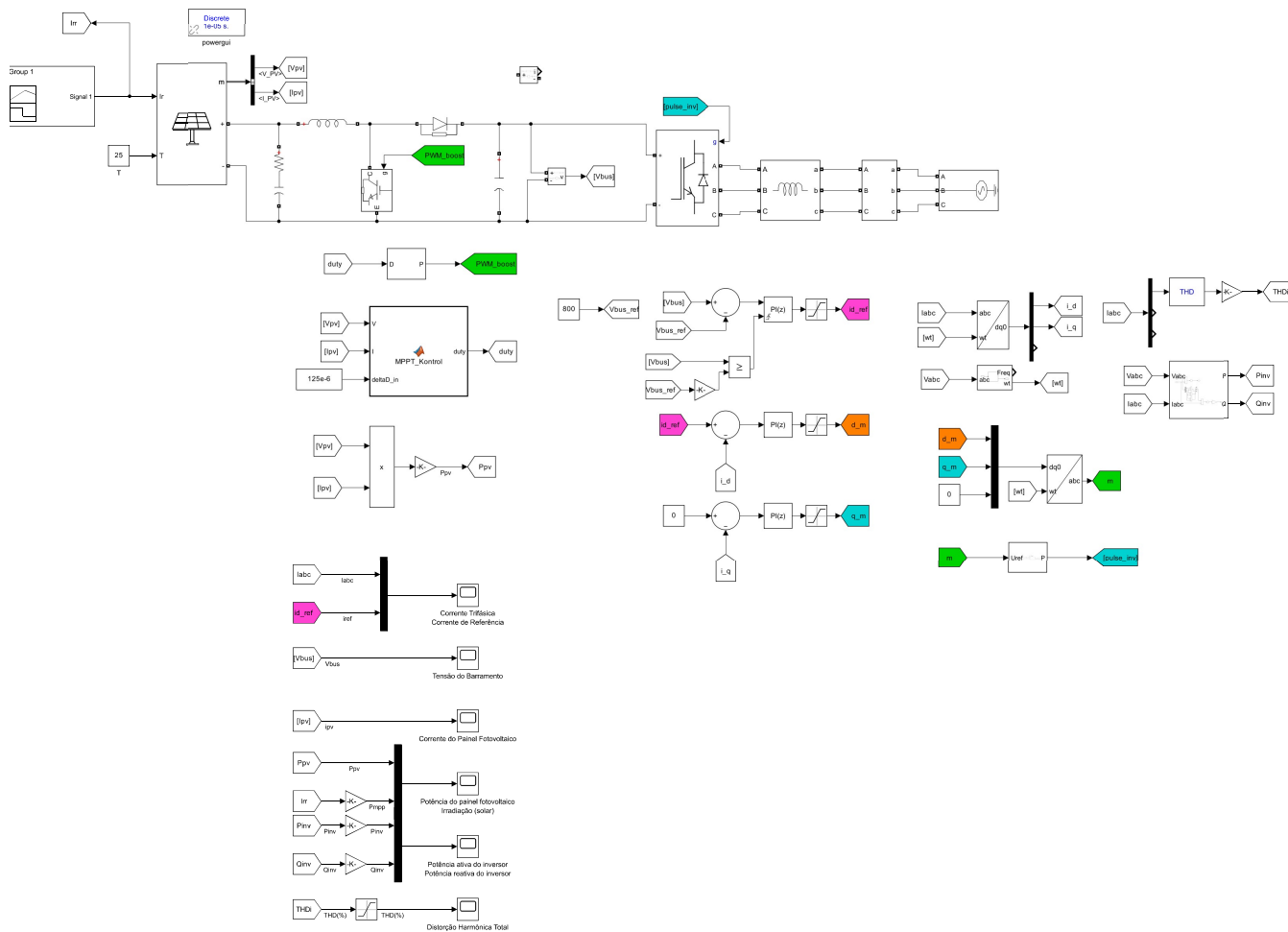
A presente análise fundamenta-se em uma simulação computacional elaborada no ambiente *MATLAB/Simulink*, tomando como base o modelo apresentado em [22]. O sistema modelado representa uma configuração típica de geração fotovoltaica conectada à rede elétrica, envolvendo conversão CC/CA, controle ativo do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* – MPPT) e filtragem harmônica por meio de filtro do tipo LCL. O objetivo principal é injetar energia elétrica na rede pública, assegurando estabilidade de tensão, sincronismo e conformidade com padrões normativos de qualidade de energia, como a norma IEEE 519:2014 [23].

3.2.2 Componentes do Sistema e Suas Funções

O sistema em estudo é composto pelos seguintes elementos:

1. **Arranjo Fotovoltaico (PV Array) Função:** Converter a radiação solar incidente em energia elétrica de corrente contínua (CC) por meio do efeito fotovoltaico. **Modelagem:** Implementado com parâmetros de módulo real, incluindo curva característica corrente-tensão (I–V) dependente da irradiância e temperatura ambiente. **Atuação:** Fornece tensão e corrente variáveis, que são continuamente ajustadas pelo MPPT para operação no ponto de máxima potência.

Figura 3.2: Sistema fotovoltaico conectado à rede com conversor boost e inversor



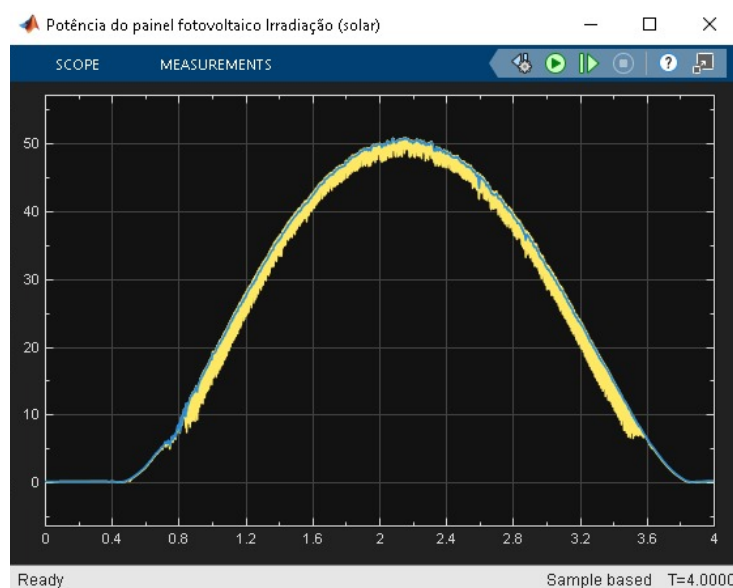
Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme ilustrado na Figura 3.3, observa-se que a potência extraída do arranjo FV acompanha de forma fiel o perfil de irradiância, evidenciando a eficiência do MPPT.

2. **Conversor Boost com MPPT Conversor Boost:** Eleva a tensão fornecida pelo arranjo fotovoltaico para o nível requerido no barramento CC, compensando

variações de irradiância. **Controle MPPT:** Utiliza algoritmos como *Perturb and Observe* (P&O) ou *Incremental Conductance* (IncCond), ajustando o *duty cycle* do PWM para maximizar o produto tensão $\times$ corrente na saída do arranjo FV [24]. **Atuação no sistema:** Garante a extração da máxima potência disponível, mesmo em condições variáveis de irradiância e temperatura.

Figura 3.3: Potência do painel fotovoltaico em função da Irradiação (Solar)



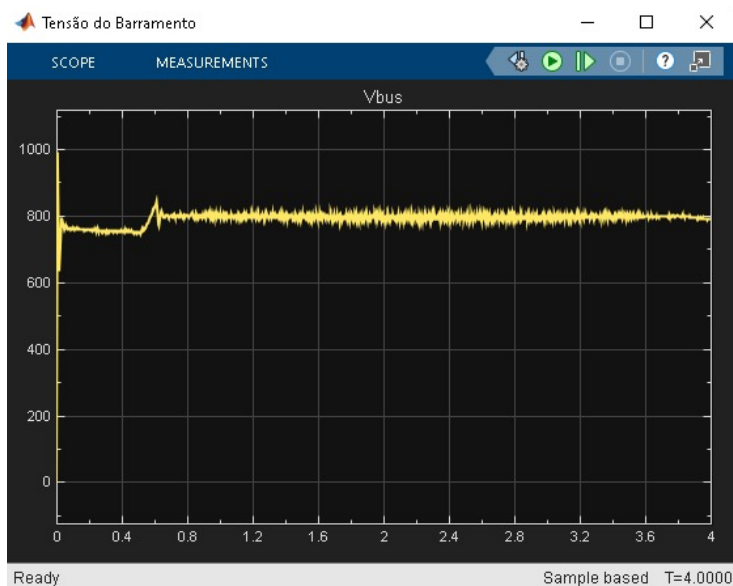
Fonte: Elaborada pelo autor

3. **Barramento CC (DC Link) Função:** Armazenar temporariamente energia elétrica e fornecer tensão estável ao inversor. **Modelagem:** Representado por capacitor de alta tensão (800–900 V), dimensionado para suavizar variações rápidas de tensão. **Atuação:** Atua como elemento de desacoplamento entre o conversor *Boost* e o inversor, mitigando oscilações transitórias.

A Figura 3.4 apresenta a tensão do barramento CC, evidenciando estabilidade em torno do valor nominal mesmo sob variações de irradiância.

4. **Inversor PWM Função:** Converter a tensão CC do barramento em tensão e corrente alternadas trifásicas sincronizadas com a rede elétrica. **Controle:** Utiliza modulação senoidal PWM, cujos sinais de referência são sincronizados à rede por meio do PLL. **Atuação:** Injeta potência ativa de forma estável, permitindo controle do fator de potência e minimização de distorções harmônicas.

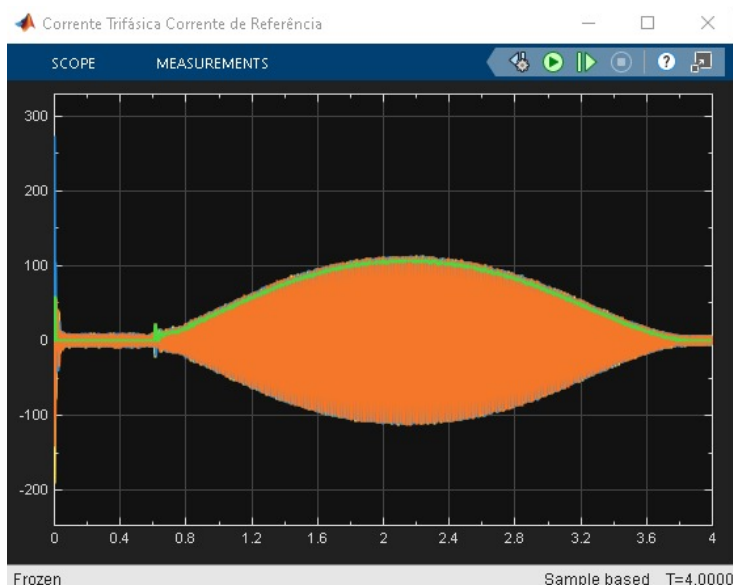
Figura 3.4: Tensão do Barramento



Fonte: Elaborada pelo autor

Como pode ser observado na Figura 3.5 as correntes trifásicas seguem fielmente suas referências, demonstrando a precisão do controle vetorial do inversor.

Figura 3.5: Corrente Trifásica Corrente de Referência



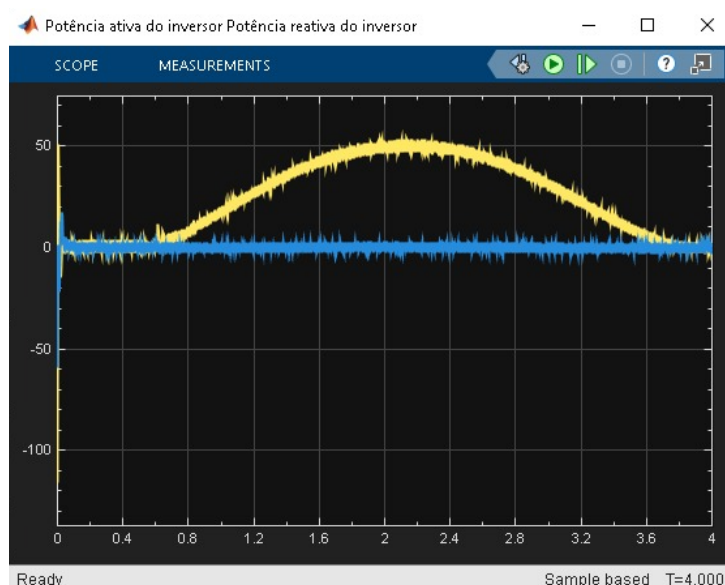
Fonte: Elaborada pelo autor

5. **Filtro LCL Função:** Reduzir o conteúdo harmônico das correntes geradas pelo inversor antes de sua injeção na rede. **Estrutura:** Constituído por dois indutores (lado inversor e lado rede) e um capacitor no ponto intermediário. **Atu-**

ação: Atenua as componentes de alta frequência oriundas da comutação PWM, assegurando conformidade com limites de Distorção Harmônica Total (THD) estabelecidos pela IEEE 519.

A Figura 3.6 apresenta a potência ativa e reativa no ponto de conexão, evidenciando fator de potência próximo à unidade.

Figura 3.6: Potência ativa do Inversor Potência reativa do inversor



Fonte: Elaborada pelo autor

6. **Rede Elétrica (Grid) Função:** Receber e distribuir a energia elétrica injetada pelo sistema fotovoltaico. **Modelagem:** Fonte de tensão trifásica ideal, representando o sistema elétrico de distribuição. **Atuação:** Fornece referência de frequência e fase para o sincronismo do inversor via PLL.
7. **PLL (*Phase-Locked Loop*) Função:** Sincronizar a saída do inversor com a frequência e a fase da rede elétrica. **Atuação:** Mede a tensão da rede e ajusta os sinais de controle do inversor, garantindo injeção de corrente em fase com a tensão, maximizando a transferência de potência ativa.

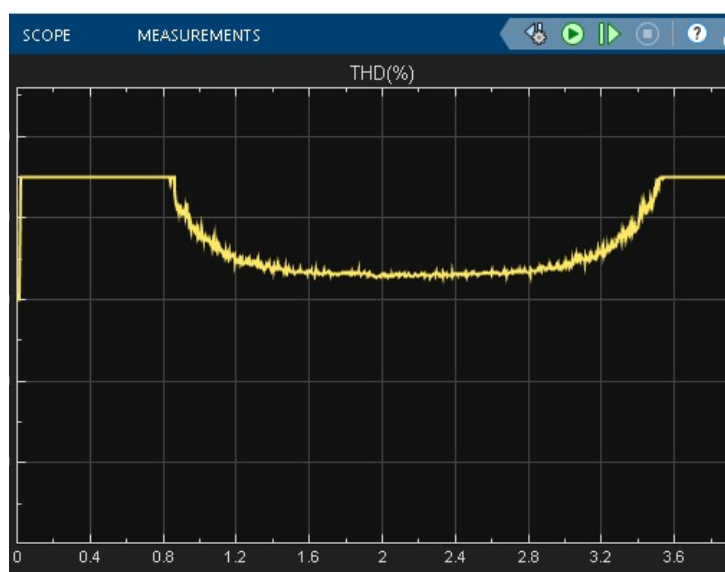
3.2.3 Observações de Desempenho

Os resultados da simulação evidenciam que:

- **Estabilidade:** O barramento CC manteve-se dentro da faixa nominal, mesmo sob variações abruptas de irradiância.
- **Controle Dinâmico:** O *duty cycle* do conversor *Boost* e do inversor adaptou-se rapidamente, assegurando operação no ponto de máxima potência.
- **Qualidade de Energia:** A THD permaneceu inferior a 5% em regime permanente, em conformidade com a IEEE 519.
- **Resposta Transitória:** Desvios temporários de tensão e corrente foram amortecidos em intervalos inferiores a 0,1 s, indicando robustez no controle.

Na Figura 3.7, verifica-se que o índice de THD permanece abaixo de 5% durante regime permanente, atendendo à IEEE 519.

Figura 3.7: Distorção Harmônica Total



Fonte: Elaborada pelo autor

3.3 Impactos Econômicos

Com o aumento do desenvolvimento urbano em diversas regiões, também cresce a demanda pela instalação de Sistemas Fotovoltaicos (SFV). Para aqueles que desejam investir nessa tecnologia, é essencial compreender que a implementação de um sistema fotovoltaico exige um investimento inicial significativo. Esse custo envolve a aquisição

de painéis solares, inversores, a infraestrutura elétrica necessária e a contratação de mão de obra qualificada para a instalação [25].

3.3.1 Evolução e tecnologias de mercado

Nos últimos anos, os preços dos materiais necessários para a instalação de sistemas fotovoltaicos apresentaram uma tendência de queda, principalmente devido ao avanço tecnológico, ao aumento da concorrência no mercado e às inovações nos materiais empregados [26]. Esse progresso tecnológico também tem contribuído para melhorias na eficiência dos painéis solares, permitindo o desenvolvimento de placas cada vez mais avançadas, capazes de gerar mais energia e reduzir os custos de produção.

3.3.2 Células PERC (*Passivated Emitter and Rear Cell*)

As células solares PERC (*Passivated Emitter and Rear Cell*), por exemplo, são amplamente reconhecidas por seu bom custo-benefício. Elas oferecem boa eficiência na conversão da luz solar em energia elétrica a um preço acessível. Embora não sejam as mais eficientes do mercado, as células PERC se destacam pela excelente relação custo-benefício. No entanto, essas células enfrentam desafios, como a maior vulnerabilidade a ambientes quentes e úmidos, o que pode comprometer seu desempenho. Para mitigar esse problema, pesquisadores têm se dedicado a aprimorar a proteção dessas células. Uma das soluções propostas é o uso de materiais como o POE (Poliolefina Elastomérica), que ajudam a proteger as células da umidade. Além disso, a adição de camadas extras de proteção pode garantir uma operação mais eficiente e duradoura do sistema fotovoltaico [27].

3.3.3 Células HJT (*Heterojunction Technology*)

Embora as células PERC sejam bastante populares devido à sua relação custo-benefício, outras tecnologias de placas também são amplamente utilizadas no mercado. Um exemplo disso são as placas HTJ (*Heterojunction Technology*), que combinam silício cristalino com camadas de silício amorfo. Essa combinação resulta em placas

com menor perda de eficiência, alto desempenho em altas temperaturas e menor degradação ao longo do tempo. No entanto, a tecnologia HTJ (*Hybrid Tunneling-Junction*) ainda não é tão popular, principalmente devido ao seu alto custo. Nesse cenário, a tecnologia PERC se destaca, pois oferece uma solução mais acessível para os consumidores sem comprometer a qualidade [27].

Além disso, houve um avanço significativo na produção de módulos fotovoltaicos, com a transição de módulos baseados em junção múltipla de silício de película fina para uma nova geração de módulos fotovoltaicos de dupla face, utilizando a junção de silício amorfo e cristalino (*Heterojunction Technology - HJT*). Essa inovação trouxe diversas melhorias, como: um aumento na eficiência dos módulos, que podem atingir valores superiores a 24,5%; maior produção de energia, uma vez que a solução de face dupla permite capturar luz na parte traseira das placas; maior durabilidade, com os módulos HJT podendo ultrapassar 30 anos de vida útil, comparado aos 25 anos dos módulos convencionais; e maior resistência e adaptabilidade, já que esses módulos se destacam em condições climáticas extremas, mantendo sua capacidade de geração de energia [28].

3.3.4 Células TOPCon (*Tunnel Oxide Passivated Contact*)

Outra tecnologia emergente no setor fotovoltaico é a TOPCon (*Tunnel Oxide Passivated Contact*), que utiliza silício monocristalino do tipo n. A TOPCon se destaca pela disponibilidade abundante de matéria-prima, facilidade no processo de produção e alto potencial de eficiência. Considerada uma evolução da tecnologia PERC, a TOPCon incorpora uma camada de óxido, o que melhora a passagem de elétrons entre as camadas do módulo solar. Como resultado, a tecnologia TOPCon pode aumentar a produção energética dos módulos solares em até 25%, além de oferecer maior resistência ao calor e menor degradação ao longo do tempo. Embora o custo da TOPCon ainda seja elevado em comparação com a PERC, essa tecnologia vem gradualmente reduzindo seus custos de produção e ganhando espaço no mercado de painéis fotovoltaicos [27].

Embora as seções anteriores tenham detalhado as características e o desempenho das tecnologias PERC, HJT e TOPCon individualmente, a Tabela 3.1 a seguir apresenta

um comparativo direto entre elas. Esta tabela consolida as informações sobre eficiência, vantagens, limitações e custo relativo, permitindo uma análise clara das principais diferenças e similaridades entre cada tecnologia de célula fotovoltaica disponível no mercado.

Tabela 3.1: Comparativo entre Tecnologias Fotovoltaicas

Tecnologia	Eficiência (%)	Vantagem	Limitação	Custo relativo
PERC	20–22	Bom custo-benefício	Maior degradação térmica	Baixo
HJT	23–24,5	Melhor desempenho térmico, menor degradação	Custo alto	Alto
TOPCon	22–24	Alta eficiência, boa performance térmica	Custo ainda elevado	Médio

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em [27][28].

Observa-se que, embora a tecnologia HJT apresente maior eficiência e estabilidade térmica, seu custo ainda é significativamente superior às opções PERC. Por outro lado, a TOPCon surge como uma alternativa intermediária, com alta eficiência e custos gradualmente em queda, o que pode viabilizar sua adoção em larga escala nos próximos anos.

3.4 Aspectos regulatórios e econômicos

3.4.1 O modelo de *Net Metering* e sua regulamentação

Com a evolução da tecnologia dos painéis solares, observa-se que novas soluções estão sendo gradualmente implementadas para suprir as limitações das tecnologias anteriores. Dessa forma, tecnologias que, em um primeiro momento, eram consideradas inacessíveis, agora são incorporadas aos sistemas fotovoltaicos, resultando em maior eficiência energética e maior durabilidade dos sistemas .

Com o avanço tecnológico dos painéis solares, o investimento neles reflete diretamente nas contas de energia dos consumidores. Em diversos países, o mercado de energia solar adota o sistema *Net Metering* (medição líquida), que é uma metodologia de compensação da energia elétrica gerada por uma unidade consumidora. Nesse modelo, o excesso de energia produzida pelo sistema fotovoltaico é injetado na rede elétrica, e, em contrapartida, o proprietário da unidade consumidora recebe créditos pelo excedente gerado. Esses créditos podem ser usados posteriormente para compensar o consumo de energia da rede elétrica quando o sistema fotovoltaico não gerar o suficiente, como à noite ou em dias nublados [29].

Esse sistema de distribuição é voltado para consumidores em baixa tensão, os quais utilizam a tarifa monômnia, conforme estabelecido no Decreto nº 62.724, de 17 de maio de 1968. A cobrança é feita com base no consumo líquido, ou seja, a energia consumida da rede é subtraída da energia injetada na rede elétrica [29].

Entretanto, o modelo de *Net Metering* não é plenamente aceito por algumas distribuidoras de energia, que argumentam sobre o desequilíbrio nas tarifas e nos custos de manutenção da geração. Elas alegam que, ao começar a produzir sua própria energia por meio de painéis solares, o consumidor deixa de pagar pelos custos fixos e variáveis incorporados às tarifas, prejudicando a receita das distribuidoras [29].

Ainda assim, o decreto criado em 1968 ainda é válido nos dias de hoje, porém em 2022 foi criada a Lei 14.300/2022 [30], que se refere à Geração Distribuída de Energia Elétrica no Brasil, trazendo novas regras para o modelo de compensação de energia. Com isso, há modificações no adequamento dos custos das infraestruturas e distribuição dessa nova fonte de energia implementada na linha de transmissão, visando ajustes de tarifas de compensação para consumidores a partir do ano de 2023, mantendo o incentivo à criação de novos produtores de energia solar [30]).

3.4.2 Benefícios para o mercado e a mão de obra

Apesar disso, as distribuidoras podem se beneficiar a médio e longo prazo com o aumento da geração fotovoltaica. A maior adoção dessa tecnologia contribui para a produção de energia, reduz as perdas técnicas, pois diminui a necessidade de comprar

energia elétrica para distribuição, e reduz o fator de carregamento dos transformadores, aumentando sua vida útil [28].

A geração de energia solar impulsiona o mercado socioeconômico do país, uma vez que a demanda por serviços de instalação de painéis solares em residências tem aumentado gradativamente. Esse crescimento gera uma maior procura por mão de obra qualificada, além de incentivar muitas pessoas a se inserirem nesse setor, criando novas oportunidades de sustento e desenvolvimento profissional [31].

Para melhor compreensão das principais tecnologias disponíveis no mercado fotovoltaico, apresenta-se a 3.1, que resume as características técnicas, vantagens, limitações e custos relativos das tecnologias PERC, HJT e TOPCon, amplamente discutidas no mercado atual.

3.5 Aspectos Socioambientais

A implementação da energia solar nos dias atuais pode ser considerada, de forma gradual, uma fonte de energia cada vez mais presente no cotidiano das famílias, devido aos benefícios que oferece aos seus geradores. Além disso, é vista como uma fonte extremamente sustentável e limpa, especialmente quando comparada a outras fontes, como as hidrelétricas, que muitas vezes exigem o desmatamento para a construção de barragens, ou as fontes derivadas de combustíveis fósseis, que emitem gases de efeito estufa (GEE) durante sua operação. Nesse contexto, a instalação de painéis fotovoltaicos em residências contribui para a redução dessas emissões, ajudando na luta contra as mudanças climáticas, conforme exemplificado pelo Acordo de Paris, que incentiva a redução das emissões de dióxido de carbono para limitar o aumento da temperatura global [32].

No entanto, é importante considerar que, embora as placas solares não emitam gases poluentes e sejam uma matriz energética renovável, existem formas de causar impactos ambientais, especialmente no processo de fabricação das placas e no ambiente onde elas são instaladas. O processo de fabricação das placas solares envolve a extração de matérias-primas como silício e o alumínio, cujas extrações podem gerar sérios impactos ambientais [33].

O silício é o principal componente das células solares e é extraído da areia e do quartzo. Embora o silício em si não seja particularmente poluente, o processo de purificação que o torna adequado para a fabricação de células fotovoltaicas exige altas temperaturas e grandes quantidades de energia. Esse processo pode gerar emissões de gases de efeito estufa (GEE) e outros poluentes. Além disso, a extração de areia e quartzo pode levar à degradação do solo e destruição de habitats naturais, com impactos negativos para a biodiversidade e os ecossistemas locais [34].

O alumínio é o utilizado nas estruturas dos painéis solares e é extraído principalmente da bauxita. O processo de mineração da bauxita pode ocasionar desmatamento, erosão do solo e contaminação dos lençóis freáticos, impactando córregos e poços artesianos. Isso pode elevar o teor de sódio nas águas e liberar resíduos altamente alcalinos, como o lodo vermelho. Quando não tratado adequadamente, o lodo vermelho pode afetar gravemente os ecossistemas aquáticos. Além disso, o processo de refinação da bauxita para extrair o alumínio é intensivo em energia, o que contribui para as emissões de CO₂ e agrava o aquecimento global [35].

Durante a produção dos painéis solares, os trabalhadores que manuseiam esses materiais podem ser expostos a substâncias tóxicas, como metais pesados, que representam riscos à saúde humana. Além disso, não apenas os seres humanos, mas também o meio ambiente, podem ser afetados por essa contaminação. A liberação inadequada de substâncias tóxicas pode causar a eutrofização de corpos hídricos e acidificação do solo, prejudicando plantas e outros organismos que dependem desses ecossistemas para sobreviver [36].

Outro ponto relevante sobre a implementação do sistema fotovoltaico é a instalação em larga escala dos sistemas, especialmente quando são instalados no solo. Embora a energia solar não seja uma fonte de energia poluente, a necessidade de grandes áreas de terra para a instalação de usinas fotovoltaicas pode gerar impactos ambientais na região onde essas usinas são localizadas. A instalação de usinas solares em grandes áreas de terra pode levar à alteração do ecossistema local, afetando a fauna e flora da região [37].

Uma alternativa que pode ser muito bem explorada é a instalação dos sistemas fotovoltaicos nos telhados das residências. Isso evita a exploração de novas áreas de

terra, utilizando estruturas já existentes, como os telhados de residências ou edifícios, para a geração de energia solar. Essa prática diminui os impactos sobre o uso do solo e preserva ecossistemas, além de proporcionar uma maneira mais eficiente de aproveitar a energia solar em áreas urbanas [38].

Capítulo 4

Análise do Cenário Atual da Geração Fotovoltaica

4.1 Exemplos de Países que Integraram Energias Renováveis

A integração de fontes renováveis tem se intensificado em diversos países ao redor do mundo, apresentando um crescimento significativo nos últimos anos. O aumento no número de projetos solares é impulsionado pela maior eficiência das tecnologias e pela drástica queda nos preços das placas solares, fatores que têm atraído a atenção da população para esse tipo de investimento. Além disso, os incentivos fiscais governamentais têm sido fundamentais para fortalecer a matriz energética e reduzir os impactos ambientais, como a emissão de CO₂ [39].

A energia solar se destaca como uma fonte renovável inesgotável, disponível em qualquer região do planeta. Mesmo países situados em áreas com menor incidência de radiação solar, como as regiões do norte, podem se beneficiar dessa matriz energética. A constante evolução das tecnologias das placas solares tem permitido a geração de energia de forma eficiente, mesmo em locais com menor radiação solar [39].

Com o avanço da transição energética global, muitos países têm investido na diversificação de suas matrizes elétricas, priorizando fontes renováveis como a energia solar. Esse movimento busca reduzir a dependência de combustíveis fósseis, minimizar

impactos ambientais e garantir um desenvolvimento mais sustentável a longo prazo [40].

A Índia, que ocupa uma posição de destaque como um dos maiores consumidores de energia do mundo, tem apostado fortemente na energia solar para atender à crescente demanda elétrica de sua população e indústria. Como parte desse esforço, o país abriga o *Bhadla Solar Park*, a maior usina solar do planeta [41].

Localizado na cidade de Bhadla, no estado do Rajastão, no oeste da Índia, o complexo ocupa uma impressionante área de 56 km², onde estão instalados cerca de 10 milhões de painéis solares fotovoltaicos. Com uma capacidade instalada de 2.245 MW, o parque tem potencial para abastecer milhões de residências e indústrias, desempenhando um papel crucial na estratégia de transição energética do país [40].

O projeto teve início em 2015 e foi desenvolvido em quatro fases, sendo concluído em 2020. Ele é resultado de uma joint venture entre o governo do Rajastão e o Ministério de Energia Nova e Renovável (MNRE) da Índia. Essa parceria garantiu que a usina fosse planejada e executada com eficiência, transformando uma área árida e inóspita em um dos maiores polos de geração de energia limpa do mundo. Com sua vasta infraestrutura, o Bhadla Solar Park tem capacidade para abastecer mais de uma cidade inteira, reduzindo a necessidade de energia proveniente de fontes poluentes [40].

Além de sua grande escala, a escolha estratégica da região para a construção da usina foi determinante. O Rajastão é conhecido por seu clima árido e alta incidência solar, com temperaturas que frequentemente ultrapassam 46°C a 48°C. Essas condições favorecem a eficiência dos painéis solares, garantindo um alto aproveitamento da luz solar para a geração de energia [40].

Contudo, a região impõe desafios técnicos, como as frequentes tempestades de areia e poeira, que podem cobrir os painéis e reduzir sua eficiência. Para mitigar esse problema, foram implementadas tecnologias avançadas de limpeza automatizada, incluindo robôs autônomos que removem a poeira sem a necessidade de grandes volumes de água, tornando o processo mais sustentável e eficiente [40].

O impacto do *Bhadla Solar Park* vai além da geração de eletricidade. O projeto contribui significativamente para a meta da Índia de atingir 500 GW de capacidade

instalada em fontes renováveis até 2030, consolidando o país como um dos líderes globais na transição energética. Além disso, a usina evita a emissão de cerca de 4 milhões de toneladas de CO₂ por ano, auxiliando nos esforços internacionais para conter as mudanças climáticas [40].

É relevante também mencionar o *ParkPavagada Solar Park*, o terceiro maior parque solar do mundo, localizado no distrito de Karnataka. O projeto ocupa uma vasta área de 13 mil hectares e possui uma capacidade instalada de 2,05 GW. Esse empreendimento reforça ainda mais a posição da Índia como uma potência em energia solar, ampliando sua capacidade de geração renovável e reduzindo a dependência de fontes fósseis [40].

Contudo, apesar dos avanços na implantação de usinas solares de grande porte, a Índia ainda enfrenta desafios estruturais significativos. O país possui infraestruturas básicas deficitárias, o que impacta a distribuição eficiente de energia elétrica. Muitas regiões ainda sofrem com fornecimento irregular de eletricidade, dificultando o acesso da população a uma rede confiável. Esse cenário evidencia a necessidade de investimentos não apenas na geração de energia, mas também na modernização e expansão das redes de transmissão e distribuição, garantindo que os benefícios da transição energética alcancem toda a população [40].

Com iniciativas como o *Bhadla Solar* e o *ParkPavagada Solar Park*, a Índia demonstra seu compromisso com a energia limpa. No entanto, para que a transição energética seja plenamente bem-sucedida, o país ainda precisa superar desafios estruturais e ampliar o acesso à eletricidade para todas as suas regiões, consolidando-se como uma referência global em sustentabilidade e inovação no setor energético [40].

Um novo marco para a energia solar na Índia é o Parque Fotovoltaico de Khavda, atualmente em construção, que está projetado para se tornar a maior usina elétrica do mundo, independentemente da fonte de energia utilizada. Desenvolvido pela *Adani Green Energy Limited*, o complexo solar terá uma capacidade instalada de 30 GW, com previsão de conclusão nos próximos cinco anos [11].

Localizado na região desértica do estado de Gujarat, o projeto já conta com 1 GW de capacidade em operação desde março, após a instalação de 2,4 milhões de painéis solares. O andamento da obra está em conformidade com o cronograma estabelecido

para a conclusão total do projeto. Quando finalizado, o parque ocupará uma área de 538 km², superando a extensão de diversas capitais brasileiras, como Porto Alegre (RS), Belo Horizonte (MG) e Recife (PE) [42].

Além da instalação dos painéis solares, o projeto prevê o desenvolvimento de uma infraestrutura significativa, incluindo 100 km de estradas, 50 km de drenagem, 180 km de fibra ótica e a construção de três plantas de osmose reversa, com capacidade para produzir 70 metros cúbicos de água por hora. Essas infraestruturas são essenciais para o suporte logístico e operacional do parque, especialmente para atender aos operários envolvidos na construção [42].

Atualmente, a maior usina elétrica do mundo é a hidrelétrica de Três Gargantas, localizada na China, com uma capacidade instalada de 22,5 GW. Com a conclusão do Parque Fotovoltaico de Khavda, a Índia dará um passo significativo na liderança da geração de energia renovável, superando a capacidade de usinas hidrelétricas e estabelecendo novos marcos na produção de energia solar globalmente [11].

Este projeto não só contribuirá para as ambiciosas metas de sustentabilidade da Índia, mas também representa um avanço significativo na utilização de energia limpa em grande escala, com o potencial de impactar positivamente a matriz energética mundial [11].

4.2 Análise de Projetos Locais

O objetivo deste tópico é analisar projetos que promovem a integração da matriz energética nas redes elétricas, com foco no estado de Goiás. A análise também abrange exemplos de implementação no Brasil, buscando compreender as melhores práticas adotadas globalmente. A transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável é crucial para o Goiás, considerando os impactos socioeconômicos e ambientais dessa transformação. O estudo se concentra em tecnologias emergentes, políticas públicas eficazes e os desafios enfrentados em diferentes contextos, oferecendo um panorama sobre como o estado pode avançar na construção de um futuro energético mais sustentável.

O Brasil possui um potencial significativo para gerar energia a partir de fontes renováveis, especialmente a energia solar, o que o coloca em vantagem em relação a países com matrizes energéticas menos diversificadas. No entanto, o país enfrenta desafios tecnológicos, dependendo da importação de equipamentos e soluções de outros países [43]. Um exemplo claro dessa dependência é a relação com a China, principal fornecedor de painéis solares para o Brasil. Em 2024, o país importou 22 GW de painéis solares chineses, um aumento de 9% em relação ao ano anterior [44]. Enquanto isso, nações que investem em inovação e no aprimoramento de suas tecnologias, como Alemanha e Japão, têm alcançado altos índices de sucesso na produção de energia solar renovável, com eficiências médias de painéis superiores a 22% [45].

Além da dependência tecnológica, o Brasil enfrenta desafios técnicos relacionados à integração da energia solar na rede elétrica. A intermitência da geração solar, que varia conforme as condições climáticas, exige soluções como sistemas de armazenamento de energia (por exemplo, baterias de íon-lítio) e *Smart Grids*, que permitem equilibrar oferta e demanda de forma mais eficiente. Essas tecnologias são essenciais para garantir a estabilidade da rede e maximizar o aproveitamento da energia solar [46].

Apesar da alta incidência solar no Brasil, a geração de energia solar ainda não atingiu níveis comparáveis a outras fontes energéticas, como a hidrelétrica. Contudo, a expansão dessa fonte é exponencial, impulsionada principalmente por iniciativas privadas que oferecem linhas de crédito especiais para financiar projetos e equipamentos necessários [43]. Entre os incentivos privados e estatais, destacam-se:

- Lei nº 14.300/2022: Lançado pelo Governo Federal, o programa visa promover uma matriz energética mais limpa e sustentável, fortalecendo a segurança energética do país e ajudando a enfrentar crises climáticas.
- Caixa Econômica Federal: Desde 2015, a instituição incentiva o uso de energia solar por meio do projeto "Energias Renováveis", oferecendo apoio financeiro para a instalação de sistemas solares.
- Isenção de PIS/COFINS: A Lei Nº 13.169/2015 reduziu a zero as alíquotas do PIS/Pasep e da COFINS sobre a energia elétrica fornecida pelas distribuidoras,

eliminando impostos sobre o excedente de energia gerado.

- Isenção de ICMS: Autorizada pelo CONFAZ em 2015, a isenção do ICMS sobre a energia injetada na rede de distribuição está ligada ao Sistema de Compensação de Energia Elétrica, regulamentado pela ANEEL [43].

Essas iniciativas, tanto privadas quanto federais, têm incentivado a produção de energia limpa e promovido uma matriz energética sustentável, fortalecendo as fontes renováveis no Brasil.

Um exemplo emblemático de avanço no setor é o Complexo Solar Janaúba, inaugurado em março de 2025. Localizado no Norte de Minas Gerais, o complexo representa um marco para as energias renováveis no Brasil, com um investimento de R\$4 bilhões e capacidade de geração de 1,2 GWp (gigawatts-pico), suficiente para abastecer mais de 1 milhão de residências. Com 20 parques solares distribuídos em 3 mil hectares, o complexo utiliza 2,2 milhões de módulos fotovoltaicos, otimizando a radiação solar da região [47]. Os painéis solares utilizados no complexo têm uma eficiência média de 20%, superior à média global de 18%, graças à adoção de tecnologias de ponta, como módulos bifaciais, que captam luz solar em ambas as faces [45]. Além disso, o projeto inclui um sistema de armazenamento com baterias de íon-lítio, com capacidade de 200 MWh, garantindo estabilidade na geração mesmo durante períodos de baixa irradiação solar [46].

A escolha de Janaúba deve-se aos altos índices de irradiação solar e à baixa nebulosidade, fatores que tornam a região ideal para a geração de energia solar. Operado pela Elera Renováveis, o complexo é atualmente a maior usina solar em operação no país, contribuindo significativamente para a descarbonização dos clientes da empresa [47]. Além dos benefícios energéticos, o empreendimento gerou impactos socioeconômicos positivos, criando 11 mil empregos diretos e indiretos, com 70% das vagas ocupadas por trabalhadores locais. A Elera também investiu em programas de capacitação, destacando-se pela inclusão feminina no setor, com 75% das participantes do curso de Instalação de Sistemas Fotovoltaicos sendo mulheres [47].

O complexo ainda se destaca por suas iniciativas de responsabilidade social e ambiental, com investimentos superiores a R\$10 milhões em projetos comunitários e de preservação ambiental, como a reforma de praças, instalação de dessalinizadores

e programas de capacitação financeira (DIARIO, 2023). A Elera Renováveis também está implementando um projeto de instalação de placas solares no Hospital Regional de Janaúba, visando reduzir custos com energia elétrica [47].

No estado de Goiás, a energia solar também avança rapidamente. O estado está entre os dez maiores em potência instalada, com mais de 138 mil microgeradores e capacidade total de 1,7 GW, segundo a ABSOLAR (2025). O crescimento foi impulsionado por medidas como a suspensão da cobrança do ICMS sobre a produção de energia solar, determinada pelo Tribunal de Justiça de Goiás (TJGO), e a aprovação do Projeto de Lei nº 624/2020, que criou o Programa Renda Básica Energética (REBE) para incentivar a geração distribuída [48]. Um estudo recente estima que a expansão da energia solar em Goiás pode reduzir as tarifas de energia em até 15% até 2030, beneficiando tanto consumidores residenciais quanto industriais [1]. Além disso, a integração de sistemas de armazenamento em baterias e a adoção de *Smart Grids* estão sendo planejadas para garantir a estabilidade do sistema elétrico, especialmente em regiões com alta penetração de geração distribuída [49].

Um projeto relevante em Goiás é a construção da Usina Solar de Barro Alto, anunciada pela Newave Energia. Com investimento de R\$1,3 bilhão, a usina terá capacidade de 452 MWp (megawatts-pico), suficiente para abastecer uma cidade com 365 mil habitantes. O projeto gerará mais de 1.500 empregos e aumentará em 22% a capacidade de geração de energia solar no estado, consolidando a fotovoltaica como a segunda principal fonte energética de Goiás [50]. Parte da energia gerada será destinada às unidades da Gerdau, alinhando-se à estratégia de descarbonização da empresa, que já possui uma das menores médias globais de emissões de gases de efeito estufa no setor siderúrgico [50].

A usina também comercializará energia no mercado livre, permitindo que consumidores escolham fornecedores com base em fontes renováveis. Com previsão de operação total em 2026, o empreendimento reforça o papel das energias renováveis na busca pela sustentabilidade e descarbonização, impactando positivamente a economia local e nacional [50]. Além disso, a usina de Barro Alto pode servir como um modelo para a integração de energia solar com outras fontes renováveis, como o hidrogênio verde, que tem ganhado destaque como uma solução para armazenamento de energia

em larga escala. Essa integração pode fortalecer ainda mais a matriz energética de Goiás, tornando o estado um líder nacional em energia limpa, pois o Brasil tem se destacado globalmente no crescimento de energias renováveis, atingindo recordes de capacidade instalada e demonstrando a sinergia entre fontes como a hidrelétrica e a solar [51].

Em síntese, tanto o Complexo Solar Janaúba quanto a Usina de Barro Alto exemplificam como investimentos em energia solar podem transformar a matriz energética brasileira, gerando impactos socioeconômicos positivos e contribuindo para um futuro mais sustentável. Goiás, com seu potencial solar e políticas de incentivo, está bem posicionado para liderar essa transição no país. No entanto, para consolidar essa liderança, é essencial que o estado invista em infraestrutura de rede, tecnologias de armazenamento e inovação, garantindo que a expansão da energia solar seja acompanhada por um sistema elétrico robusto e resiliente [49].

4.3 Geração Distribuída no Estado de Goiás

Apesar do crescimento acelerado da energia solar no estado de Goiás, esse avanço tem gerado desafios técnicos nas redes elétricas locais. Dados da [48] apontam que Goiás conta atualmente com 1,7 GW de potência instalada em sistemas de geração distribuída fotovoltaica, distribuída em mais de 138 mil unidades consumidoras. Isso posiciona o estado entre os dez maiores do país em capacidade instalada de geração solar.

O aumento expressivo de conexões de geração fotovoltaica tem provocado impactos técnicos significativos, sobretudo em áreas urbanas e rurais com alta densidade de sistemas fotovoltaicos. Segundo relatórios da [52]), têm sido observadas as seguintes ocorrências:

- Variações de tensão superiores a 5% em horários de pico de geração, especialmente em alimentadores de média tensão em regiões metropolitanas como Goiânia e Aparecida de Goiânia;
- Elevação dos índices de distorção harmônica (THD), chegando a valores próximos

a 6%, acima dos limites recomendados pela norma [23] para redes de baixa tensão;

- Fluxo reverso em horários de baixa demanda, exigindo intervenções técnicas para evitar sobrecarga em equipamentos de subestações e transformadores;
- Necessidade crescente de investimentos em sistemas de proteção, comunicação e controle, como parte do processo de modernização das redes (*Smart Grids*).

Essas condições evidenciam que, embora o potencial solar do estado seja elevado, a integração da geração distribuída precisa ser acompanhada por estudos detalhados de fluxo de potência, avaliação de distorções harmônicas e planejamento de expansão da infraestrutura elétrica.

Além disso, o crescimento da geração fotovoltaica em Goiás tem provocado questionamentos sobre os custos associados à manutenção da qualidade da energia e à necessidade de modernização da rede. Estudos da [49] indicam que a implementação de soluções como sistemas de armazenamento, controle de tensão e investimento em tecnologias de monitoramento dinâmico da rede são fundamentais para garantir a segurança e a estabilidade do sistema elétrico goiano.

A expansão da geração distribuída fotovoltaica no Brasil tem se mostrado expressiva, porém com significativa concentração em determinados estados. A 4.1 apresenta um comparativo da potência instalada em sistemas fotovoltaicos por estado no ano de 2025, evidenciando as disparidades regionais no desenvolvimento da energia solar. Observa-se que Minas Gerais se mantém como o estado com maior capacidade instalada, impulsionado por políticas de incentivo, ampla disponibilidade de terrenos e altos índices de radiação solar. Em contraste, Goiás, embora apresente elevado potencial solar, ainda registra crescimento mais modesto, indicando oportunidades para investimentos e expansão da geração distribuída. Esse panorama reforça a importância de políticas públicas regionais e de estratégias de diversificação da matriz energética, a fim de estimular o desenvolvimento do setor fotovoltaico em estados com grande potencial técnico ainda não explorado.

Dessa forma, apesar de os indicadores econômicos e ambientais serem bastante favoráveis, a sustentabilidade técnica do crescimento da energia solar em Goiás de-

pendará do alinhamento entre políticas públicas, investimentos em infraestrutura e tecnologias avançadas que permitam o pleno aproveitamento da geração distribuída sem comprometer a qualidade e a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica.

Tabela 4.1: Comparativo de Potência Instalada em Geração Fotovoltaica por Estado (2025)

Estado	Potência (MW)	Nº de Unidades	Participação Nacional (%)
Minas Gerais	3.420	210.500	15,2%
São Paulo	2.750	185.300	12,2%
Rio Grande do Sul	1.950	160.000	8,7%
Goiás	1.700	138.000	7,4%
Bahia	1.200	97.400	5,1%
Paraná	1.050	85.600	4,8%

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados da [48].

Capítulo 5

Tecnologias e Soluções para Integração

5.1 *Smart Grids* (Redes Inteligentes)

A crescente demanda por energia limpa e sustentável tem impulsionado a adoção de fontes renováveis, como solar e eólica, em sistemas elétricos em escala global. Entretanto, a intermitência dessas fontes representa um desafio significativo para a estabilidade e eficiência das redes elétricas tradicionais. Nesse contexto, as Redes Elétricas Inteligentes, surgem como uma solução tecnológica essencial para a integração dessas fontes, permitindo um gerenciamento mais eficaz da geração e distribuição de energia [53].

As *Smart Grids* utilizam tecnologias digitais avançadas, como sensores, medidores inteligentes e sistemas de automação, para monitorar, controlar e otimizar o fluxo de energia em tempo real. Além de melhorar a eficiência e confiabilidade do sistema, essas redes possibilitam a integração de pequenos geradores distribuídos, como painéis solares residenciais, e promovem a participação ativa dos consumidores no mercado de energia [54].

As Redes Elétricas Inteligentes representam uma evolução significativa em relação aos sistemas elétricos convencionais. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica [53], uma rede inteligente é um sistema que emprega tecnologias de informação

e comunicação para integrar eficientemente todos os usuários conectados ao sistema de energia elétrica, considerando seus comportamentos e ações. Essa integração permite o monitoramento em tempo real, a automação de processos e a otimização do fluxo de energia.

O monitoramento contínuo do sistema elétrico é um dos pilares das *Smart Grids*. Sensores e medidores inteligentes coletam dados detalhados sobre geração, consumo e condições da rede, permitindo uma visão abrangente do sistema. Essas informações são essenciais para a tomada de decisões rápidas e precisas, especialmente em situações de falhas ou picos de demanda [55].

A automação é um componente crítico das *Smart Grids*, pois reduz a necessidade de intervenção humana. Dessa forma, a rede pode ajustar automaticamente o fluxo de energia em caso de falhas ou variações na demanda. Por exemplo, em situações de sobrecarga, a rede pode redirecionar a energia para áreas com menor demanda, evitando interrupções [21].

As *Smart Grids* facilitam a conexão de pequenos geradores, como painéis solares residenciais e turbinas eólicas, à rede principal. Isso possibilita que consumidores também atuem como produtores de energia, os chamados prosumers, contribuindo para a estabilidade do sistema e reduzindo a dependência de grandes usinas de geração centralizada [56].

A intermitência das fontes renováveis, como solar e eólica, representa um desafio para a estabilidade da rede. As *Smart Grids* utilizam tecnologias avançadas para gerenciar essa variabilidade de maneira eficiente. Algoritmos de previsão baseados em dados meteorológicos permitem estimar a geração de energia solar e eólica. Com essas informações, a rede pode ajustar a oferta de energia para compensar flutuações, garantindo que a demanda seja atendida de forma eficiente [57].

As *Smart Grids* incentivam os consumidores a ajustar seu consumo em períodos de alta geração renovável ou escassez. Por exemplo, tarifas dinâmicas podem reduzir o custo da energia durante períodos de alta geração solar, incentivando o consumo nesses horários [58].

Sistemas de armazenamento, como baterias, são integrados às *Smart Grids* para absorver o excesso de energia gerado e liberá-lo quando necessário, garantindo um

equilíbrio entre oferta e demanda [21].

A implementação de *Smart Grids* oferece diversos benefícios para consumidores e operadores do sistema: eficiência energética, com redução de perdas na transmissão e distribuição de energia [53]; restauração rápida do serviço em caso de falhas, minimizando impactos para os consumidores [54]; e sustentabilidade, com maior integração de fontes renováveis e redução das emissões de gases de efeito estufa.

As *Smart Grids* desempenham um papel fundamental na modernização do setor elétrico, permitindo a ampliação da utilização de fontes renováveis e garantindo maior segurança e eficiência no fornecimento de energia. Os avanços tecnológicos continuam a impulsionar sua adoção, tornando-as uma solução essencial para o futuro da energia sustentável.

5.2 Armazenamento de Energia

O armazenamento de energia é um elemento essencial para a estabilidade e eficiência dos sistemas elétricos modernos, especialmente diante do aumento da integração de fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica. A capacidade de armazenar energia permite equilibrar a oferta e a demanda, garantindo que a rede opere de forma estável e confiável, mesmo diante das variações na geração e no consumo. O desenvolvimento de diferentes tecnologias de armazenamento desempenha um papel crucial na mitigação dos desafios impostos pela intermitência dessas fontes [59].

Entre as principais tecnologias de armazenamento, destacam-se as baterias, amplamente utilizadas devido à sua eficiência e flexibilidade. As baterias de íon-lítio são as mais comuns, empregadas tanto em sistemas residenciais quanto em aplicações de grande escala, devido à sua alta densidade energética e longa vida útil [56]. Outra alternativa são as baterias de fluxo, que utilizam eletrólitos líquidos armazenados em tanques externos, sendo indicadas para aplicações de longa duração e armazenamento em grande escala [21]. Já as baterias de sódio-enxofre apresentam boa eficiência e custos competitivos, mas requerem operação em altas temperaturas, o que pode limitar sua aplicação [54].

O armazenamento em grande escala também desempenha um papel fundamental na estabilização da rede elétrica. As hidrelétricas reversíveis, conhecidas como pumped hydro, são uma das formas mais maduras e utilizadas para armazenar energia em larga escala. Esse sistema bombeia água para um reservatório elevado durante períodos de baixa demanda e libera a água para geração de energia nos momentos de maior consumo, proporcionando estabilidade ao sistema [53]. Outra alternativa é o armazenamento térmico, amplamente empregado em usinas solares térmicas, onde o calor armazenado pode ser convertido em eletricidade sob demanda [21].

Tecnologias emergentes vêm sendo estudadas para aprimorar ainda mais a eficiência do armazenamento de energia. Os supercapacitores, por exemplo, permitem ciclos de carga e descarga extremamente rápidos, sendo úteis para aplicações que exigem respostas instantâneas, como a estabilização da frequência da rede [57]. O armazenamento por ar comprimido, ou CAES (*Compressed Air Energy Storage*), também se destaca como uma alternativa viável, consistindo na compressão de ar em cavernas subterrâneas para posterior liberação e conversão em eletricidade, sendo uma solução de baixo custo para armazenamento em grande escala [54].

O armazenamento de energia traz inúmeros benefícios para o sistema elétrico, especialmente na compensação da intermitência das fontes renováveis. Como a geração de energia solar depende das condições climáticas, o armazenamento permite captar o excedente gerado em momentos de alta produção e disponibilizá-lo quando necessário, garantindo um fornecimento contínuo de energia [21]. Além disso, auxilia no balanceamento de carga, reduzindo a necessidade de acionamento de usinas movidas a combustíveis fósseis nos momentos de pico de demanda, o que contribui para a redução de custos e emissões de gases de efeito estufa (Santos, 2018). A estabilização da frequência e tensão da rede também é um benefício importante, pois evita oscilações que possam comprometer a qualidade da energia fornecida [57].

Outro aspecto relevante é a redução dos custos operacionais. O armazenamento de energia possibilita maior eficiência na gestão da infraestrutura elétrica, armazenando eletricidade em momentos de menor demanda e liberando-a quando os preços estão mais altos, o que reduz investimentos em geração e transmissão [53]. Além disso, facilita a integração de microrredes, que podem operar de forma independente do

sistema elétrico convencional, garantindo fornecimento contínuo mesmo em situações de falha na rede principal [54].

Apesar dos benefícios, ainda há desafios a serem superados para a implementação em larga escala dos sistemas de armazenamento de energia. O custo elevado das tecnologias, embora tenha diminuído nos últimos anos, ainda representa uma barreira significativa, especialmente para aplicações de grande porte [21]. Além disso, a ausência de regulamentações específicas pode dificultar a adoção e a integração dessas tecnologias no mercado elétrico [53]. Questões ambientais também devem ser consideradas, como os impactos associados à extração de matérias-primas utilizadas na fabricação de baterias, o que reforça a necessidade de pesquisas voltadas para soluções mais sustentáveis [56].

O futuro do armazenamento de energia é promissor, impulsionado por avanços tecnológicos e políticas públicas voltadas para a transição energética. A combinação de diferentes tecnologias de armazenamento pode oferecer soluções mais eficientes e acessíveis, permitindo a construção de um sistema elétrico mais resiliente e sustentável. Dessa forma, o armazenamento de energia se consolida como um pilar fundamental para a evolução das redes elétricas modernas e para a garantia de um suprimento energético seguro e de qualidade.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Conclusões Gerais

O estudo desenvolvido demonstrou que a integração da geração distribuída fotovoltaica às redes elétricas convencionais é uma tendência no contexto da transição energética brasileira, especialmente no estado de Goiás, onde o potencial de irradiação solar é elevado. Ao longo deste trabalho, foi possível identificar que, embora a GDFV proporcione benefícios claros, como a redução das emissões de gases de efeito estufa, a diversificação da matriz elétrica e a melhoria nos níveis de tensão, sua inserção também traz desafios técnicos relevantes, principalmente relacionados à intermitência da geração e ao impacto na qualidade da energia.

A análise teórica, fundamentada em dados de órgãos como ANEEL, ONS e ABSOLAR, evidenciou que o crescimento acelerado da capacidade instalada de energia solar exige investimentos em modernização da infraestrutura de transmissão e distribuição, bem como a adoção de tecnologias emergentes, como *Smart Grids* e sistemas de armazenamento. Também ficou claro que políticas públicas, incentivos fiscais, e regulamentações como a Lei 14.300/2022 desempenham papel decisivo para a expansão ordenada da GDFV, equilibrando o estímulo ao consumidor-produtor com a sustentabilidade econômica das distribuidoras.

No âmbito socioeconômico, verificou-se que a expansão da energia fotovoltaica gera oportunidades significativas de emprego e fomenta a cadeia produtiva do setor elétrico,

enquanto no aspecto ambiental, mesmo sendo uma fonte limpa, deve-se atentar aos impactos do ciclo de vida dos módulos, desde a extração de matérias-primas até a destinação final.

A simulação realizada no MATLAB/Simulink, utilizada como alternativa experimental diante da impossibilidade de implementação física, permitiu analisar com precisão o comportamento dinâmico de um sistema fotovoltaico conectado à rede por meio de conversor boost e inversor trifásico, com controle MPPT e filtragem harmônica via filtro LCL. Os resultados obtidos comprovaram a eficácia do controle na manutenção da tensão do barramento CC, a baixa distorção harmônica total ($THD < 5\%$) e o sincronismo adequado com a rede, validando a viabilidade técnica da integração proposta.

Assim, conclui-se que a expansão da geração distribuída fotovoltaica no Brasil, e em Goiás, depende de uma abordagem sistêmica que una avanços tecnológicos, regulação adaptativa, planejamento de infraestrutura e conscientização social. Trabalhos futuros podem ampliar este estudo com análises experimentais em campo, inclusão de diferentes topologias de conversores, integração com sistemas de armazenamento e avaliação em cenários de alta penetração de renováveis, contribuindo para um sistema elétrico mais limpo, eficiente e resiliente.

Referências Bibliográficas

- [1] Empresa de Pesquisa Energética (EPE). *Balanço Energético Nacional 2023: Ano base 2022*. 2023. Acesso em: 02 de Janeiro de 2025. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt>>.
- [2] NASCIMENTO, R. S. d.; ALVES, G. M. Fontes alternativas e renováveis de energia no brasil: métodos e benefícios ambientais. In: *XX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VI Encontro de Iniciação à Docência*. [S.l.: s.n.], 2016. Anais.
- [3] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). *Expansão da matriz elétrica ultrapassou os 7 GW em 2024*. Acesso em: [inserir data de acesso]. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/expansao-da-matriz-eletrica-ultrapassou-os-7-gw-em-2024>>.
- [4] Agência Gov. *Matriz elétrica teve aumento de 10,9 GW em 2024, maior expansão da série histórica*. Acesso em: [inserir data de acesso]. Disponível em: <<https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202501/matriz-eletrica-teve-aumento-de-10-9-gw-em-2024-maior-expansao-da-serie-historica>>.
- [5] Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). *Estudo da CCEE aponta crescimento de 6,8% no consumo de energia brasileiro no primeiro semestre de 2024*. Acesso em: [inserir data de acesso]. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/-/estudo-da-ccee-aponta-crescimento-de-6-8-no-consumo-de-energia-brasileiro-no-primeiro-semester-de-2024>>.
- [6] PITOMBO, S. O. *Influência dos fenômenos climáticos El Niño e La Niña na geração de energia fotovoltaica*. Tese (Doutorado) — Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2019. Tese de Doutorado.

- [7] Agência nacional de Energia Elétrica (ANEEL). *Matriz elétrica brasileira alcança 200 GW*. 2024. Acesso em: 01 de Janeiro de 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/matriz-eletrica-brasileira-alcanca-200-gw>>.
- [8] FURNAS. *Usina de Serra da Mesa*. Acesso em: 01 de Janeiro de 2025. Disponível em: <<https://www.furnas.com.br/subsecao/129/usina-de-serra-da-mesa?culture=pt>>.
- [9] Ministério de Minas e Energia (MME). *Fontes renováveis responderam por 93,1% da geração de energia elétrica em 2023*. 2023. Acesso em: 01 de Janeiro de 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/fontes-renovaveis-responderam-por-93-1-da-geracao-de-energia-eletrica-em-2023>>.
- [10] SOBHANAYAK, S. K.; MOHANTY, S. K. et al. Predicting short term energy demand in smart grid: A deep learning approach for integrating renewable energy sources in line with sdgs. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Elsevier, v. 28, p. 100534, 2021.
- [11] Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR). *O ano da energia solar no Brasil*. 2024. Acesso em: 01 de Janeiro de 2025. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticia/https-www-modaisemfoco-com-br-noticias-2024-o-ano-da-energia-solar-no-brasil/>>.
- [12] Ministério de Minas e Energia (MME). *Energia renovável chega a quase 50% da matriz elétrica brasileira*. 2021. Acesso em: 04 de Janeiro de 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/08/energia-renovavel-chega-a-quase-50-da-matriz-eletrica-brasileira-1>>.
- [13] Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO). *Alexandre Edmond Becquerel (1820-1891): O criador da célula solar*. 2021. Acesso em: 04 de Janeiro de 2025. Disponível em: <<https://www3.unicentro.br/petfisica/2021/12/17/alexandre-edmond-becquerel-1820-1891-o-criador-da-celula-solar/>>.
- [14] CAF – Banco de Desenvolvimento da América Latina. *Integração de energias renováveis na América Latina e no Caribe: desafios e oportunidades*. 2017.

- [15] SOUZA, N. G. et al. As principais dificuldades enfrentadas pelo operador nacional de energia (ons), com o surgimento de novas fontes de energia no brasil. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 10, n. 11, p. 3478–3494, 2024.
- [16] BRAUN-GRABOLLE, P. et al. A integração de sistemas solares fotovoltaicos em larga escala no sistema elétrico de distribuição urbana. 2012.
- [17] MORISON, K.; WANG, L.; KUNDUR, P. Power system security assessment. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 2, n. 5, p. 30–39, 2004.
- [18] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). *Ocorrência no SIN em 15 de agosto de 2023*. 2023. Acesso em: 18 de Janeiro de 2025. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/Ocorrência-no-SIN-em-15-de-agosto-de-2023.aspx>>.
- [19] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). *Energia no futuro: suprimento elétrico*. Acesso em: 18 de Janeiro de 2025. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/energia-no-futuro/suprimento-eletrico>>.
- [20] MOURA, F. A. M. et al. Geração distribuída: impactos e contribuições para a qualidade da energia elétrica e dinâmica dos sistemas elétricos – uma análise através do atp-empt. 2011.
- [21] Falcão, Djalma M. Smart grids e microrredes: o futuro já é presente. *Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos*, v. 8, 2009.
- [22] GÜLER, N. *Grid-connected PV with boost converter and inverter*. jun. 2021. YouTube: vídeo. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=VwWXxwuSnJU>. Acesso em: 13 ago. 2025.
- [23] IEEE Standards Association. *IEEE Std 519-2014 - Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [24] ESRAM, T.; CHAPMAN, P. L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, IEEE, v. 22, n. 2, p. 439–449, 2007.

- [25] FREITAS, M. G.; MIRANDA, A. d. A. R. Custo/benefício e implantação de sistema fotovoltaico. *Anais do VI Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão (CONPEEX)*, UNIRV, 2017. Disponível em: <<https://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/CustoBeneficio>>
- [26] CESAR, F. I. G. *O impacto econômico do uso da energia solar*.
- [27] COSTA, L. et al. Efeito de diferentes configurações de encapsulamento de células fotovoltaicas em mini módulos solares frente à degradação em calor úmido. *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS*, 2024.
- [28] Enel Green Power. *Painéis fotovoltaicos HJT*. Acesso em: 09 fev. 2025, 20:40. Disponível em: <<https://www.enelgreenpower.com/pt/quem-somos/inovacao/3SUN-factory/paineis-fotovoltaicos-hjt>>.
- [29] KONZEN, N. d. a. *O efeito de uma tarifa binômia no retorno financeiro da microgeração fotovoltaica*. 2016.
- [30] Brasil. *Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022*. 2022. Acesso em: 10 fev. 2024. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm>.
- [31] FILHO, W. P. B. et al. Expansão da energia solar fotovoltaica no brasil: impactos ambientais e políticas públicas. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 4, p. 628–642, 2015.
- [32] NOGUEIRA, L. P.; SILVA, V. R.; SAMPAIO, F. A. Impacto da geração fotovoltaica na matriz energética brasileira e a redução de emissões de gases de efeito estufa. *Revista Brasileira de Energia*, v. 26, n. 1, p. 45–60, 2020. Disponível em: <URL do artigo, se disponível>.
- [33] DIAS, R. C.; PEREIRA, P. C.; COSTA, B. A. Análise do ciclo de vida de módulos fotovoltaicos: Uma revisão sistemática dos impactos ambientais na fabricação. *Tecnologia em Revista*, v. 15, n. 2, p. 78–94, 2018. Disponível em: <URL do artigo, se disponível>.
- [34] YABUTA, Y. F. et al. *Impacto ambiental da fabricação de silício fotovoltaico*. 2016.

- [35] MACEDO, A. M. et al. *Impacto do alumínio no meio ambiente e na saúde*. 2016.
- [36] STRANDDORF, H.; HOFFMANN, L.; SCHMIDT, A. *Impact categories, normalization and weighting in LCA*. Copenhagen: FORCE Technology, 2005.
- [37] MACEDO, A. P.; SIQUEIRA, A. D.; SOUZA, L. M. O uso do solo em projetos de usinas fotovoltaicas e seus impactos sobre a biodiversidade local. *Revista de Engenharia Ambiental e Sustentabilidade*, v. 8, n. 3, p. 112–125, 2019. Disponível em: <URL do artigo, se disponível>.
- [38] SANTOS, M. H.; OLIVEIRA, J. B. Geração distribuída de energia solar no cenário urbano: Vantagens ambientais e econômicas. *Revista de Ciência e Tecnologia da Energia*, v. 12, n. 4, p. 201–215, 2021. Disponível em: <URL do artigo, se disponível>.
- [39] Portal Solar. *Top 7 países que mais usam energia solar*. 2016. Acesso em: 22 fev. 2024, 20:30. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/top-7-paises-que-mais-usam-energia-solar>>.
- [40] ENERGIA3S. *A maior usina solar do mundo! Bhadla Solar Park conta com 2.245 MW, 10 milhões de painéis solares e ocupa uma área de 5 mil hectares*. 2024. Disponível em: <<https://energia3s.com.br/a-maior-usina-solar-do-mundo-bhadla-solar-park-Conta-com-2-245-mw-10-milhoes-de-paineis-solares-e-ocupa-uma-area-de-5-mil-hectares/>>.
- [41] Centre for Financial Accountability. *Solar Power in India: A Case Study of the Bhadla Solar Power Park*. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://www.cenfa.org/solar-power-in-india-a-case-study-of-the-bhadla-solar-power-park>.
- [42] PV Magazine India. *Adani Green Energy commissions 1,000 MW of solar power at Khavda, Gujarat*. março 2024. Disponível em: <<https://www.pv-magazine-india.com/2024/03/12/adani-green-energy-commissions-1000-mw-of-solar-power-at-khavda-gujarat/>>.
- [43] OLIVEIRA, A. C. e. a. Energia solar: Utilização, desafios e potencialidades. *Nome da Revista*, Volume, n. Número, p. Páginas, 2022.

- [44] PORTAL SOLAR. *Brasil foi o país que mais importou placas solares chinesas no mundo em 2024*. 2024. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/internacional/brasil-foi-o-pais-que-mais-importou-placas-solares-chinesas-no-mundo-em-2024>>.
- [45] International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series – Solar Photovoltaics*. [S.l.], 2023. Disponível em: <www.irena.org>.
- [46] National Renewable Energy Laboratory (NREL). *Best Research-Cell Efficiency Chart*. 2023. Disponível em: <www.nrel.gov>.
- [47] Ministério de Minas e Energia (MME). *Maior usina de produção de energia solar do Brasil entra em operação no interior de Minas Gerais*. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/maior-usina-de-producao-de-energia-solar-do-brasil-entra-em-operacao-no-interior-de-minas-gerais>>.
- [48] Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. *Dados Estatísticos de Geração Distribuída por Estado*. 2025. Disponível em: <https://www.absolar.org.br>.
- [49] CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. *Impactos Técnicos da Geração Distribuída na Rede Elétrica Brasileira*. [S.l.], 2023. Relatório Técnico. Disponível em: <https://www.cepel.br>.
- [50] Newave Energia. *Newave Energia e Gerdau anunciam construção de nova usina de energia solar em Goiás*. 2023. Disponível em: <<https://newaveenergia.com.br/newave-energia-e-gerdau-anunciam-construcao-de-nova-usina-de-energia-solar-em-goias>>.
- [51] International Energy Agency (IEA). *Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/renewables-2023>>.
- [52] ENEL Distribuição Goiás. *Relatório Técnico sobre Impactos da Geração Distribuída Fotovoltaica*. 2024. Dados técnicos internos.
- [53] ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 8 (Qualidade da Energia Elétrica)*. 2013.

- [54] BELISÁRIO, Roberto. Brasil inova nas redes elétricas inteligentes. *Ciência e Cultura*, v. 63, n. 1, p. 6–8, 2011.
- [55] CHALA, M. N. C. *Modelagem de Consumidores para o Gerenciamento de Carga de Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado), 2015.
- [56] SANTOS, P. E. S.
Tarifa de distribuição para unidades consumidoras e microgeradores considerando a elasticidade-preço das cargas, 2008.
- [57] CUSTÓDIO, E. et al. Proposta de algoritmo para gerenciamento pelo lado da demanda em residências através do corte de smart plugs. In: *XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*. [S.l.: s.n.], 2013.
- [58] SIEBERT, L. e. a. Gerenciamento pelo lado da demanda em redes inteligentes utilizando algoritmos genéticos. In: *IV SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. [S.l.: s.n.], 2012.
- [59] MAZON, J.; GOMES, A. S. Sistemas de armazenamento de energia em baterias: uma revisão bibliográfica sobre aplicações, desafios e perspectivas para o sistema elétrico brasileiro. *Revista Brasileira de Energia Renovável*, v. 9, n. 4, p. 574–598, 2020. Disponível em: <<https://publicacoes.ufsc.br/index.php/rber/article/view/75960>>.