

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA**

**ARIEDER ADELMO ANSELMO**

**FATORES LIMITANTES PARA A EXPANSÃO DA POTÊNCIA DE GERAÇÃO  
FOTOVOLTAICA CONSIDERANDO OS IMPACTOS NA QUALIDADE DO  
FORNECIMENTO DE ENERGIA**

**MARINGÁ  
2025**

Arieder adeldo anselmo

**FATORES LIMITANTES PARA A EXPANSÃO DA POTÊNCIA DE GERAÇÃO  
FOTOVOLTAICA CONSIDERANDO OS IMPACTOS NA QUALIDADE DO  
FORNECIMENTO DE ENERGIA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia da Universidade Estadual de Maringá, na área de concentração Energias Renováveis, como requisito para a obtenção do grau de Mestre.

Orientadora: Dra. Camila de Brito Miranda Faia

MARINGÁ  
2025

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

A618f

Anselmo, Arieder Adelmo

Fatores limitantes para a expansão da potência de geração fotovoltaica considerando os impactos na qualidade do fornecimento de energia / Arieder Adelmo Anselmo. -- Maringá, PR, 2025.

ix, 71 f. : figs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Camila de Brito Miranda Faia.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, 2025.

1. Geração distribuída. 2. Rede de distribuição de energia. 3. Qualidade de energia. 4. Fornecimento de energia elétrica. I. Faia, Camila de Brito Miranda, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Bioenergia. III. Título.

CDD 23.ed. 621.31

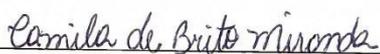
Sintique Raquel de C. Eleutério - CRB 9/1641

## FOLHA DE APROVAÇÃO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA

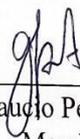
Esta é a versão final da dissertação de Mestrado apresentada por **Ariéder Adelmo Anselmo** perante a Comissão Julgadora do Curso de Mestrado em Bioenergia em 14 de fevereiro de 2025.

### COMISSÃO JULGADORA



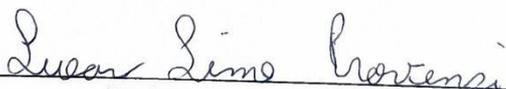
---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Camila de Brito Miranda Faia  
Orientadora/Presidente



---

Prof. Dr. Glaucio Pedro de Alcantara  
Membro



---

Prof. Dr. Lucas Lima Provensi  
Membro

Fatores limitantes para a expansão da potência de geração fotovoltaica considerando os impactos na qualidade do fornecimento de energia.

## RESUMO

A geração distribuída é caracterizada por um sistema de produção de energia elétrica disperso em diversas pequenas unidades situadas mais próximas dos centros de consumo, com predominância de fontes renováveis, como solar, eólica, biomassa e hidrelétricas. Apesar das inúmeras vantagens desse método, com o crescimento exponencial das solicitações de acesso de GD, as distribuidoras de energia têm convivido com desafios significativos para manter o padrão desejado de qualidade das suas redes de energia. Por meio de pesquisa de dados e publicações disponíveis na literatura da área elétrica, além de estudo de caso com simulação computacional, identificou-se, neste trabalho, que os problemas de qualidade do fornecimento, principalmente relacionados à tensão, são os principais fatores limitantes para expansão da potência de geração. Dessa maneira, foram propostas medidas como reforço de rede, implementação de sistemas de armazenamento e controladores de geração como alternativas viáveis para reduzir os problemas enfrentados.

**Palavras-chave:** Geração Distribuída; Rede de Distribuição de Energia; Qualidade de Energia; Fluxo Inverso; Sobretensão.

Limiting Factors for the Expansion of Photovoltaic Generation Capacity Considering the Impacts on Power Supply Quality.

## **ABSTRACT**

Distributed Generation is characterized by a decentralized electrical energy production system comprising numerous small units located closer to consumption centers, predominantly utilizing renewable sources such as solar, wind, biomass, and hydroelectric power. Despite the numerous advantages of this approach, the exponential growth in DG connection requests has posed significant challenges for energy distribution companies in maintaining the desired quality standards of their power grids. Through data research and literature review in the electrical engineering field, coupled with a case study using computational simulation, this study identified that power supply quality issues, particularly those related to voltage, are the main limiting factors for the expansion of generation capacity. Accordingly, measures such as grid reinforcement, the implementation of energy storage systems and generation controllers are proposed as viable alternatives to mitigate the challenges faced.

**Keywords:** Distributed Generation; Electric Distribution Grid; Power Quality; Reverse Power Flow; Overvoltage.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da população com acesso à eletricidade .....	3
Figura 2 - Consumo de energia - fontes renováveis e não renováveis .....	5
Figura 3 - Geração de energia solar no Brasil - 2004 a 2023 .....	6
Figura 4 - Modelo de geração distribuída .....	11
Figura 5 - Conexões de geração distribuída no estado do Paraná .....	15
Figura 6 - Estrutura esquemática de uma célula fotovoltaica .....	17
Figura 7 - Formas de fabricação das células solares .....	18
Figura 8 - Componentes do sistema fotovoltaico em uma residência .....	20
Figura 9 - Sistema Interligado Nacional - SIN .....	23
Figura 10 - Exemplo de SE de distribuição de energia .....	25
Figura 11 - Rede de distribuição (alimentador) com uma chave de manobra .....	26
Figura 12 - Esquema de controle de tensão em uma subestação .....	29
Figura 13 - Distúrbio de qualidade na tensão de fornecimento .....	34
Figura 14 - Esquema da metodologia utilizada .....	42
Figura 15 - Medida da avenida Brasil - cidade de Maringá-PR .....	45
Figura 16 - Padrão de simulação no Anarede/Anafas .....	49
Figura 17 - Simulação no Anarede/Anafas - Cenário 1 .....	53
Figura 18 - Simulação no Anarede/Anafas - Cenário 2 .....	54
Figura 19 - Simulação no Anarede/Anafas - Cenário 3 .....	55
Figura 20 - Simulação no Anarede/Anafas - Cenário 4 .....	56
Figura 21 - Simulação no Anarede/Anafas - Cenário 5 .....	57
Figura 22 - Simulação no Anarede/Anafas - Cenário 6 .....	58
Figura 23 - Simulação no Anarede/Anafas - Cenário 7 .....	59
Figura 24 - Simulação no Anarede/Anafas - Cenário 8 .....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características técnicas de condutores de alumínio .....	46
Tabela 2 - Características de carga/localização .....	47
Tabela 3 - Características técnicas/construtivas .....	47
Tabela 4 - Características técnicas/construtivas do transformador .....	48
Tabela 5 - Modelagem de simulação computacional .....	48
Tabela 6 - Valores base definidos para o fluxo de potência .....	49
Tabela 7 - Cenários de simulação .....	49
Tabela 8 - Cenário de simulação número 1 .....	53
Tabela 9 - Cenário de simulação número 2 .....	54
Tabela 10 - Cenário de simulação número 3 .....	55
Tabela 11 - Cenário de simulação número 4 .....	56
Tabela 12 - Cenário de simulação número 5 .....	57
Tabela 13 - Cenário de simulação número 6 .....	58
Tabela 14 - Cenário de simulação número 7 .....	59
Tabela 15 - Cenário de simulação número 8 .....	60

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Ampère
GD	Geração Distribuída
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AV	Avenida
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
BT	Baixa Tensão
CAA	Cabo de Alumínio com Alma de Aço
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CPF	Cadastro de Pessoas Físicas
CNPJ	Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica
DSTATCOM	Distribution Static Synchronous Compensator
FACTS	<i>Flexible Alternating Current Transmission Systems</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
KM	QuiloMetro
KV	QuiloVolt
KVA	QuiloVolt-Ampere
KVAr	QuiloVolt-Ampere reativo
KW	QuiloWatt
MCM	Mil Circular Mils
MM <sup>2</sup>	Milímetros quadrados
MT	Média tensão
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
PQ	Potência ativa e reativa
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico
PU	Por Unidade
REN	Resolução Normativa
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
SCIELO	<i>Scientific Electronic Library Online</i>
SE	Subestação
SIN	Sistema Interligado Nacional
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
SVC	<i>Static Var Compensator</i>
TCSC	<i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
TWh	TeraWatts-hora
TF	Transformador
UC	Unidade Consumidora
UPFC	<i>Unified Power Flow Controller</i>
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração
Z%	Impedância percentual

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS .....	7
1.1.1. Objetivo geral .....	7
1.1.2. Objetivos específicos .....	8
1.2. JUSTIFICATIVAS .....	8
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>10</b>
2.1. CONCEITOS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA - GD .....	11
2.2. SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	16
2.3. SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA - SEP .....	23
2.4. MÉTODOS DE CONTROLE DE TENSÃO (TRADICIONAIS X MODERNOS).....	28
2.5. ESTUDOS EM SISTEMA ELÉTRICO .....	30
2.6. QUALIDADE DE ENERGIA .....	33
2.7. EXPLORAÇÃO DO TEMA.....	36
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>42</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>52</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Na sociedade moderna, a energia elétrica passou a ser um recurso essencial em nossas rotinas, responsável por impulsionar o desenvolvimento, o conforto e a qualidade de vida. É um bem desejável, imprescindível e vital. Desde a comunicação e dos meios de transporte, passando pela iluminação pública e pelos recursos computacionais no trabalho, até as indústrias de grande porte, nossa vida está intimamente ligada à eletricidade.

As propriedades físicas da eletricidade são estudadas desde muito tempo atrás como um recurso existente na natureza, no entanto, para chegar ao conhecimento existente sobre a sua forma de produção e de consumo, um dos principais nomes é Michael Faraday (1791-1867) (PERES; GOMES, 2021). Esse físico e químico britânico foi responsável pela descoberta da indução eletromagnética, uma das teorias que relaciona a eletricidade com magnetismo (fundamental para a operação de transformadores (TFs), geradores de energia e motores elétricos) (BAGNOLI; LIVI, 2018). Seu trabalho de pesquisa independente teve início em 1821, no campo do eletromagnetismo, e teve seu ápice com a produção da indução de corrente elétrica, no ano de 1831, em experimentos que certamente geraram uma revolução no estudo da eletricidade (PERES; GOMES, 2021).

No final do século XIX, a invenção da lâmpada incandescente por Thomas Edison e a criação do sistema de corrente alternada por Nikola Tesla e George Westinghouse possibilitaram a distribuição em larga escala da eletricidade, iniciando a era da eletrificação das cidades (IEEE, 2018). Já no século passado, a energia elétrica expandiu-se de maneira exponencial, alimentando a revolução industrial e tecnológica (SMIL, 2010). O desenvolvimento de usinas hidrelétricas, termelétricas e, posteriormente, nucleares, permitiu a produção de grandes quantidades de energia, atendendo às demandas crescentes da sociedade moderna (SMIL, 2010). Assim, a evolução da energia, desde a indução de Faraday até as inovações do século passado, foi marcada por avanços tecnológicos que transformaram profundamente a forma como a humanidade produz e utiliza energia (IEEE, 2018).

Nos últimos anos, o consumo mundial de energia elétrica tem mostrado uma tendência ainda crescente. Entre 2000 e 2023, a demanda mundial por

eletricidade aumentou cerca de 93 %, e considerando os últimos 10 anos registrados (2013-2023), o crescimento anual médio foi de aproximadamente 2,5 % (RITCHIE; ROSADO; ROSER, 2023). Esse aumento foi impulsionado pelo crescimento populacional, pela urbanização acelerada e pela expansão das atividades industriais (AHUJA; TATSUTANI, 2009). Nesse nível de utilização, é evidente a necessidade urgente de buscar novas fontes de energia elétrica, alinhadas com a eficiência e a sustentabilidade no fornecimento (MAJID et al., 2019).

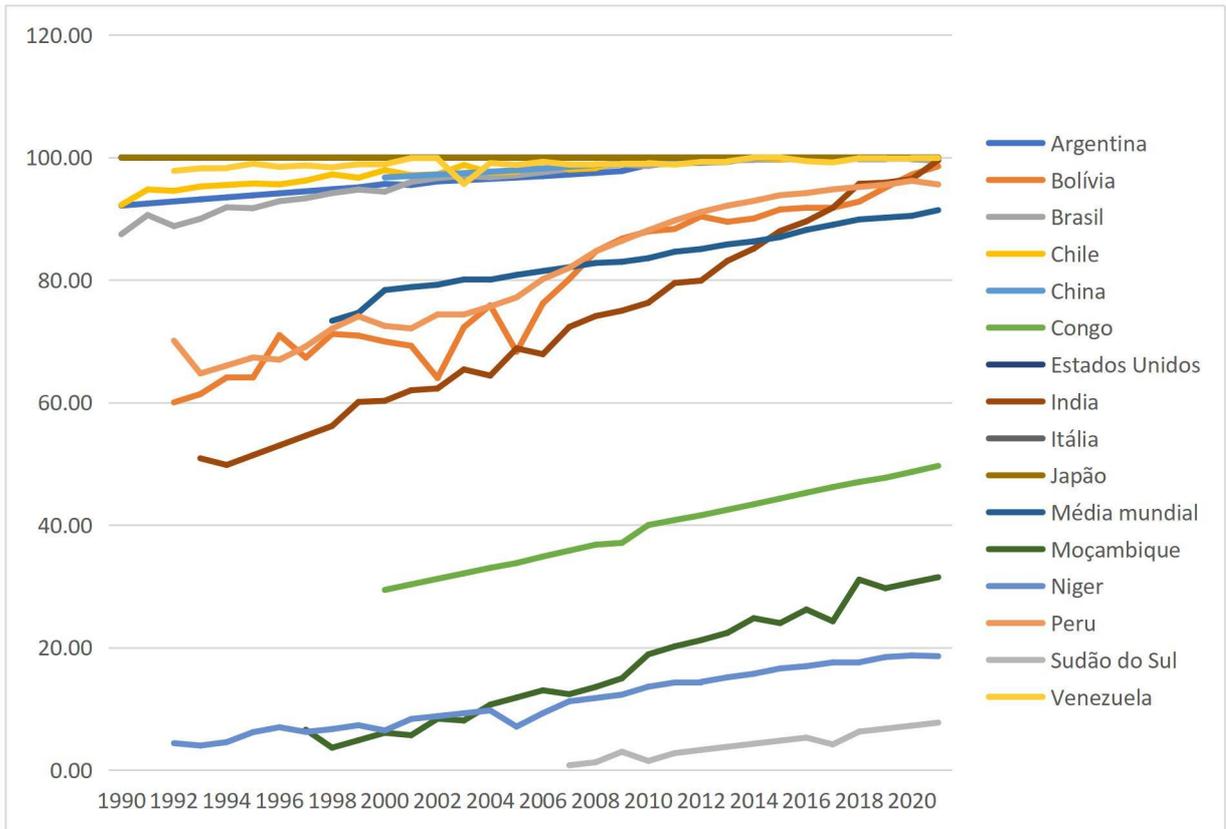
Apesar do crescimento contínuo, a distribuição do consumo de energia elétrica é desigual entre as diferentes regiões do mundo. Países desenvolvidos, como os Estados Unidos e membros da União Europeia, apresentam altos níveis de consumo per capita, enquanto nações em desenvolvimento, especialmente na África e em partes da Ásia, ainda enfrentam desafios significativos para garantir o acesso universal à eletricidade. Essa disparidade é ilustrada por dados do Banco Mundial, que indicam que cerca de 789 milhões de pessoas ainda vivem sem acesso à eletricidade, sendo a maioria delas em áreas rurais (WORLD BANK, 2020).

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que são metas criadas pela Organização das Nações Unidas (ONU), são os principais itens de controle mundial na busca de uma divisão igualitária de recursos, buscando erradicar a pobreza, proteger o meio ambiente e garantir que as pessoas tenham maior paz e prosperidade. Nessa agenda mundial com horizonte até 2030, está presente o objetivo de número sete que visa garantir que todas as pessoas tenham acesso a fontes de energia de forma contínua, eficiente e a um custo acessível (ONU, 2022).

Cumprir a meta para 2030 é um cenário muito desafiador, pois restam as áreas onde a infraestrutura é limitada e remota e que exigem algumas ações integradas das autoridades, tais como investimentos em construção e expansão de redes, incentivo às energias renováveis de pequena escala, políticas públicas de estímulo ao investimento privado, financiamento, capacitação e criação de um ambiente regulatório estável e favorável (ONU, 2022).

Na Figura 1, é possível observar a evolução do acesso da população à eletricidade ocorrida entre os anos de 1990 e 2020 para alguns países do mundo. Também é visível o abismo existente entre as diversas regiões, principalmente quando são comparados os países mais ricos e desenvolvidos com aqueles ainda em desenvolvimento (OUR WORLD IN DATA, 2024).

**Figura 1** - Evolução da população com acesso à eletricidade



Fonte: Adaptado de OUR WORLD IN DATA, 2024.

Nesse contexto, a geração distribuída (GD) surge como um produto fundamental na expansão do fornecimento de energia em muitas partes do mundo, principalmente em áreas remotas. Essa forma de geração de energia permite a sua instalação próxima aos pontos de consumo, por exemplo em comunidades rurais, melhorando a sua qualidade de vida e abrindo oportunidades para o desenvolvimento econômico de forma sustentável (SOETHE; BLANCHET, 2020).

Ao contrário dos modelos centralizados, que a energia é gerada em grandes usinas e distribuída através de extensas redes de transmissão, a geração distribuída envolve a produção de energia em uma escala menor e localizada, de forma que as obras necessárias para instalação são bem mais simples e econômicas (ACKERMANN; ANDERSSON; SÖDER, 2001).

A geração distribuída não vem para competir, mas sim para complementar o sistema de rede centralizado existente, melhorando a eficiência e a estabilidade globais do fornecimento de energia. Essas características trazem uma série de benefícios, incluindo redução de perdas, alívio de carga sobre a

infraestrutura tradicional, redução de interrupções. Além disso, a promoção de fontes de energia renováveis na matriz energética oferece benefícios ambientais ao reduzir as emissões de gases do efeito de estufa, garantindo um fornecimento de energia confiável e diversificado (ACKERMANN; ANDERSSON; SÖDER, 2001).

Neste momento, em que o conhecimento está disponível com grande facilidade de acesso à população, cada vez mais há uma expansão na propagação de informações e com a invenção da internet e dos documentos digitais, essa disseminação tem tomado dimensões relevantes. Esse ambiente também favorece a propagação das causas ambientais, o que, outrora, era deixado em segundo plano.

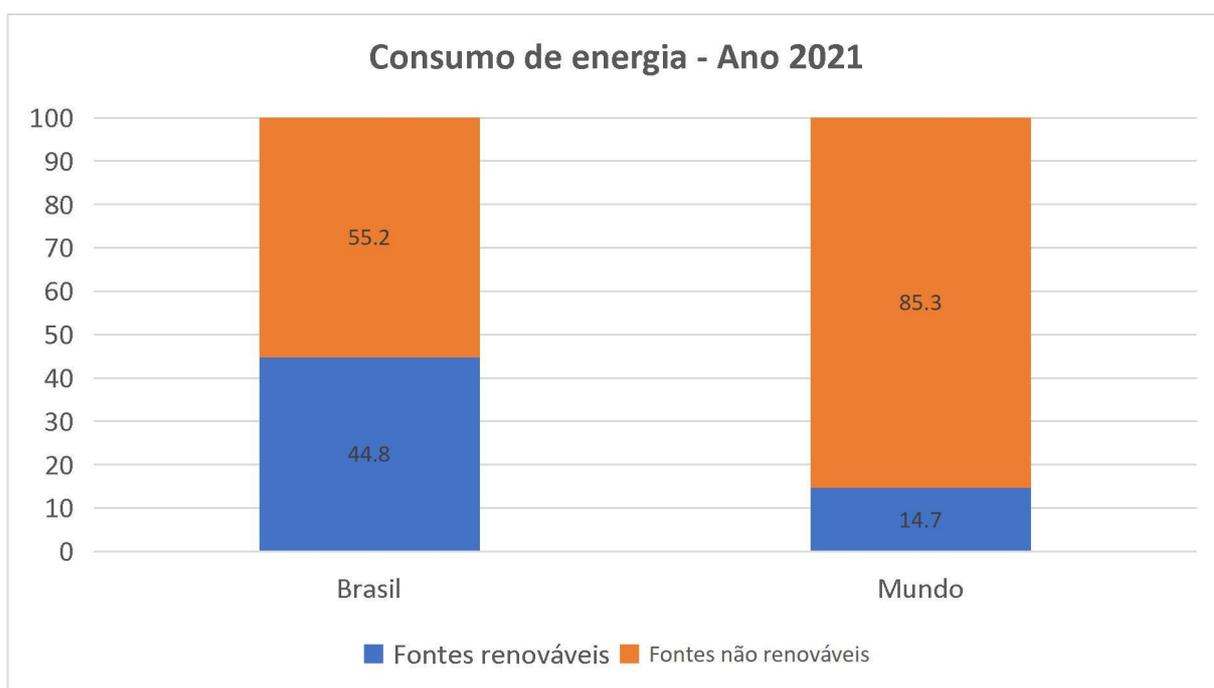
A necessidade de reduzir os impactos ambientais causados pela atividade humana deixou de ser uma mera preocupação para se tornar uma obrigação de manter um planeta em condições seguras para as futuras gerações. A sustentabilidade está em evidência e se tornou o foco de todas as ações relacionadas à redução da degradação do meio ambiente (SILVA; GUERRIERI, 2023). Nesse contexto, para ser efetivado uma transição energética que garanta energia acessível, confiável e sustentável, as estratégias disponíveis são: uma maior eficiência energética, o aumento da geração de energia por fontes renováveis e a captura de carbono da atmosfera.

Apesar das várias incertezas e riscos geopolíticos presentes no caminho da transição energética, é possível notar que o mundo acelera na correção de curso e na superação de gargalos. Nesse contexto, espera-se que o uso de energia de origem em combustível fóssil chegue em seu pico de demanda nos próximos anos, por volta de 2030. Essa previsão pode ser concretizada principalmente com a implantação de novas medidas rumo à neutralidade de emissão de carbono, apoiada pelo acordo de Paris, um tratado climático internacional de 2015 (MCKINSEY & COMPANY, 2022).

Muita da poluição gerada no mundo tem vínculo com as fontes de energia atualmente utilizadas. Os motores de explosão de veículos, as usinas térmicas a carvão e a gás, as atividades industriais, entre outros, possuem a similaridade de uso de combustíveis de origem fóssil. A busca por fontes alternativas de energia que sejam de origem limpa, renováveis e de baixo impacto na sua produção, como o biodiesel, o etanol, a biomassa, é objeto frequente de várias pesquisas e investimentos públicos e privados ao redor do mundo (IRENA, 2019).

Conforme apresentado na Figura 2 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que compara o percentual de consumo de energia renovável no Brasil com o Mundo, a matriz energética brasileira apresenta uma relevante quantidade de fontes renováveis, principalmente quando comparado com os dados globais. O desafio é encontrar uma forma eficiente de aumentar significativamente esse valor.

**Figura 2** - Consumo de energia - fontes renováveis e não renováveis



Fonte: Adaptado de EPE, 2023.

No Brasil, apesar da produção de energia elétrica ser significativamente realizada por meio de usinas hidrelétricas, que são renováveis, a expansão desse sistema demanda muito tempo e investimento e ainda esbarra em outros problemas ambientais gerados para a flora e fauna no período de sua construção e operação (SOVACOOOL; WALTER, 2018). Nesse contexto, a liberação, em 2012, do uso em grande escala de plantas de geração distribuída (GD) no formato de compensação de energia é considerada um divisor de águas na matriz energética nacional (GALBIATTI-SILVEIRA, 2018).

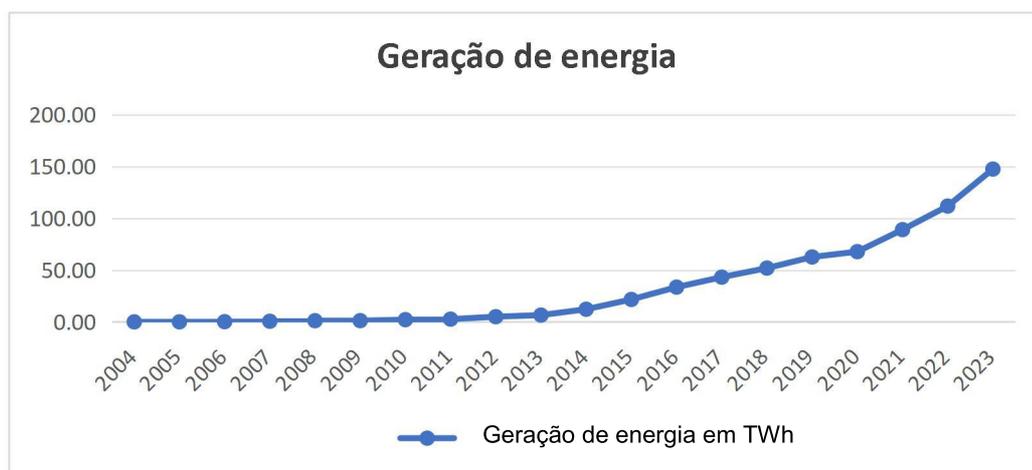
A geração distribuída proporciona a instalação de geração por pequenas unidades consumidoras, facilitando a entrada de operação de forma rápida, a pulverização nas fontes de investimentos e a maior diversificação de fontes de energia. Além disso, a implementação de incentivos governamentais, uma grande

divulgação na mídia, maiores linhas de financiamento e aumento na escala de produção e importação geraram um fomento dessa atividade nos últimos anos e a percepção de ser um ótimo custo-benefício para os consumidores (ACKERMANN; ANDERSSON; SÖDER, 2001).

Considerando esse formato de geração, o destaque fica para o sistema que utiliza a energia que há de forma mais abundante, a energia solar. O uso de sistemas fotovoltaicos nas unidades consumidoras tem sido cada vez mais intensificado, com grande procura pela aquisição e homologação desses sistemas.

Na Figura 3, é visualizado o aumento significativo na produção de energia fotovoltaica no Brasil, partindo de valores menores que 1 terawatts-hora (TWh) até o ano de 2007 e chegando em uma geração de 147,46 TWh no ano de 2023 (OUR WORLD IN DATA, 2024).

**Figura 3** - Geração de energia solar no Brasil - 2004 a 2023



Fonte: Adaptado de OUR WORLD IN DATA, 2024.

Com sistemas solares, o suprimento adicional de energia pode estar garantido por vários anos, evitando risco de novos apagões e de aumento nos custos de energia devido restrições nos volumes hídricos (MAUÉS, 2019). Entretanto, apesar de todos os benefícios, para que os sistemas continuem sendo instalados de forma frequente, há também a necessidade de estudar os impactos que possam ser gerados no outro lado envolvido, as concessionárias de energia.

Nessas empresas, há uma preocupação com o impacto direto na atividade de distribuição de energia devido influência da instalação de geração distribuída. Pode ocorrer uma redução da receita operacional, devido principalmente

à sobra de energia que havia sido contratada (sobre contratação) e da qualidade da energia, principalmente em problemas como instabilidade, controle deficiente e variação nos níveis de tensão (GUIMARAES; SILVA; GAZZANI, 2025).

A necessidade de estudos e pesquisa sobre os impactos da penetração da geração distribuída surgiu a partir de uma mudança de conceito sobre o modelo de sistema elétrico, no qual o fluxo de energia tradicional deixa de ser unilateral, passando a haver uma injeção de potência de unidades consumidoras que eram puramente de consumo, gerando um fluxo bidirecional. Agrega-se a isso, a situação em que os geradores grandes e centralizados, que eram instalados distantes das cargas, passam a coexistir com unidades menores e distribuídas, próximas aos locais de consumo, gerando características diversas das conhecidas (DUNHAM; CUTLER; MISHRA, 2020).

De acordo com Waenga e Pinto (2016), o tema proposto mostra ser de grande importância, com a existência de diversos estudos em andamento mundialmente que exploram os efeitos prejudiciais às redes de distribuição em relação às variações da qualidade do sistema, tais como: variação de tensão, harmônicos, curtos-circuitos, entre outros.

Pensado nas limitações que possam aparecer nos sistemas elétricos e no prejuízo mútuo que uma eventual saturação dos sistemas de distribuição e consequente impedimento de ligação de novas solicitações de acesso possam gerar para o crescimento orgânico dessa forma de energia, foi proposto esse trabalho para identificação dos fatores limitantes que possam se tornar obstáculos para a expansão da potência de geração fotovoltaica, com foco principal no estudo dos impactos na qualidade do fornecimento de energia em sistema de distribuição.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo geral

O trabalho visa identificar os fatores limitantes que possam ser determinantes em uma eventual restrição da expansão de novos sistemas de geração fotovoltaica devido impactos na qualidade do fornecimento de energia em redes de distribuição.

### 1.1.2. Objetivos específicos

Para colaborar com o êxito em atingir o objetivo geral da pesquisa, foram definidos objetivos específicos que servem de etapas intermediárias no decorrer do trabalho, conforme segue:

- Itens de qualidade: identificar os principais indicadores de qualidade relacionados com a rede de distribuição que devem ser seguidos pelas concessionárias e quais os seus valores aceitáveis.
- Variação nos padrões de qualidade: identificar as possíveis causas para variações de qualidade fora dos valores desejados.
- Equipamentos e materiais de rede: identificar a relevância e grau de influência das redes existentes no desempenho dos indicadores.
- Plantas de geração solar: correlacionar os demais itens levantados com a entrada em operação de novos sistemas de geração.
- Limites operacionais: estudar os impactos da variação da potência para conexão de novos sistemas de geração solar e sua relação com as demais as variáveis identificadas.
- Simulações computacionais: testar o conhecimento adquirido na teoria, replicando um sistema elétrico simulado, com características reais, em diversos cenários, com variações nos parâmetros e nas condições operacionais relacionados, de forma a associar o comportamento das variáveis do sistema à entrada em operação de geração em formato de estudo de caso.

## 1.2. JUSTIFICATIVAS

A expansão exponencial de sistemas de geração distribuída no Brasil já tem causado a saturação da rede de distribuição em algumas regiões. Este trabalho

visa identificar as causas da saturação da rede de distribuição, avaliar os impactos da geração na qualidade do fornecimento e propor medidas para evitar o bloqueio de novas adesões.

O estudo antecipado das causas e consequências de eventuais problemas de qualidade na rede de energia contribui para a identificação e implementação de soluções eficazes, de forma planejada e organizada. Essa cautela não só reduz os impactos negativos, mas também inibe que esses problemas sejam usados como justificativa para desestimular a instalação de novos sistemas. O sistema de GD deve ser considerado como uma tecnologia eficiente, perene e que traz inúmeros benefícios para a causa ambiental.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo, os principais assuntos relacionados com o desenvolvimento do trabalho são descritos por meio das definições existentes na literatura, fornecendo a base necessária para a compreensão dos desafios e oportunidades associados à geração distribuída. Também são apresentadas as principais conclusões sobre as pesquisas realizadas em conteúdos existentes na literatura (livros, periódicos, artigos etc.).

O objetivo desta revisão bibliográfica é examinar e condensar a literatura já produzida sobre os impactos da GD no sistema elétrico, abordando os principais desafios técnicos, ambientais e regulatórios. Além disso, busca gerar maior nivelamento dos conhecimentos e conceitos necessários para o entendimento de forma abrangente dos principais aspectos relacionados à geração distribuída, à rede de distribuição, aos estudos elétricos e à qualidade de fornecimento de energia.

São apresentadas as vantagens e desvantagens econômicas, ambiental e social da geração distribuída, os componentes principais, os tipos de sistemas e as principais tendências tecnológicas dos sistemas fotovoltaicos. Também são indicados a estrutura e operação das redes de distribuição elétrica e seus equipamentos utilizados e os principais indicadores de qualidade e normas regulatórias relacionados com a qualidade do fornecimento de energia.

Por fim, são explorados os fatores de restrição que dificultam a expansão da geração distribuída, abrangendo barreiras técnicas, econômicas, regulatórias, sociais e ambientais.

Esta revisão abrange prioritariamente as publicações brasileiras elaboradas entre os anos de 2010 e 2024, considerado o período de franca expansão da geração distribuída em nosso país. Também serão incluídos trabalhos mais antigos de nível mundial, devido a possíveis situações semelhantes que podem ter sido objeto de preocupação e estudo, devido ao pioneirismo de países europeus e dos Estados Unidos. Serão considerados aqueles que abordem as tecnologias relacionadas à GD e aos equipamentos de rede, a qualidade esperada na operação de sistemas de distribuição de energia e por fim métodos de simulação e análise computacional.

## 2.1. CONCEITOS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA - GD

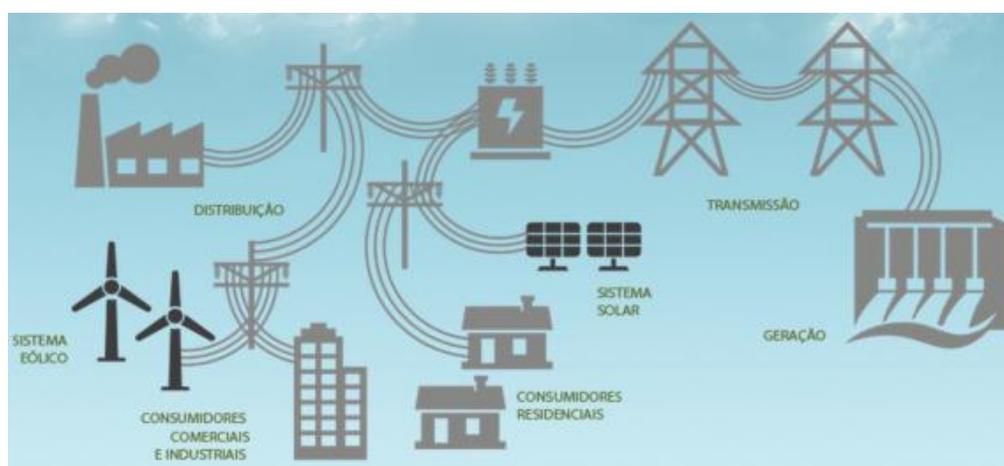
A GD pode ser definida como a injeção descentralizada de energia elétrica ativa, gerada por meio de fontes primárias renováveis, conectadas estrategicamente mais próximas aos locais de consumo (ACKERMANN; ANDERSSON; SÖDER, 2001).

De acordo com a Resolução Normativa (REN) nº 1.000/2021 da Aneel (2021a), a GD é ligada ao sistema elétrico por meio das unidades consumidoras e pode ser classificada em dois tipos: microgeração, para potência de geração menor ou igual a 75 kW, e minigeração, para potência de geração maior que 75 kW. Quanto aos limites máximos, os novos empreendimentos possuem as seguintes capacidades permitidas:

- 5.000 kW para as centrais geradoras de fontes despacháveis;
- 3 MW para as demais fontes não despacháveis.

A Figura 4 mostra um esquemático do sistema de potência com geração distribuída conectada mais próxima das cargas, destacando os pontos de interconexão e as linhas de distribuição. Neste esquema, é possível observar como a geração distribuída, proveniente de fontes como painéis solares e turbinas eólicas, está estrategicamente posicionada para otimizar a eficiência energética e reduzir perdas no transporte de eletricidade.

**Figura 4** - Modelo de geração distribuída



Fonte: TRADER ENERGIA, 2014.

O Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) foi criado com o objetivo de fomentar o investimento privado em energia sustentável, gerando maior atratividade e viabilidade. Com a adesão ao SCEE, o excedente de energia gerado pela Unidade Consumidor (UC) pode ser injetado na rede de distribuição. Essa energia é emprestada gratuitamente à concessionária, que fará seu uso imediato. Em contrapartida, esse crédito pode ser compensado futuramente no consumo durante períodos de menor geração de energia (ANEEL, 2021b).

Nesse sistema, os créditos gerados podem ser usados na mesma UC ou em outras da mesma distribuidora, desde que sejam do mesmo titular (Aneel, 2021b). Quando a energia gerada é injetada na rede para consumo próprio (cargas da UC), a modalidade é chamada de Geração na própria UC. As outras modalidades disponíveis envolvem a injeção na rede para uso em outras unidades consumidoras, são elas:

- Autoconsumo Remoto: permite que outras UCs pertencentes ao mesmo titular (mesmo CPF ou CNPJ) possam abater o consumo com o excedente de energia gerada pela unidade com GD.
- Empreendimento com Múltiplas Unidades Consumidoras: permite que condomínios (verticais ou horizontais), tenham um sistema de GD instalada na UC das áreas comum e as outras UCs pertencentes ao local possam abater o consumo com o excedente de energia gerada por essa unidade com GD.
- Geração Compartilhada: permite que unidades de CPF ou CNPJ distintos façam uma união jurídica por meio de associação, cooperativa ou consórcio e instalem uma unidade de GD em conjunto, para que possam abater o consumo com o excedente de energia gerada.

De acordo com a Aneel, as fontes primárias para conversão de energia usadas na GD são:

- Potencial hidráulica: obtida pelo aproveitamento do potencial gravitacional da água de rios nas hidrelétricas (centrais geradoras hidrelétricas).

- Radiação solar: obtida pelo aproveitamento das ondas eletromagnéticas emitidas pelo sol nas usinas solares (usinas fotovoltaicas).
- Cinética do vento: obtida pelo aproveitamento do deslocamento de ar, gerando rotação das suas pás (usinas eólicas).
- Térmica: obtida pelo aproveitamento da queima de combustíveis renováveis, principalmente pela biomassa (usina termoelétrica)
- Cogeração qualificada: categorização para as usinas térmicas de maior eficiência que aproveitam duas formas de energia, exemplo de energia elétrica e térmica, com uso de uma mesma fonte primária.

Dentre essas opções de energia limpa, pode-se destacar a radiação solar, com o seu uso crescente em usinas fotovoltaicas. Essas usinas consistem em uma série de painéis fotovoltaicos que transformam a luz solar em eletricidade do tipo corrente contínua, sendo então convertida para corrente alternada por meio de inversores (IEEE, 2020).

Para a distribuidora garantir o atendimento aos itens de qualidade, uma etapa obrigatória é a solicitação de conexão que deve ser feita pelo consumidor no momento da instalação da geração distribuída em instalações existentes, novas ou com aumento da potência injetada no sistema de distribuição. Esse processo é fundamental para a realização dos estudos necessários para garantir que as obras de atendimento sejam devidamente executadas. Esse serviço garante a redução da perturbação gerada pela geração do consumidor e os impactos da conexão, mantendo a rede de distribuição em níveis adequados (COPEL, 2024).

Como resultado dos estudos da solicitação de conexão, é gerado o orçamento de conexão, documento no qual tem-se as condições para atendimento, as obras necessárias de reforço e ampliação, os custos envolvidos (detalhamento do valor da mão-de-obra, dos materiais e equipamentos), a participação necessária do consumidor nos valores envolvidos e os prazos para a conexão ao sistema de distribuição. O consumidor é responsável pelo fornecimento dos documentos e informações necessários para a elaboração do estudo, por aprovar o orçamento

gerado, autorizando a execução das obras e por solicitar a vistoria das instalações após as etapas concluídas (ANEEL, 2021a).

Segundo Dias (2005), a geração distribuída no Brasil enfrenta diversas vantagens e desvantagens que podem ser consideradas, entre elas:

- Postergação de investimentos (vantagem): com a instalação de geração distribuída acontecendo com recursos privados, diminui a necessidade de grandes investimentos realizados por órgãos públicos.
- Atendimento a áreas isoladas (vantagem): o uso da geração distribuída pode ser feito de forma ilhada, para atendimento de localidades remotas onde a ligação com o sistema interligado requer investimentos elevados.
- Redução de perdas (vantagem): como a geração ocorre próxima ao ponto de consumo, reduz o fluxo de potência necessário para atendimento e com isso há menor perda de energia na transmissão e distribuição.
- Questões regulatórias (desvantagem): faltam definições regulatórias claras e padronizadas em todo o território nacional, ficando muito a cargo das premissas de cada uma das concessionárias existentes.
- Variabilidade (desvantagem): Fontes como solar e eólica são intermitentes, dependendo das condições atmosféricas, o que pode causar flutuações na geração de energia.
- Procedimentos de operação e proteção (desvantagem): a conexão de GD apresenta maiores dificuldades operativas devido aos fluxos de energia bidirecionais, podendo exigir adaptações técnicas de maior complexidade.

A instalação de GD apresenta impactos significativos na economia, no meio ambiente e na sociedade. Pode diminuir os valores das faturas para consumidores finais devido à redução de custo de instalação, operação e manutenção, além de redução de perdas técnicas. Além disso, a GD pode estimular

a economia local ao criar oportunidades de emprego com o aquecimento desse mercado (DIAS, 2005).

Em relação ao meio ambiente, as fontes renováveis da GD contribuem para a redução das emissões de gases de efeito estufa, graças à menor dependência de combustíveis fósseis, ajudando a preservar os recursos naturais. Também reduz a necessidade de áreas devastadas ou alagadas para construção de usinas, linhas de transmissão ou reservatórios de hidrelétricas, trazendo menores impactos para a fauna e a flora (DIAS, 2005).

No âmbito social, a GD contribui com a inclusão energética, podendo melhorar a qualidade de vida das comunidades ao permitir o desenvolvimento de atividades econômicas. Além disso, a GD permite trazer mais conforto e qualidade aos lares dos consumidores, na medida que são capazes de produzir sua própria energia, de forma mais barata (DIAS, 2005).

Na Figura 5, é apresentado o número de conexões de geração distribuída (micro e minigeração) aprovadas no estado do Paraná entre os anos de 2012 e 2024, abrangendo todas as fontes disponíveis. Essa análise permite observar a evolução do setor, evidenciando o grande crescimento da capacidade instalada de geração ao longo dos anos.

**Figura 5 - Conexões de geração distribuída no estado do Paraná**



Fonte: Adaptado de Aneel (2025).

A capacidade acumulada de GD global cresceu no período pós pandemia apoiada na redução massiva nos preços dos equipamentos, principalmente

fotovoltaicos, devido ao excesso na oferta. Aumentos significativos de capacidade de fabricação na China levaram a uma oferta que superou a demanda global.

A Europa demonstrou um forte crescimento, liderado por um ressurgimento na Alemanha. A Alemanha é considerada uma das pioneiras na adoção de geração distribuída, especialmente por meio de energia solar e eólica (OUR WORLD IN DATA, 2024).

Nas Américas, a Califórnia nos Estados Unidos se destaca como líder na geração distribuída. O estado implementou políticas robustas de incentivo à energia solar. Já o Brasil continua com seu crescimento acentuado, chegando entre os dez países com maior capacidade de geração instalada no mundo (OUR WORLD IN DATA, 2024).

Em todos os países, a saturação das redes de distribuição já aparece como um dos principais problemas na expansão da GD. Soluções técnicas para restrição de injeção e armazenamento de energia já estão sendo adotadas de forma bastante viável (IEA PVPS, 2023).

## 2.2. SISTEMA FOTOVOLTAICO

O sistema fotovoltaico utiliza como base do seu funcionamento as células fotovoltaicas, também chamadas de módulos ou placas solares. Esses dispositivos transformam a radiação solar diretamente em eletricidade através do efeito definido como fotovoltaico. Esse fenômeno de conversão da luz solar em eletricidade foi testado pela primeira vez pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel no ano de 1839, verificando a presença de tensão elétrica quando a luz solar incide sobre um material semicondutor (GREEN, 2005).

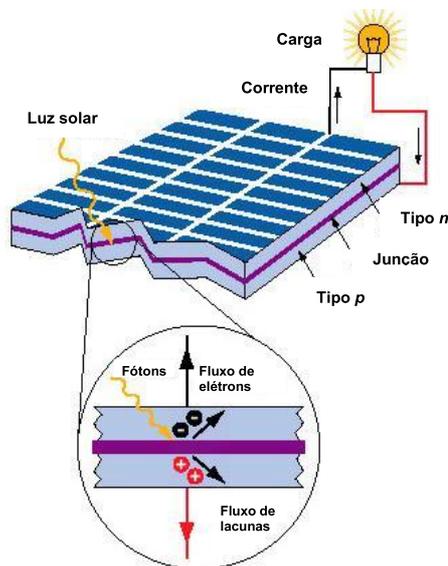
Os materiais semicondutores, principalmente o silício, são essenciais para o funcionamento das células fotovoltaicas, pois são dotados de bandas de energia com a presença de elétrons (banda de valência) e de outras sem elétrons, chamada de lacunas (banda de condução), formando uma rede cristalina. Em seu estado normal, o silício possui quantidade igual de elétrons e lacunas. Para que os semicondutores produzam o efeito esperado, eles precisam ser dopados (CRESESB, 2024).

Ao realizar a dopagem do semicondutor (processo de adição de átomos de outros elementos para gerar impurezas no material), é gerado um excesso de

elétrons com ligação fraca ao núcleo ou de lacunas. A dopagem do Tipo  $n$  (região negativa) adiciona átomos que possuem mais elétrons de valência do que o silício (como fósforo ou arsênio), criando elétrons livres no semiconductor. Na dopagem do Tipo  $p$  (região positiva) é adicionado átomos que possuem menos elétrons de valência do que o silício (como boro ou alumínio), criando as lacunas (CRESESB, 2024).

Quando um semiconductor do Tipo  $p$  é colocado em contato com um semiconductor do Tipo  $n$ , forma-se uma junção  $p-n$ . Nesse estágio, é necessário pouca energia para que haja um deslocamento de elétrons entre posições. Quando a radiação solar atinge a célula, os elétrons recebem energia suficiente para passar da banda de valência para a banda de condução, criando o deslocamento de pares elétron-lacuna (UNIVERSITY OF STRATHCLYDE, 2019). Representado na Figura 6, com a conexão de um circuito elétrico, os elétrons seguem seu movimento para o exterior da placa, através do circuito, criando uma corrente elétrica.

**Figura 6** - Estrutura esquemática de uma célula fotovoltaica



Fonte: Adaptado de UNIVERSITY OF STRATHCLYDE, 2019.

Como pode-se diferenciar na Figura 7, as células fotovoltaicas são fabricadas de três formas diferentes, variando conforme o material e a estrutura cristalina: monocristalinas, policristalinas ou de silício amorfo.

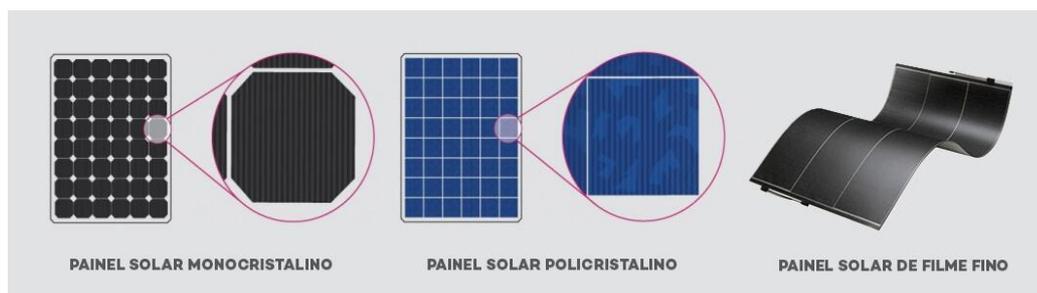
As células monocristalinas são fabricadas de maneira mais complexa pois requerem um cristal de silício de alta pureza, com estrutura uniforme. Essa

configuração regular permite maior eficiência na conversão de luz solar em eletricidade (CRESESB, 2024).

As células policristalinas são mais baratas e possuem menor eficiência de conversão, pois são fabricadas de forma menos rigorosa por meio da fundição do silício que é rapidamente resfriado, formando múltiplos cristais com aparência mais irregular (CRESESB, 2024).

Por fim, as células de filme fino (silício amorfo) são fabricadas com camadas finas de material semicondutor (podendo ser irregular ou até flexível) sobre um vidro, plástico ou metal, gerando um alto grau de desordem na estrutura dos átomos. Essa característica reduz o custo de produção e aumenta a possibilidade de área máxima do módulo, no entanto também impacta negativamente na sua eficiência (a menor entre os três tipos apresentados) (CRESESB, 2024).

**Figura 7** - Formas de fabricação das células solares



Fonte: Neoenergia, 2024.

Cada tipo de célula possui suas vantagens e desvantagens, sendo que a indicação de uso depende da aplicação e das expectativas de eficiência, custo e aparência do sistema solar.

Para o funcionamento de um sistema fotovoltaico, além das células fotovoltaicas, tem-se diversos componentes necessários para a conversão, armazenamento e distribuição da energia gerada, entre eles:

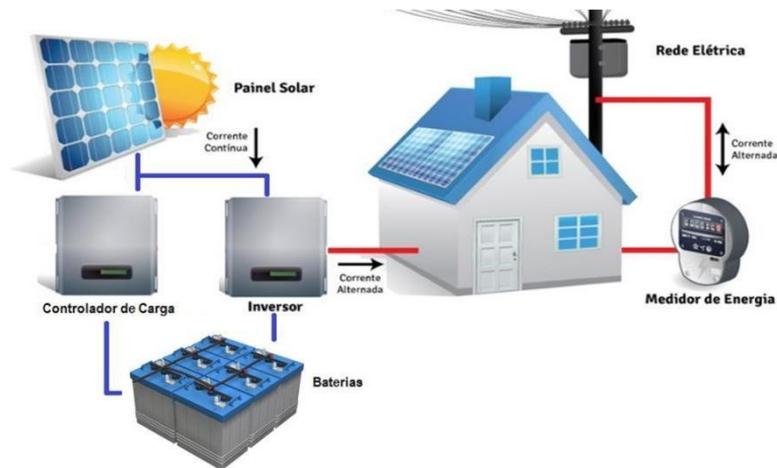
- Inversor de frequência: responsável pela conversão da corrente contínua (CC) gerada pelos painéis solares em corrente alternada (CA), que é a forma de eletricidade usada nas residências, comércios e indústrias. É fundamental na ligação entre o sistema fotovoltaico e a rede elétrica, garantindo a segurança e a compatibilidade com os aparelhos elétricos (MME, 2024).

- Estrutura de suporte: é responsável por fixar os painéis solares em telhados ou no solo. Deve ser dimensionada e instalada de acordo com as características do local e dos painéis solares, resistindo a condições climáticas adversas com segurança e firmeza (ALDO SOLAR, 2024).
- Baterias: são usadas de forma opcional para armazenamento do excesso de eletricidade produzida, permitindo o uso em momentos de maior consumo, sem precisar utilizar o sistema de compensação (ALDO SOLAR, 2024).
- Cabos elétricos e conectores: necessários para interligar os painéis solares, o inversor, as baterias e outros componentes elétricos do sistema. A instalação adequada garante a segurança do sistema (ALDO SOLAR, 2024).
- Medidores bidirecionais: são utilizados para monitorar, além do consumo de energia, também o excedente de geração (sobra da produção de energia solar após a alimentação das cargas), que é injetada na rede de distribuição (MME, 2024).
- Dispositivos de proteção: são usados para proteger o sistema fotovoltaico contra sobrecargas elétricas, curtos-circuitos e outros problemas elétricos que possam surgir. Eles garantem a segurança tanto dos equipamentos quanto dos usuários e da rede elétrica (ALDO SOLAR, 2024).
- Controlador de carga: é um componente usado em sistemas fotovoltaicos com baterias. Sua função é ajustar a tensão e a corrente que chegam e saem das baterias, protegendo-as contra sobrecarga e descarga profunda (RIBSOL, 2024).

Na Figura 8 tem-se a representação dos componentes do sistema fotovoltaico em uma residência. A figura ilustra as células fotovoltaicas instaladas no telhado, o inversor, que converte a corrente contínua gerada pelas células em corrente alternada, o controlador de carga que gerencia o fluxo de energia, as

baterias que armazenam o excedente de energia e por fim, o medidor bidirecional que monitora a energia consumida e a energia gerada.

**Figura 8** - Componentes do sistema fotovoltaico em uma residência



Fonte: RIBSOL, 2024.

A escolha do tipo de sistema fotovoltaico depende de vários fatores, incluindo a localização, as regulamentações locais, a disponibilidade da rede elétrica e as necessidades energéticas do usuário (CANAL SOLAR, 2024). Existem três tipos principais de sistema, como segue:

- Sistema On Grid (conectado na rede): utilizam inversores projetados para operar em sistemas fotovoltaicos que estão conectados à rede de distribuição das concessionárias. Eles permitem que em momento de pico de geração o excedente de energia seja entregue para a concessionária, gerando créditos para uso futuro, em horários sem incidência solar. A desvantagem fica por conta da necessidade de haver energia na rede que estão conectados, pois não funcionam durante quedas de energia.

- Sistema Zero Grid (sem injeção na rede): Tipo de inversor lançado recentemente, projetado para trabalhar conectado na rede de distribuição, porém evitando qualquer injeção de energia excedente na rede elétrica. É utilizado em locais onde a rede está saturada, garantindo que toda a energia solar gerada seja consumida apenas localmente. Também é utilizado em situações específicas onde a

legislação não permite a adesão ao sistema de compensação de energia, como para unidades consumidoras que migraram ao mercado livre de energia (COPEL, 2023).

- Sistema Off Grid (isolado da rede): são utilizados em sistemas fotovoltaicos que não estão conectados à rede elétrica pública, principalmente em áreas remotas, onde a rede elétrica não existe. Para pleno funcionamento, devem operar em conjunto com sistemas de baterias, permitindo o fornecimento de energia mesmo em momentos sem geração, como durante a noite.

O sistema de armazenamento de energia é cada vez mais importante na conexão de sistema de geração distribuída, principalmente fotovoltaicos. A geração solar, pela dependência de condições climáticas e da radiação solar, é considerada uma fonte intermitente, o que pode causar flutuações significativas na geração de energia. Esses sistemas ajudam a equilibrar a oferta e a demanda, reduzir os picos de consumo e promover uma maior estabilidade (SILVA, 2017).

Com a crescente penetração de fontes renováveis no sistema elétrico, é esperado um aumento significativo no uso de sistemas de armazenamento de energia. Nesse contexto, tem-se diversas tecnologias sendo estudadas e aplicadas em campos, entre eles: baterias de íon de lítio, baterias de chumbo-ácido, armazenamento em hidrogênio, armazenamento térmico etc. (SILVA, 2017). A integração eficaz de tecnologias de armazenamento de energia é crucial para otimizar a GD e garantir um sistema energético mais sustentável e resiliente. Cada tecnologia possui características únicas que a tornam adequada para diferentes aplicações (IEA, 2014).

As baterias, por exemplo, convertem energia elétrica em energia química durante o carregamento e realizam o processo inverso durante a descarga. Existem diversos tipos de baterias, incluindo íon-lítio, chumbo-ácido, níquel-cádmio entre outras, cada uma com suas próprias vantagens e desvantagens em termos de densidade de energia, ciclo de vida, custo e segurança. As baterias de íon-lítio são atualmente a tecnologia mais utilizada devido à sua alta densidade de energia e longo ciclo de vida. No entanto, o desenvolvimento de baterias de estado sólido promete avanços significativos em eficiência e segurança (DUNN; KAMATH; TARASCON, 2011).

O armazenamento de água por bombeamento utiliza o excesso de energia para bombear água de um reservatório inferior para um superior. Quando há demanda, a água é liberada para gerar eletricidade através de turbinas. É uma tecnologia de armazenamento de grande escala, adequada para fornecer energia de longo prazo e estabilizar a rede elétrica. Este sistema é uma das tecnologias de armazenamento de energia mais maduras e amplamente utilizadas no mundo. No entanto, requer topografia adequada e grandes volumes de água, limitando sua aplicação em certas regiões (IRENA, 2017).

O armazenamento por ar comprimido comprime ar em cavernas subterrâneas ou reservatórios durante períodos de baixa demanda. O ar comprimido é liberado e aquecido para acionar turbinas e gerar eletricidade quando necessário. Este processo é uma tecnologia promissora para armazenamento de energia em grande escala, com potencial para longos períodos de descarga. No entanto, requer formações geológicas adequadas para o armazenamento de ar comprimido, o que pode restringir sua viabilidade (PIMM; GARVEY; DE JONG, 2015).

Os volantes de inércia armazenam energia cinética em um rotor que gira em alta velocidade. A energia é liberada desacelerando o rotor, acionando um gerador de eletricidade. Os volantes de inércia possuem alta densidade de potência e podem fornecer energia rapidamente. São adequados para aplicações que exigem respostas rápidas e ciclos de carga/descarga frequentes, como a estabilização da rede elétrica (IRENA, 2017).

O armazenamento térmico armazena energia na forma de calor ou frio em materiais como água, sais fundidos ou materiais de mudança de fase. A energia térmica armazenada pode ser utilizada para aquecimento, resfriamento ou geração de eletricidade. O armazenamento térmico é uma tecnologia eficiente para aplicações de aquecimento e resfriamento, e pode ser integrado com sistemas de energia renovável, como a energia solar térmica (HASNAIN, 1998).

A escolha da tecnologia de armazenamento ideal dependerá de uma análise de fatores como a escala do sistema de GD, perfil de consumo de energia, recursos naturais disponíveis, condições econômicas, tempo de resposta necessário e tempo de duração da carga necessária (IEA, 2014).

## 2.3. SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA - SEP

O Sistema Elétrico no Brasil é chamado de Sistema Interligado Nacional (SIN) devido a sua estrutura complexa com diversos elementos interligados, de forma sincronizada, ligando todas as regiões do país. Esse sistema foi construído para garantir que todas as localidades tenham igualdade de condições de confiabilidade e qualidade no fornecimento de energia elétrica (ONS, 2024).

O SIN é formado pelos subsistemas Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte. A interconexão dos subsistemas elétricos é feita pelas linhas de transmissão de alta tensão, que transportam a energia gerada em longas distâncias, conectando as usinas aos centros de consumo conforme pode ser visualizado na Figura 9. Essas linhas são responsáveis pela transferência de energia entre as regiões e por garantir uma melhor divisão da geração entre as diversas bacias hidrográficas (ONS, 2024).

**Figura 9** - Sistema Interligado Nacional - SIN



Fonte: Adaptado de ONS, 2024.

No SIN, a produção de energia elétrica é predominantemente feita por usinas hidrelétricas, graças ao vasto potencial hidráulico disponível no país. Entretanto, as demais fontes também possuem papel relevante, pois são responsáveis por complementar a geração em momentos de falta de chuvas e possibilitam uma melhor alocação da geração próximo das grandes cargas. Nos

últimos anos, a expansão de fontes renováveis, como a energia solar e eólica, tem se intensificado, impulsionada por avanços tecnológicos e políticas governamentais favoráveis. Esse novo panorama permite uma maior contribuição dessas fontes para a matriz energética, beneficiando tanto consumidores quanto o meio ambiente.

A distribuição de energia é realizada pela concessionária através das redes de distribuição de Média Tensão (MT) e Baixa Tensão (BT), chamadas de alimentadores. São responsáveis pelo fornecimento de energia aos consumidores finais, como residências, comércios e indústrias. Também são responsáveis pelos sistemas de controle, proteção, medição, transformação, que geralmente acontecem nas subestações (ONS, 2024).

Toda essa complexidade demandou a criação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em 1998 para garantir um fornecimento de energia contínuo, seguro e eficiente. Essa entidade é responsável por toda a coordenação, operação, planejamento e controle do SIN e tem o propósito de assegurar o fornecimento de energia no país, equilibrando qualidade, segurança e custo operacional (ONS, 2024).

De acordo com o Módulo 8 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (Prodist) da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), a subestação (SE) é o elemento do sistema de potência que engloba dispositivos de manobra, controle, proteção, transformação e outros equipamentos, incluindo condutores, acessórios, obras civis e estruturas de montagem. Ainda, o alimentador de distribuição é definido com a rede elétrica responsável pelo transporte de energia em média ou alta tensão da subestação até as unidades consumidoras (pontos de consumo de energia elétrica) (ANEEL, 2021c).

As subestações (SEs) desempenham um papel importante na infraestrutura elétrica, atuando como pontos de transição entre as redes de transmissão de alta tensão e os sistemas de distribuição de BT. Nas subestações, são feitas transformações, controles, proteções da energia de forma que ela chegue com segurança e qualidade aos usuários finais.

A Figura 10 mostra um exemplo de equipamentos instalados em uma SE de distribuição de energia. As subestações são localizadas ao longo da rede elétrica, em terrenos delimitados, possuem equipamentos instalados diretamente no solo, como transformadores, que ajustam os níveis de tensão, e disjuntores, que protegem o sistema contra sobrecargas e curtos-circuitos (FURNAS, 2024).

**Figura 10** - Exemplo de SE de distribuição de energia



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os alimentadores são circuitos elétricos ligados em MT, geralmente com 13,8 kV ou 34,5 kV, usados no transporte final da energia elétrica das subestações aos consumidores finais. Possuem origem nas subestações e são formados por condutores, postes, transformadores e chaves, percorrendo as ruas públicas de áreas urbanas e rurais, distribuindo energia para todos os pontos de consumo (residências, comércios, iluminação pública, serviços públicos e indústrias) de forma radial.

Na Figura 11 é mostrado um exemplo de alimentador montado sobre poste de concreto do tipo duplo T (formato padrão no estado do Paraná), com a presença de chave de manobra, condutores, cruzetas, isoladores e demais materiais para garantir o seu correto funcionamento.

Cada unidade consumidora recebe energia de apenas um alimentador, que geralmente passa em frente ao ponto de consumo. Quanto mais saídas de alimentadores nas subestações, melhor, pois evita que as cargas estejam ligadas todas em um mesmo trecho. Tendo mais alimentadores, é permitido o desligamento

parcial de apenas algumas quadras ou bairros, não impactando os demais consumidores (CEMIG, 2024).

**Figura 11** - Rede de distribuição (alimentador) com uma chave de manobra



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os alimentadores que formam o sistema de distribuição de energia possuem diversos dispositivos instalados no decorrer do seu trajeto, responsáveis pela transformação, proteção e manobra. Os equipamentos mais importantes são:

- Transformadores de Distribuição: são dispositivos responsáveis por reduzir a tensão dos alimentadores para níveis adequados ao consumo pelas unidades consumidoras. Eles são instalados em diversos pontos da rede e transformam a energia de MT para BT, geralmente 220 V ou 380 V, valores muito menores que a do alimentador, garantindo maior segurança para as pessoas e para os equipamentos elétricos (REZENDE, 2013).

- Seccionadores: são equipamentos de manobra utilizados para isolar circuitos elétricos, permitindo a realização de manutenção ou reparos sem a necessidade de desligar toda a rede de distribuição. Eles podem ser operados manualmente ou por meio de sistemas automatizados, facilitando a operação e a gestão das redes de distribuição (REZENDE, 2013).

- Disjuntores ou religadores automáticos: são dispositivos de proteção que interrompem automaticamente o fluxo de corrente elétrica em caso de sobrecargas ou curtos-circuitos. Eles são projetados para proteger os equipamentos e a integridade da rede de distribuição, prevenindo danos que poderiam resultar em longos períodos de interrupção de energia. Os religadores automáticos realizam as mesmas funções que os disjuntores, porém possuem uma programação adicional que faz ele restabelecer a energia automaticamente, sem intervenção humana, em um tempo configurável (REZENDE, 2013).

- Reguladores de Tensão: são equipamentos que ajustam automaticamente a tensão da rede de distribuição para manter níveis adequados de fornecimento de energia, compensando variações causadas por mudanças na carga ou condições climáticas. Eles são essenciais para assegurar que os consumidores recebam uma tensão estável e dentro dos limites estabelecidos pelas normas técnicas, evitando problemas como quedas de tensão ou sobretensões (REZENDE, 2013).

- Chaves Fusíveis: são dispositivos de proteção projetados para interromper o fluxo de corrente em caso de falhas (curtos-circuitos), devendo ser reativadas manualmente após inspeção do trecho com defeito e a substituição do fusível queimado. Com a passagem de uma corrente elétrica maior que o seu valor nominal, o elo fusível se funde, impedindo a passagem da corrente elétrica (REZENDE, 2013).

O aumento das ligações de geração distribuída diretamente nas redes de distribuição representa um enorme desafio para a operação e planejamento dos alimentadores. A característica de intermitência dessas fontes exige que os alimentadores sejam capazes de gerenciar fluxos de energia bidirecionais e equilibrar a oferta e a demanda em tempo real.

Entre os assuntos relevantes para uma correta operação do SEP, tem-se a necessidade de manter os transformadores dentro de condições ideais de temperatura. O excesso de temperatura é extremamente prejudicial ao funcionamento do transformador, reduzindo sua eficiência e podendo danificar seus

materiais isolantes, causando uma drástica redução da vida útil do equipamento. Uma sobretensão afeta a temperatura do equipamento, de forma indireta, por meio da variação no fluxo magnético (TERSARIOL, 2017).

O fluxo magnético é diretamente proporcional à tensão aplicada nos seus enrolamentos. Um aumento de tensão gera um aumento do fluxo magnético até o limite de saturação do material, resultando em distorções na forma de onda de corrente, aumento das perdas no núcleo (histerese e correntes parasitas) e maior geração de calor. O calor gerado pelas perdas magnéticas aumenta a temperatura do núcleo e dos enrolamentos (TERSARIOL, 2017).

#### 2.4. MÉTODOS DE CONTROLE DE TENSÃO (TRADICIONAIS X MODERNOS)

O controle de tensão desempenha um papel fundamental na estabilidade e na qualidade da energia elétrica, assegurando que os níveis de tensão permaneçam dentro dos limites operacionais adequados. Essa regulação afeta diretamente a qualidade e a segurança da rede, prevenindo oscilações que podem comprometer equipamentos e prejudicar consumidores. Para alcançar esse objetivo, foram desenvolvidas diversas técnicas ao longo do tempo, que podem ser classificadas em dois grandes grupos: os métodos tradicionais e os sistemas modernos (XU; TAYLOR, 2008).

Os métodos tradicionais são baseados em tecnologias consolidadas e amplamente utilizadas nos sistemas de potência. Eles atuam diretamente sobre equipamentos elétricos convencionais para regular os níveis de tensão, seja de forma passiva ou com um controle mais limitado. Entre as principais abordagens, destacam-se a regulação de *taps* em transformadores, o controle de potência reativa, o controle de tensão por geração e os reguladores automáticos de tensão (CORSI, 2015).

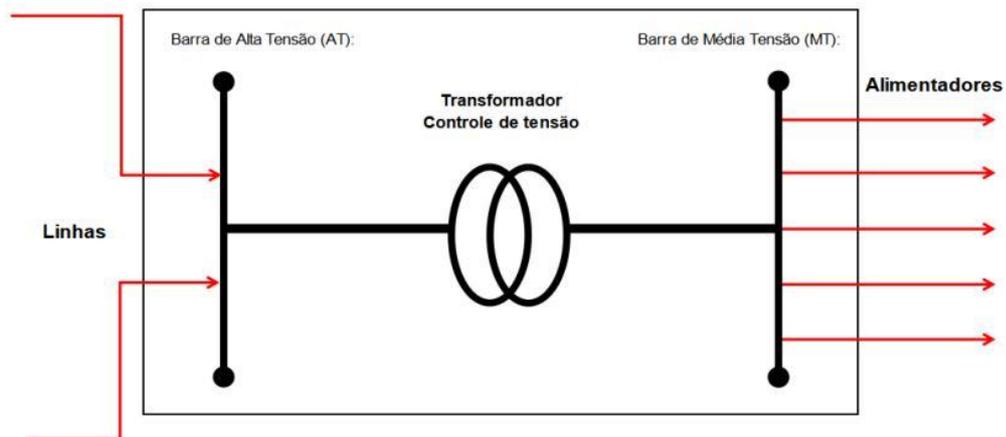
A regulação de *taps* em transformadores permite ajustar a relação de transformação por meio de comutadores que compensam variações de tensão. Esses ajustes podem ser realizados com o equipamento energizado, ou exigir o desligamento do transformador para alterações manuais. Essa técnica é amplamente utilizada em subestações para garantir a estabilidade da tensão. Já o controle de potência reativa se baseia no uso de bancos de capacitores e reatores

*shunt*, que suprem ou absorvem potência reativa conforme necessário, reduzindo quedas de tensão e melhorando o fator de potência (CORSI, 2015).

Nas usinas geradoras, os reguladores automáticos de tensão ajustam a excitação dos geradores para manter a tensão dentro dos limites desejados, sendo uma solução eficiente para sistemas interligados. Além disso, reguladores automáticos de tensão são empregados em redes de distribuição para compensar dinamicamente as variações de carga e assegurar a qualidade da energia fornecida (CORSI, 2015).

A Figura 12 apresenta um controle de tensão em subestação, realizado por meio da mudança do *tap* primário do transformador de potência, amplamente utilizado de forma tradicional.

**Figura 12 - Esquema de controle de tensão em uma subestação**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Apesar da ampla aplicação desses métodos, eles podem ter limitações quando há necessidade de respostas rápidas ou ajustes dinâmicos. Para superar esses desafios, foram desenvolvidos os sistemas modernos, baseados em eletrônica de potência, dando origem aos dispositivos FACTS, sigla em inglês para Sistemas Flexíveis de Transmissão em Corrente Alternada (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*). Esses sistemas representam uma abordagem avançada para o controle de tensão, utilizando componentes eletrônicos para oferecer respostas rápidas e dinâmicas às variações do sistema elétrico. Diferentemente dos métodos tradicionais, os dispositivos FACTS permitem um controle mais preciso do fluxo de potência e da regulação de tensão, aumentando a

capacidade de transmissão das linhas e melhorando a estabilidade do sistema (WATANABE, 2024).

Entre os principais dispositivos FACTS, destaca-se o SVC (*Static Var Compensator*), que controla a injeção ou absorção de potência reativa por meio de reatores e capacitores chaveados por tiristores. Essa tecnologia estabiliza a tensão rapidamente em resposta a variações de carga, reduzindo oscilações e aumentando a margem de estabilidade do sistema. Outro dispositivo importante é o STATCOM (*Static Synchronous Compensator*), que atua de maneira semelhante ao SVC, mas utiliza conversores eletrônicos para oferecer um controle ainda mais eficiente e rápido da potência reativa. O TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), por sua vez, ajusta a impedância aparente da linha de transmissão, melhorando a estabilidade e permitindo um controle mais preciso do fluxo de potência sem a necessidade de construção de novas linhas (WATANABE, 2024).

Ainda, o UPFC (*Unified Power Flow Controller*) se destaca como um dos dispositivos FACTS mais sofisticados, sendo capaz de controlar simultaneamente a tensão, a potência reativa e o fluxo de potência ativa. Ele combina um STATCOM com um conversor série, proporcionando um controle abrangente e dinâmico do sistema elétrico. Por fim, o DSTATCOM (*Distribution Static Synchronous Compensator*) é empregado para estabilizar a tensão, melhorar a qualidade da energia e mitigar problemas como afundamentos de tensão e distorções harmônicas, tornando-se uma solução eficaz para redes de média e baixa tensão (WATANABE, 2024).

Os sistemas FACTS apresentam diversas vantagens em relação aos métodos tradicionais, no entanto, sua implementação requer investimentos significativos e uma infraestrutura avançada de controle e monitoramento (WATANABE, 2024). Assim, a escolha entre métodos tradicionais e dispositivos FACTS depende das características e exigências específicas de cada sistema elétrico, levando em consideração fatores como custos, complexidade operacional e necessidade de flexibilidade no controle da tensão.

## 2.5. ESTUDOS EM SISTEMA ELÉTRICO

O fluxo de potência em sistemas elétricos é uma ferramenta que permite identificar os valores de tensão, ângulo de fase, potência ativa e reativa e corrente

de uma rede de distribuição de energia, em diversas condições de carga e geração. Esse estudo ajuda a identificar possíveis problemas que podem aparecer em um sistema real, como sobrecargas, sobretensão, subtensão ou possíveis falhas na rede. Também é útil para calcular as perdas de potência nas linhas de transmissão e transformadores (MONTICELLI, 1983).

Essa análise é baseada em cálculos que estimam como a energia flui de uma barra à outra, podendo ser resolvida por vários métodos numéricos conhecidos, sendo os mais utilizados os métodos de Gauss-Seidel (adequado para sistemas de menor porte), de Newton-Raphson (adequado para sistemas grandes) e de fluxo de potência desacoplado (adequado para reduzir cálculos em sistemas com muitas barras) (MONTICELLI, 1983).

Para os cálculos, é fundamental a definição dos tipos de barras do sistema, que mudam conforme as suas variáveis que podem ser conhecidas ou não. Os tipos de barras são:

- Barras de Geração (Barra PV): o gerador, por meio do ajuste de excitação, mantém constante a potência ativa ( $P$ ) e a magnitude da tensão ( $V$ ), ajustando a potência reativa ( $Q$ ) para alcançar o equilíbrio. Variáveis conhecidas: Potência ativa e Tensão em magnitude. Variáveis desconhecidas: potência reativa e ângulo de fase ( $\theta$ ) (MONTICELLI, 1983).

- Barras de Carga (Barra PQ): são pontos de carga no sistema, ou seja, locais onde a demanda de potência ativa ( $P$ ) e potência reativa ( $Q$ ) são conhecidas. Variáveis conhecidas: potência ativa e potência reativa. Variáveis desconhecidas: tensão de magnitude ( $V$ ) e ângulo de fase ( $\theta$ ) (MONTICELLI, 1983).

- Barras de Referência: são barras especiais usadas como referência para o cálculo de tensões e ângulos no restante do sistema, compensando também as perdas. Variáveis conhecidas: tensão em magnitude e ângulo de fase. Variáveis desconhecidas: potência ativa e potência reativa (MONTICELLI, 1983).

A modelagem dos componentes elétricos é fundamental para a simplificação da análise de suas influências na operação do sistema em diferentes condições, usadas na análise de fluxo de potência em sistemas elétricos

(NASCIMENTO, RAMOS E LORETO, 2019). Entre os principais componentes que formam o sistema, tem-se os transformadores, geradores, condutores e sistemas fotovoltaicos. Cada um desses componentes possui características específicas que exigem abordagens particulares de modelagem para representar corretamente seu comportamento, como segue:

- Transformadores: na modelagem de transformadores, tem-se como principal parâmetro a impedância percentual, representada por  $Z\%$ . A impedância percentual indica a relação entre a tensão nominal que deve ser aplicada em um enrolamento para que circule a corrente nominal, quando o outro enrolamento é curto-circuitado. Essa medida é usada para determinar as quedas de tensão e de potência durante seu funcionamento.
- Geradores: são modelados para fornecer energia ativa e reativa ao sistema, utilizando parâmetros como a resistência do rotor, a indutância do estator e a constante de tempo da máquina. Também serve para ajudar a garantir a estabilidade do sistema.
- Condutores: são modelados com base em suas propriedades elétricas, resistência, indutância e capacitância, que em conjunto formam sua impedância. A modelagem de sistemas elétricos considera além das características físicas e construtivas dos condutores (tipo de material, seção, etc.), mas também a distância entre eles e o tipo de isolamento (NASCIMENTO, RAMOS E LORETO, 2019).

A representação de uma grandeza feita por unidade (PU) é uma forma de simplificar os cálculos, especialmente em sistemas grandes e complexos. Nesse método, as grandezas elétricas, como tensão, corrente e potência, são expressas em frações ou percentuais em relação aos valores base previamente definidos. Essa normalização de valores elimina a necessidade de trabalhar com unidades absolutas, que podem variar significativamente entre diferentes equipamentos e faixas de tensão, fazendo ser única em todo o trecho estudado e permitindo a comparação entre diferentes partes (GOMES, 2012).

Os sistemas desequilibrados são caracterizados por apresentarem diferenças de corrente e/ou tensão entre as fases (funcionando de forma não

equilibrada), podendo ocorrer nas grandezas de magnitude ou ângulo. Esses desequilíbrios podem ser causados pela ligação de cargas monofásicas, por erros na distribuição de circuitos de alimentação ou ainda por falhas técnicas em componentes do sistema. A identificação e controle do desequilíbrio são fundamentais para garantir o bom funcionamento do sistema e reduzir sobrecargas e desgastes prematuros (SEVERO E GOMES, 2019).

O método das componentes simétricas é utilizado para converter valores desequilibrados em outros simétricos e equilibrados, facilitando a identificação e resolução de problemas. Ao separar as componentes em positivas, negativas e zero, esse processo simplifica os cálculos de fluxo de potência desequilibrados, sendo fundamental na análise de sistemas elétricos (SIQUEIRA, 2017).

A simulação e o cálculo do fluxo de potência podem ser realizados de forma mais rápida e eficiente por meio de programas computacionais desenvolvidos com essa finalidade. Esses programas utilizam em seu código fonte os métodos descritos anteriormente, simplificando os cálculos (SIQUEIRA, 2017).

Há inúmeras opções populares no mercado, como por exemplo: PSS/E, MATLAB/Simulink, ANAREDE/Cepel, Simulight/COPPE/UFRJ, OpenDSS, GridLAB-D, OpenModelica. Um dos aplicativos mais usados por concessionárias de energia, universidades e pesquisadores é o ANAREDE. Desenvolvido no Brasil, ele é utilizado para análise de redes elétricas em regime permanente, permitindo a avaliação do fluxo de potência, perdas no sistema e comportamento das tensões nos diversos pontos da rede (CEPEL, 2024).

## 2.6. QUALIDADE DE ENERGIA

A Qualidade de energia abrange a realização de medições frequentes das variáveis de energia para comparação com valores padronizados dentro de uma faixa considerada aceitável. Há uma variedade de tipos de distúrbios individuais que podem acarretar perdas permanentes ou momentâneas da qualidade de energia. Cada vez mais, os agentes participantes do sistema estão preocupados com a qualidade da energia elétrica, adotando uma abordagem sistêmica em vez de problemas individuais e isolados (DUGAN et al., 2003).

Na ligação de geração distribuída, há uma preocupação em garantir a qualidade de fornecimento de energia, por meio da instauração de procedimentos

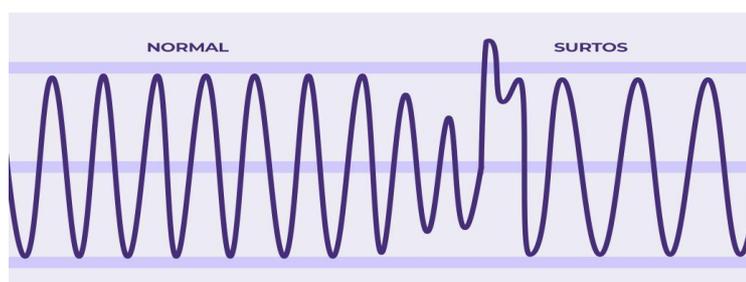
que devem ser adotados por todos envolvidos (consumidores, usinas, distribuidoras, transmissoras e ONS). Nesse contexto, a distribuidora é a principal responsável por garantir que as instalações internas dos consumidores não causem problemas ao sistema elétrico (ANEEL, 2021a).

Com uso de indicadores de referência, medição adequada e gestão dos serviços, é possível manter padrões de controle em relação ao atendimento da qualidade do produto (conformidade da onda de tensão), à qualidade do serviço (continuidade do fornecimento de energia elétrica) e à qualidade comercial (tratamento das demandas dos consumidores em prazos adequados) (ANEEL, 2021a).

Conforme o Módulo 8 do Prodist da Aneel (2021), os distúrbios nas redes de distribuição são classificados de acordo com sua duração (intervalo de tempo), sendo divididos em fenômenos de regime transitório e fenômenos de regime permanente.

A Figura 13 ilustra a ocorrência de um típico surto de tensão de regime transitório, sendo um exemplo de um dos distúrbios de qualidade possíveis de acontecer nas redes de distribuição.

**Figura 13** - Distúrbio de qualidade na tensão de fornecimento



Fonte: LOGMASTER, 2024.

Os problemas transitórios, chamados de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD), possuem tempo de permanência de menos de 3 minutos. Esses distúrbios são causados por interrupções de emergência, operações de chaveamento e manobras, além da energização/desenergização de grandes cargas (ANEEL, 2021c). De acordo com o Módulo 8 do Prodist da Aneel (2021), os problemas permanentes, que persistem por mais de 3 minutos de forma contínua, afetam o produto (forma de onda da tensão).

Essas falhas são divididas em:

- Variações nos níveis de tensão: é identificada pela diferença entre a tensão medida no ponto de conexão e os níveis de tensão esperados (padronização). As faixas encontradas são classificadas em adequada (tensão desejada), faixa precária (tensão tolerável) e faixa crítica (fora do tolerável).
- Baixos fatores de potência: o controle do fator de potência (relação entre potências ativa e reativa) é necessário para garantir uma maior eficiência do sistema elétrico. Um baixo fator de potência acarreta sobrecargas e desperdícios de energia.
- Distorções harmônicas: as harmônicas são frequências indesejadas no sistema elétrico, múltiplas da senoidal fundamental, que causam deformações nas formas originais da onda das tensões e correntes.
- Desequilíbrios de fases: é a presença de diferença nos valores de fase ou ângulo entre as três tensões do sistema trifásico.
- Flutuação nos níveis de tensão: é a variação aleatória dos valores da tensão, gerando o efeito indesejado da cintilação luminosa nos dispositivos elétricos (exemplo: lâmpadas do consumidor).
- Variações nos valores de frequência: é a alteração na frequência da corrente elétrica alternada, que normalmente é mantida constante, causadas devido às flutuações na demanda de energia ou aos distúrbios na rede elétrica (KHOSILJONOVICH, 2016).

Com a popularização da GD, algumas subestações de distribuição estão apresentando uma inversão de fluxo de potência em seus alimentadores. Causado pelo excesso de energia gerada, sem haver carga suficiente para seu consumo, esse efeito pode implicar em problemas de qualidade de energia (NGUYEN; TURITSYN, 2014). Com isso, no momento da conexão de uma nova GD, a

distribuidora é responsável por criar opções para a solução do problema. As ações incluem o remanejamento de carga entre subestações, a mudança no ponto ou na tensão de conexão, a limitação da potência de geração (objeto desse estudo) e a restrição de dias e horários para injeção de energia na rede (ANEEL, 2021a).

## 2.7. EXPLORAÇÃO DO TEMA

O foco é a identificação do estado da arte atual, a relevância do tema proposto e a identificação de lacunas no conhecimento. Com isso, fornecer uma base sólida para a condução do estudo e contribuir para o desenvolvimento de soluções mais eficazes na mitigação dos atuais problemas encontrados.

São abordados temas relacionados com a estabilidade do sistema, qualidade da energia e estratégias de correção, sempre discutindo as formas de solução disponíveis e principalmente os desafios associados, proporcionalmente ao crescimento da disponibilidade de energia de fontes renováveis.

As pesquisas são apresentadas de forma cronológica para mostrar a evolução na discussão ao longo dos anos e, também para indicar que os problemas começaram a ser estudados há um bom tempo, principalmente em outros países pioneiros nessa forma de geração de energia, e mesmo assim continuam atuais e necessários. Nesse contexto, é evidente que esse é um campo cada vez mais relevante no setor elétrico.

No ano de 2004 já há registros de preocupação com o tema feitos por Marques et al. (2004), que indicaram que problemas técnicos poderiam aparecer com a inclusão de GDs em redes de distribuição que não foram concebidas inicialmente para escoar fluxos de geração, mas sim para atendimento de carga, em um sentido único de fluxo de atendimento. Neste trabalho, são citados como pontos de atenção as sobretensões em carga leve, os impactos na coordenação da proteção, e problemas de estabilidade dinâmica. Ainda, pode ser notado que a elevação dos valores de tensão, principalmente quando a carga está leve, pode ser um fator limitante para a quantidade e potência disponível para a GD, sendo indispensável seu estudo prévio.

De acordo com Dias (2005), os inversores usados no sistema fotovoltaico geram correntes com frequências harmônicas devido a sua conversão de corrente contínua em alternada. Em determinados valores de impedância do sistema

(variando conforme a frequência da onda) podem ser geradas variações de tensão adicionais no ponto de conexão. O estudo ainda indica como problemas o baixo fator de potência (circulação de energia reativa), como consequência de inversores operando com fator de potência unitário (geração apenas de potência ativa) e a dependência das placas solares em relação à intensidade da radiação solar instantânea, criando variações instantâneas na potência fornecida pelo gerador às cargas, afetando diretamente a intensidade dos geradores das usinas centralizadas e do fluxo nos alimentadores.

De acordo com Santos e Santos (2008), as desvantagens da GD estão mais relacionadas ao aumento da complexidade no planejamento e na operação do sistema elétrico, exigindo uma completa reestruturação dos setores administrativo, técnico e comercial. Por fim, os autores indicam uma preocupação com a redução do uso das instalações existentes de geração centralizada, transmissão, distribuição, gerando uma tendência de aumento no custo da energia por redução da taxa de utilização.

O artigo de Raugei e Frankl (2009) na revista Energy aborda os impactos ambientais e os custos associados aos sistemas fotovoltaicos ao longo de seu ciclo de vida. Afirma que, devido ser tecnologia nova e com rápida mudança, a tendência de instalação de sistemas fotovoltaicos tem apresentado diversas previsões desconhecidas, gerando grande incerteza sobre o seu futuro. Os autores ainda indicam que para atendimento das previsões otimistas, é inevitável a existência de políticas ambientais por parte dos governos e das empresas privadas, com esquemas de incentivos econômicos para o setor.

Também para Shah et al. (2012), a instabilidade de tensão é apresentada como uma das principais ameaças à operação segura dos sistemas elétricos, dando grande ênfase na preocupação sobre como manter a estabilidade da energia, principalmente em condições de abalos das condições de operação normal, com a presença robusta de geração distribuída. Os autores indicam que os problemas são causados por alterações rápidas e inesperadas das condições operacionais, como alterações severas de patamar de carga ou de geração, o que muitas vezes causa uma resposta indevida dos sistemas de controle automático de compensação de tensão e/ou frequência.

A pesquisa de Dall'Anese et al. (2013) em sistemas residenciais com sistemas fotovoltaicos, indica uma grande preocupação com a qualidade da energia

e a confiabilidade elétrica. O estudo mostra a importância do controle ativo e reativo para garantir a regulação de tensão e para isso discute métodos de otimização da operação dos inversores fotovoltaicos, um tema que continuaria a ser relevante nas investigações até os dias atuais. Essa época pode ser considerada um marco na matriz energética brasileira, pois com a publicação da Resolução Normativa nº 482, em 17 de abril de 2012 pela Aneel, houve oficialmente um incentivo às fontes de geração renováveis instaladas de forma distribuída no país, ocasionando uma busca por esses equipamentos (Aneel, 2012).

Avançando no tempo, o autor Saleh (2017) explorou os efeitos da crescente adoção de sistemas fotovoltaicos sobre as redes elétricas, discutindo tanto os benefícios quanto os desafios associados à integração desses sistemas. O estudo ressaltou que a capacidade de geração fotovoltaica pode levar a fluxos de potência reversos e flutuações de tensão, complicando a operação das redes de distribuição.

No ano seguinte, o estudo de Ainah (2018) focou na mitigação da elevação de tensão em redes de distribuição de BT, abordando as consequências da penetração descontrolada de inversores fotovoltaicos e propondo estratégias de redução de potência ativa, prevenindo problemas de qualidade de energia. Em Zafarani et al. (2018), tem-se um complemento na discussão, à medida que são integrados os dados meteorológicos na previsão da geração de energia fotovoltaica. A difícil previsibilidade da geração solar, um dos maiores problemas dessa tecnologia, é um fator crítico que afeta a operação e a estabilidade das redes elétricas.

Em 2019, foram criados estudos voltados para as alternativas que evitam a injeção de energia na rede em determinados horários considerados de pico. O autor Ariyaratna (2019) conduziu uma pesquisa sobre o controle coordenado de usinas fotovoltaicas e de armazenamento de energia, evidenciando os benefícios da redução da demanda de pico e da mitigação de fluxos de potência reversos. São discutidas metodologias para reduzir flutuações na tensão da rede, propondo um sistema híbrido que combina armazenamento em bateria e supercapacitores. A pesquisa enfatiza a importância de otimizar o tamanho do sistema de armazenamento para garantir a estabilidade da tensão e minimizar as variações da geração solar.

Os autores Barzegkar-Ntovom et al. (2019) também abordaram a viabilidade de sistemas de armazenamento de energia em baterias acoplados a sistemas fotovoltaicos, discutindo como essa integração pode ajudar a mitigar problemas técnicos decorrentes da alta quantidade de geração solar durante o dia.

A análise de Khan (2019) sobre sistemas de energia renovável integrados e redes inteligentes também contribui para a compreensão dos desafios enfrentados nas estações de carregamento de veículos elétricos. O autor sugere que a implementação de políticas de preços variáveis pode ajudar os usuários a gerenciar melhor o uso da energia elétrica. Essa pesquisa ressalta a importância de um sistema de gestão de energia que considere as interações entre a geração renovável e a demanda, especialmente em contextos em que a saturação da rede pode levar a reprovações de solicitações de conexão.

De acordo com Gandhi et al. (2020), quanto mais tem-se a expansão da instalação de GD, mais tem-se impactos nos sistemas de energia, e como consequência direta, maior imposição de restrições técnicas sobre a capacidade máxima permitida. Os autores afirmam que as redes elétricas tradicionais, concebidas para um modelo centralizado de geração de energia, agora precisam se adaptar à crescente integração de sistemas fotovoltaicos distribuídos.

Para You (2021), o impacto da alta penetração de sistemas fotovoltaicos impacta de forma negativa nos momentos de oscilações de grandes redes de energia. O autor revela que o aumento da geração solar pode reduzir a capacidade de amortecimento dessas variações, o que pode levar a falhas maiores, em cascata. Este estudo deixa evidente a necessidade de estudos aprofundados sobre como a dinâmica das redes elétricas e como altos percentuais de geração do tipo fotovoltaica podem contribuir para uma maior fragilidade da estabilidade.

Nessa época, tem-se o desenvolvimento de estudos brasileiros que adicionam à discussão os problemas locais. De acordo com Soares e Barreto (2022), apesar do grande desenvolvimento da GD que está sendo vivenciado e este ser um tema de interesse estratégico, as diretrizes seguidas pelo Brasil ainda são insuficientes em relação ao incentivo a essa forma de energia limpa. Os autores afirmam que há a presença de conflitos de interesse, disputas e resistências entre os setores atuantes, muitas vezes, com foco total em questões monetárias, gerando retrocesso aos incentivos para a expansão de GD. As mudanças frequentes nas

políticas e regulamentações podem dificultar o desenvolvimento e a expansão da geração distribuída, trazendo incertezas para investidores e consumidores.

De acordo com Dutra Vivenza e Matos (2022), a Aneel frequentemente busca a revisão das regulações, muitas das vezes trazendo ameaças para os consumidores que investem em GD. A elevação de custos e a imposição de limites de compensação acarretam um risco de violação do princípio da segurança jurídica, aumentando os riscos e a dificuldade no planejamento das atividades.

De acordo com Almeida e Almeida (2022), há uma preocupação relacionada a um possível aumento da degradação do meio ambiente devido à necessidade de grandes áreas livres para a instalação das placas fotovoltaicas, a fim de atender à crescente busca por essa forma de energia. Os autores sugerem que sejam aproveitados os espaços disponíveis e já construídos, como telhados de edificações ou estacionamentos, para reduzir novos impactos ambientais.

Por fim, mais recentemente, tem-se uma preocupação também com os aspectos de viabilidade econômica e financeira, com indicação da necessidade de revisão das políticas de incentivos e subsídios, de forma que possa ser garantida a sustentabilidade desse sistema. Nesse contexto, os autores Pena-Bello et al. (2023), discutem como a implementação de tarifas alternativas pode equilibrar os interesses dos agentes operadores de sistemas de distribuição com a economia gerada pelos sistemas fotovoltaicos, propondo uso de regras tarifárias que considerem as particularidades dos sistemas renováveis.

Considerando as pesquisas realizadas, nota-se que há uma grande preocupação com os problemas que podem aparecer com a instalação de GD no sistema elétrico. Esse receio é de todos os agentes envolvidos nas várias etapas do processo, e envolvem assuntos multidisciplinares, que vão desde os riscos à qualidade, estabilidade e confiabilidade, passando por problemas ambientais, financeiros e econômicos, até pela presença de uma baixa segurança regulatória e jurídica (burocrática).

Verificando a amplitude dos temas discutidos que são potenciais fatores limitantes para a expansão da GD, ficou evidente a necessidade de restringir o horizonte do trabalho. Nos requisitos técnicos de desempenho, chamam a atenção os problemas envolvendo a tensão (frequência, oscilações, variações etc.) e as perdas de energia (harmônicos, baixos fatores de potência etc.). Com isso, a

proposta do estudo está relacionada com os impactos na qualidade do fornecimento de energia, como sendo um grande fator limitante para a expansão.

Ainda, foi identificado que há algumas lacunas de conhecimento não profundamente exploradas na literatura existente, reforçando a necessidade de mais pesquisas direcionadas para abordar as questões críticas. A análise das lacunas sobre os impactos da instalação de sistemas fotovoltaicos na qualidade do fornecimento de energia revela uma série de desafios que ainda precisam ser explorados.

Os documentos analisados indicam que a maioria dos estudos ainda se concentra em questões teóricas, deixando de lado a implementação prática. As estratégias de mitigação existentes são discutidas, mas a pesquisa aponta que muitas delas ainda não foram suficientemente testadas em cenários reais, revelando uma lacuna significativa na aplicação prática.

Os materiais possuem uma carência de análise das interações complexas entre as diferentes fontes de energia e a dinâmica da rede elétrica e como otimizar essa integração para garantir a estabilidade do sistema. Não abordando em detalhes como diferentes condições de carga e irradiação podem afetar os limites de estabilidade das redes. A variabilidade da geração solar, devido a fatores como nuvens e sujeira, representa uma preocupação não resolvida.

Também pode-se notar que a integração de tecnologias de armazenamento de energia pode ajudar a mitigar problemas de qualidade de energia. No entanto, as implicações de longo prazo dessa integração nas redes de distribuição ainda não foram suficientemente exploradas e regulamentadas.

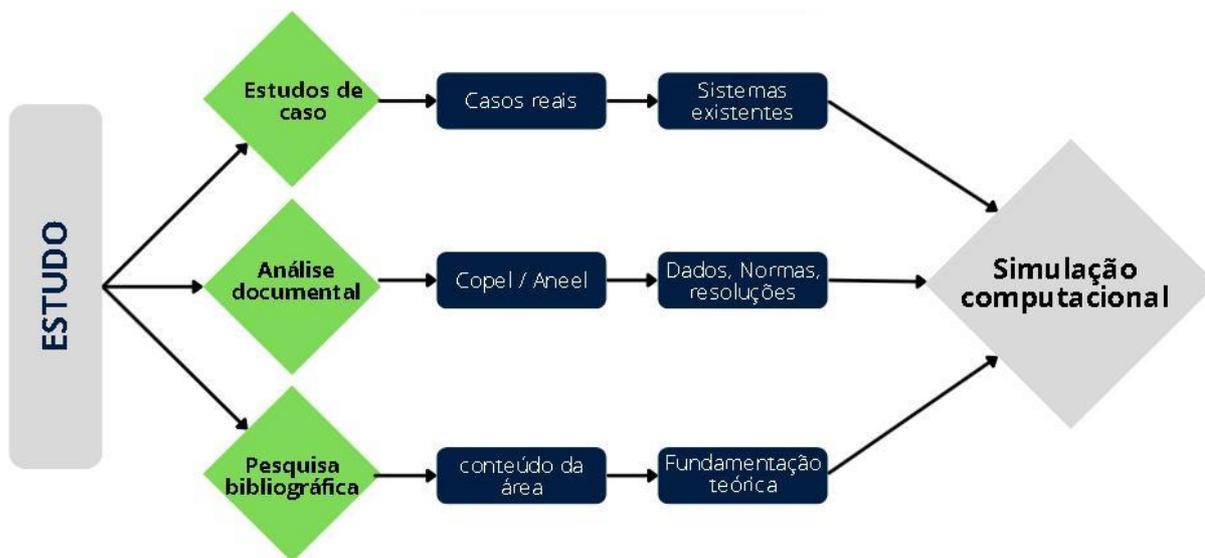
Por fim, pode-se citar a falta de uma análise detalhada sobre a relação das impedâncias de uma rede de distribuição (alimentador) com a existência de pontos de sobretensão em locais com a presença de GD. Também sobre o comportamento da tensão na rede e na SE e sobre as influências das distorções harmônicas e baixo fator de potência.

### 3. METODOLOGIA

Nesse t3pico, s3o apresentados os m3todos adotados na pesquisa, explicando as etapas e t3cnicas realizadas para a coleta e an3lise dos dados, indicando de forma detalhada os recursos e as estrat3gias utilizadas na execu3o do estudo.

A Figura 14 apresenta um esquema simplificado representando as principais etapas utilizadas na metodologia adotada para a elabora3o do estudo. O desenvolvimento do trabalho iniciou pela busca de informa3es e conhecimentos relevantes alinhados aos objetivos definidos. Em um primeiro momento, foi realizada a pesquisa bibliogr3fica em conte3do da 3rea el3trica em literatura t3cnica e cient3fica especializada, buscando a base para a fundamenta3o te3rica e conceitual do trabalho.

Figura 14 - Esquema da metodologia utilizada



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na sequ3ncia, foi realizada uma an3lise documental das concession3rias de energia el3trica e da ag3ncia reguladora nacional. Essa etapa 3 fundamental para a forma3o de um banco de dados com as principais normas e regula3es vigentes, possibilitando a identifica3o das regras e crit3rios operacionais dos sistemas el3tricos.

Por fim, foi realizado o estudo de caso das especificações de um alimentador padrão de uma SE de distribuição, com foco em identificar e avaliar as condições operacionais de sistemas específicos, garantindo uma abordagem sistemática para a resolução dos problemas identificados.

Com o exposto, foi desenvolvida uma proposta de experimentos, visando compreender a variação de qualidade e desempenho em um sistema elétrico em regime estacionário, considerando diferentes cenários de geração e/ou configuração da rede de distribuição.

Para alcançar esse objetivo, foi planejada a realização de simulações computacionais utilizando um alimentador de distribuição de energia padrão especificado. O procedimento experimental foi dividido em quatro fases principais: definição de alimentador, definição de software e cenários de simulação, modelagem e simulação e análise de resultados.

Primeiramente, foi necessário a análise das características técnicas de alimentadores conforme padrões definidos por norma na empresa de energia local. Esses dados são necessários para a escolha do alimentador, de forma que represente o sistema elétrico adequadamente em relação à quantidade de clientes, carga instalada e demandada, tipos de condutores, comprimento, impedâncias equivalentes etc. Além do alimentador padrão, foram definidas as características adicionais que são relevantes na modelagem do sistema elétrico, entre elas: transformadores, circuitos de BT, fontes de geração, subestações, cargas fixas. As especificações técnicas dos componentes foram obtidas a partir de folha de dados (*datasheets*) e manuais fornecidos pelos fabricantes e normas técnicas vigentes da concessionária de energia, assegurando a precisão das simulações.

Na sequência, foram analisadas as opções de softwares disponíveis no mercado para simulação de sistemas elétricos. Como cada um possui suas próprias características e capacidades, devendo ser escolhido aquele com melhor custo-benefício, desde que atenda às necessidades específicas do trabalho. O software escolhido para as simulações foi o ANAREDE, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Esse programa foi selecionado devido à sua robustez e precisão nas análises de redes elétricas (CEPEL, 2024).

A escolha desse software também se deve à disponibilidade de diferentes versões de licença disponíveis, incluindo educacionais para uso em instituições de

ensino e pesquisa, comerciais para empresas do setor elétrico e governamentais para uso em projetos de infraestrutura pública.

Outra definição é com relação aos cenários de simulação que serão considerados no estudo. Foram definidos os níveis percentuais de penetração de GD que serão considerados, as variações da potência de GD, a variação nos pontos de localização das GDs (pontos de conexão) em relação à SE, os valores de carga (consumo) e de suas localizações no alimentador. Todos esses cenários devem representar as condições reais que podem gerar as variações na qualidade da energia.

Com a definição do software e dos cenários, foram realizadas as simulações detalhadas seguindo a proposta. Durante as simulações, foram monitorados os parâmetros importantes, como tensão, corrente, frequência e estabilidade nos pontos de interesse, além de eventuais itens adicionais como fator de potência, frequências harmônicas, perdas de energia, identificando os principais impactos da variação da qualidade da energia no sistema elétrico.

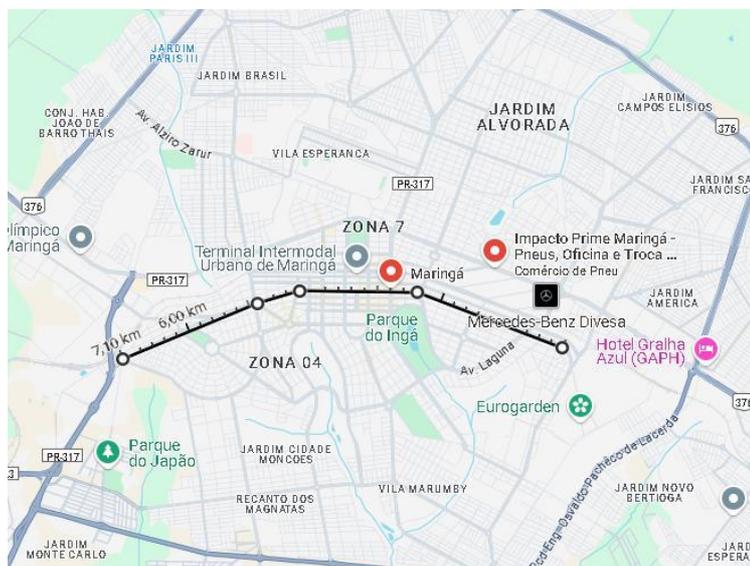
A infraestrutura computacional utilizada para as simulações é composta por computadores pessoais de médio desempenho, com processadores Intel Core I5 e memória RAM de no mínimo 4 GB, sem necessidade de recursos avançados, pois não foi necessário executar simulações complexas e processar grandes volumes de dados. Softwares adicionais como Microsoft Excel e Word foram utilizados para criação de um passo a passo orientativo e *check-list* para controle das etapas da tarefa prevista, com alimentação dos dados, itens de verificação, variações na modelagem e coleta, tabulação, visualização e análise de resultados.

Com base nesse planejamento de experimentos, para a simulação, a escolha do alimentador é fundamental para garantir a representatividade e a abrangência dos resultados. Visando abranger os variados cenários possíveis, os critérios adotados para escolha foram:

a) Localização geográfica: considerando ser a cidade sede da universidade e uma área de amplo conhecimento dos envolvidos, foi definido que a região central de Maringá no estado do Paraná seria o local ideal para a existência do alimentador em estudo.

b) Traçado físico: considerando o centro da cidade de Maringá, foi utilizado o traçado do alimentador seguindo o trajeto inteiro de uma das avenidas principais da cidade (av. Brasil). Na Figura 15 do sistema de mapas do Google, é possível identificar a medição realizada, chegando à conclusão que toda sua extensão possui cerca de 7,1 km de comprimento, valor adotado com extensão para o alimentador.

**Figura 15 - Medida da avenida Brasil - cidade de Maringá-PR**



Fonte: GOOGLE, 2024.

c) Perfil de Carga: considerando que o tipo de carga escolhido não apresenta impactos aos resultados, foi escolhido como padrão um alimentador com predomínio de cargas residenciais de médio e baixo padrão.

d) Quantidade de consumidores: em uma estimativa de 30 consumidores por quadra da avenida (100 metros), pode-se definir que o alimentador fictício possui algo próximo de 2100 unidades consumidoras em sua extensão.

e) Carga demandada: estimando uma demandada de 1,95 kW por unidade consumidora, suficiente para atender os principais equipamentos de uma residência padrão, tem-se o total de 4100 kW. Para o fator de potência habitual da rede de distribuição de 0,92, tem-se ainda que esse alimentador demanda 1747 kVA de potência reativa, com total de 4457 kVA de potência aparente.

f) Tensão nominal: considerando que alimentadores de distribuição em MT no estado do Paraná possuem tensões nos valores de 13,8 kV e 34,5 kV, conforme os padrões habituais de tensão da concessionária local, foi escolhida a tensão de 13,8 kV para uso no alimentador em estudo.

g) Tipo de condutores: os alimentadores são construídos com diferentes tipos de condutores, como material (cobre e alumínio), isolamento (nu e protegido), seção transversal (diferentes “bitolas”), a definição seguiu a norma técnica da concessionária local. Com isso, foi escolhido o condutor CAA 04 AWG, de material do tipo alumínio nu com alma de aço, de aproximadamente 21 mm<sup>2</sup> de seção transversal, condizente com a capacidade de condução e padrão de montagem de um alimentador desse porte (COPEL, 1999).

A Tabela 1, desenvolvida com base na norma da concessionária local, representa as características técnicas de impedância para os cabos mais usados na rede de distribuição e que será usado como base para os cálculos de fluxo de potência nas simulações.

**Tabela 1** - Características técnicas de condutores de alumínio

<b>Seção</b>	<b>Especificação</b>	<b>Material</b>	<b>Raio (mm)</b>	<b>Resistência (Ohm/Km)</b>	<b>Reatância (Ohm/Km)</b>
04	AWG	Alumínio	1,39	1,354	0,502
02	AWG	Alumínio	2,69	0,870	0,453
2/0	AWG	Alumínio	3,81	0,434	0,426
4/0	AWG	Alumínio	4,81	0,273	0,409
336,4	MCM	Alumínio	6,40	0,173	0,387

Fonte: Adaptado de COPEL, 1999.

Considerando as características típicas descritas, foram definidas todas as variáveis necessárias para a simulação do alimentador, objeto do estudo. Essa rede é fictícia, no entanto reflete de forma simulada um possível caso real, pois toda sua especificação é real/existente.

Para melhorar o acompanhamento das variações de tensão ao longo do alimentador, foram criadas 10 barras (uma na SE e nove barras de carga). As oito

primeiras barras são ligadas por trechos de rede de mesmo comprimento, permitindo uma análise linear da distribuição de tensão. A barra 9 representa o ponto de entrega de uma UC ligada ao alimentador, sendo utilizado um ramal de 100 metros (menor que os demais), representando o ramal de ligação (condutores entre a rede da concessionária e o ponto de entrega). A barra 10 representa a BT e está conectada por meio da interligação de um transformador.

Nas Tabelas 2 e 3, são descritas as principais características do alimentador estudado. Na Tabela 2, tem-se informações que representam o perfil de carga e a topologia das redes estudadas. Na Tabela 3, são apresentados os parâmetros técnicos, como comprimento das linhas, tipo de condutores utilizados e o nível de tensão de operação. A análise comparativa dessas características é fundamental para a verificação da fidelidade real da rede escolhida, contribuindo significativamente para a simulação em diferentes cenários.

**Tabela 2** - Características de carga/localização

<b>Alimentador</b>	<b>Localização</b>	<b>Tipo de carga</b>	<b>Demanda (kVA)</b>	<b>Fator de potência</b>
A	Urbana	Residencial	4457	0,92

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Tabela 3** - Características técnicas/construtivas

<b>Ligação</b>	<b>Tensão nominal (kV)</b>	<b>Tipo condutor</b>	<b>Dist. (km)</b>	<b>Resistência (ohm/km)</b>	<b>Reatância (ohm/km)</b>
1-2	13,8	CAA 04 AWG	1,00	1,354	0,502
2-3	13,8	CAA 04 AWG	1,00	1,354	0,502
3-4	13,8	CAA 04 AWG	1,00	1,354	0,502
4-5	13,8	CAA 04 AWG	1,00	1,354	0,502
5-6	13,8	CAA 04 AWG	1,00	1,354	0,502
6-7	13,8	CAA 04 AWG	1,00	1,354	0,502
7-8	13,8	CAA 04 AWG	1,00	1,354	0,502
8-9	13,8	CAA 04 AWG	0,10	1,354	0,502

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, para representar a rede de BT, foi incluído um transformador no final do alimentador, permitindo simulações de injeção em seu secundário. Na

Tabela 4 estão as especificações do transformador usado no início da simulação e que novamente segue o padrão de mercado.

**Tabela 4** - Características técnicas/construtivas do transformador

TF	Tensão nominal (kV)	Secundário nominal (V)	Impedância Z (%)
1	13,8	220	5

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nas Tabelas 5 e 6 são informados os ajustes implementados no software para simulação do alimentador. Pode-se verificar na Tabela 5 que a barra de referência foi definida como sendo a SE da distribuidora, no início do alimentador, local onde será feito o controle de tensão.

As demais barras são todas de carga, do tipo PQ (potência ativa e reativa) conforme padrão de simulação.

Por fim, a última barra é ligada no secundário do transformador, portanto sendo uma barra que representa a carga ligada na BT, permitindo acompanhar a influência de transformadores de distribuição no fluxo de potência. Na Tabela 6, tem-se os valores bases usados nos cálculos dos valores por unidade (PU), facilitando os cálculos computacionais de fluxo de potência envolvidos na simulação. Ainda se tem os limites máximos e mínimos desejados para a tensão que serão considerados no estudo.

**Tabela 5** - Modelagem de simulação computacional

Barra	Identificação	Tipo	Tensão nominal (kV)	Carga (kW)	Carga (kVAr)
1	SE	Referência	13,8	500	213
2	Carga1	PQ	13,8	500	213
3	Carga2	PQ	13,8	500	213
4	Carga3	PQ	13,8	500	213
5	Carga4	PQ	13,8	500	213
6	Carga5	PQ	13,8	500	213
7	Carga6	PQ	13,8	500	213
8	Carga7	PQ	13,8	500	213
9	Entrega	PQ	13,8	-	-
10	BT1	PQ	220V	100	43

Fonte: Elaborada pelo autor.

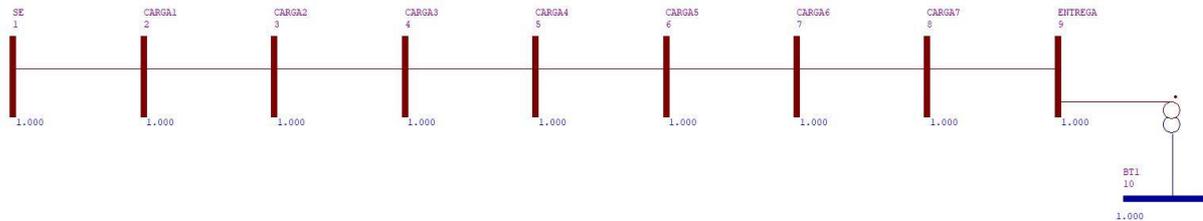
**Tabela 6** - Valores base definidos para o fluxo de potência

Valores de base		Mínimo (kVA)	Máximo (kVA)	Mínimo (pu)	Máximo (pu)
Tensão (kV)	13,8	12,84	14,49	0,93	1,05
Corrente (A)	4183,70	-	-	-	-
Potência (MVA)	100	-	-	-	-
Z (ohms)	1,9044	-	-	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com todos os dados definidos, foram inseridos os elementos e especificações no software de simulação, gerando o diagrama da Figura 16.

**Figura 16** - Padrão de simulação no Anarede/Anafas



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quanto aos cenários de simulação, foram definidas diversas situações possíveis (reais) no alimentador, com o objetivo de avaliar a influência da GD conectada a eles de diferentes formas. Na Tabela 7, foi gerado um resumo para demonstração de cada uma das condições criadas para simulação, permitindo a comparação dos resultados obtidos e a identificação da inter-relação entre essas variáveis.

**Tabela 7** - Cenários de simulação

Identificação	Tensão (pu)	Condição de Geração	Condição de Materiais
Cenário 1	1,00	Sem GD	Padrão - sem alteração
Cenário 2	1,06	Sem GD	Padrão - sem alteração
Cenário 3	1,06	120 kW - barra 10	Padrão - sem alteração
Cenário 4	1,06	500 kW - barra 10	Padrão - sem alteração
Cenário 5	1,06	500 kW - barra 10	Alteração de TF
Cenário 6	1,06	500 kW - todas barras	Padrão - sem alteração
Cenário 7	1,00	1000 kW - todas barras	Padrão - sem alteração
Cenário 8	1,00	1000 kW - todas barras	Alteração de condutores

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o exposto, temos as seguintes características para cada um dos cenários de simulação propostos:

- Cenário 1 - (base): operação sem nenhuma GD conectada, apenas carga. Usado como base de comparação com os demais. Nesta etapa, a tensão da SE é mantida em seu valor nominal (13,8 kV), portanto em 1,0 pu. Além de ser um cenário padrão para comparação, servirá para identificar o comportamento da tensão ao longo das simulações.
- Cenário 2 - (ajuste de tensão): operação sem nenhuma GD conectada, apenas carga. Nesta etapa, a tensão da SE é aumentada para compensar a queda de tensão da linha, devido ao fluxo normal de circulação de corrente, no sentido SE para as cargas. O valor adotado foi de 1,06 pu (14,6 kV).
- Cenário 3 - (instalação baixa de GD em uma barra): operação com conexão de uma quantidade baixa de GD no final do alimentador no valor de 120 kW de potência ativa, o que é equivalente a menos de 3 % da carga total do alimentador. A tensão é mantida ajustada em 1,06 pu.
- Cenário 4 - (instalação moderada de GD em uma barra): operação com conexão de uma quantidade moderada de GD, ainda apenas no final do alimentador, mantendo a tensão ajustada em 1,06 pu. Nesta simulação, o valor de potência de GD é variado para 500 kW de geração.
- Cenário 5 - (troca do transformador): operação com conexão de uma quantidade moderada de GD, ainda apenas no final do alimentador, porém alterando a potência do transformador de distribuição para o dobro de sua potência nominal, mantendo a sua impedância percentual ( $Z\%$ ) ainda em 5 % (padrão de mercado). Nesta simulação, são mantidos os valores de tensão (1,06 pu) e de potência de GD (500 kW).
- Cenário 6 - (instalação moderada de GD em todo o alimentador): operação com conexão de GD na extensão de todo o alimentador. Nesta simulação,

a potência de geração nas barras será de 500 kW em cada uma e a tensão será mantida ajustada na SE em 1,06 pu.

- Cenário 7 - (instalação alta de GD em todo o alimentador): operação com conexão de GD na extensão de todo o alimentador, porém variando para uma quantidade de 1000 kW de geração em cada barra. Nesta simulação, a tensão será configurada de volta para seu valor nominal de 13,8 kV (1,0 pu).

- Cenário 8 - (reforço de rede no alimentador): operação com as mesmas configurações do cenário anterior, com conexão de GD na extensão de todo o alimentador, com potência de 1000 kW de geração em cada barra e a tensão configurada no valor nominal de 13,8 kV na SE. Nessa simulação, é realizada a substituição dos condutores do alimentador para outro com maior seção (maior capacidade de condução de corrente). Outra vez a preocupação é seguir os padrões habituais de mercado, nesse caso, é usando condutores do tipo CA 336,4 MCM de alumínio nu (outro padrão da concessionária local).

Esses cenários induzem variações propositais de concentração e quantidade de geração, dos valores de tensão, dos materiais e seção de condutores e da potência do transformador para permitir uma análise comparativa do comportamento do sistema em situações possíveis do dia a dia.

Importante salientar que a variação de materiais e seção de condutores gera alteração de impedâncias (maiores e menores), que implica nos valores de fluxo de potência entre as barras do sistema elétrico e conseqüentemente das tensões do sistema em cenários de injeção de GD.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados obtidos no estudo dos impactos da instalação de GD nas redes de distribuição de energia elétrica. Os dados apresentados são de informações obtidas pela revisão da literatura existente e de resultado de simulações computacionais e avaliação dos diferentes cenários propostos, com o objetivo de compreender os efeitos da GD em aspectos técnicos da rede. Foi mantido o foco principal em garantir um sistema dentro dos limites operacionais aceitáveis, com controle da tensão em valores adequados, com qualidade de fornecimento de energia e com viabilidade técnica.

No decorrer do estudo, foi identificado que os principais impactos na qualidade do fornecimento de energia envolvem variações no formato da onda de tensão. As alterações fixas e/ou flutuações rápidas nos níveis de tensão e as distorções harmônicas e alterações nos seus valores de frequência são prejudiciais para o adequado funcionamento do sistema elétrico. Além disso, os limites adequados de qualidade são definidos de forma clara e objetiva pela ANEEL, sem margem para discussões ou interpretações divergentes, podendo ser facilmente localizados por todos os envolvidos em seu PRODIST.

Essas diretrizes são essenciais para garantir a eficiência operacional e a proteção dos equipamentos conectados à rede elétrica, uma vez que a qualidade da energia elétrica não é apenas um aspecto técnico, mas também uma questão de sustentabilidade econômica. Os impactos decorrentes de distúrbios na qualidade da energia podem ser significativos, resultando em prejuízos, tanto para consumidores quanto para empresas de energia. Portanto, a implementação de estratégias de monitoramento e gestão da qualidade da energia elétrica é imprescindível. Medidas proativas podem não apenas reduzir os riscos associados a problemas de qualidade, mas também assegurar que a infraestrutura elétrica suporte a crescente complexidade do consumo, contribuindo para um sistema mais robusto e resiliente.

Nas simulações computacionais realizadas, a análise dos resultados encontrados foi segmentada para cada um dos cenários. No Cenário 1 (base), como pode ser observado na Tabela 8 e na Figura 17, os resultados estão em conformidade com as expectativas baseadas na literatura existente, em que o circuito apresenta queda em sua tensão nominal no decorrer do seu trajeto, proporcionalmente ao aumento de carga demandada (distribuída uniformemente no

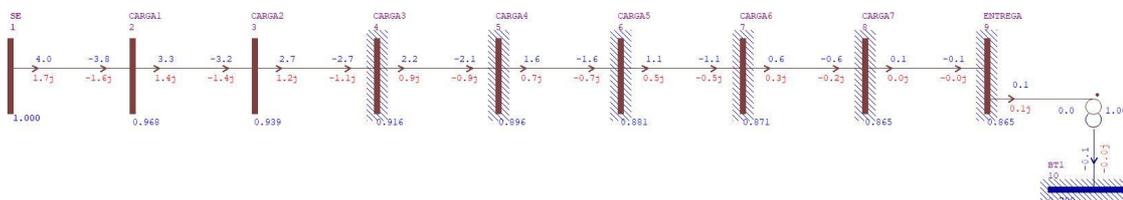
alimentador). O maior valor de queda de tensão ocorreu no ponto mais distante da SE (fonte), chegando a 0,865 % do valor nominal na MT e 79,9 % na BT1 (secundário do transformador), portanto muito abaixo do limite aceitável.

**Tabela 8** - Cenário de simulação número 1

Barra	Identificação	Tensão (pu)	Limite	Geração (kW)	Geração (kVAr)
1	SE	1	Dentro	4455	1890
2	Carga1	0,968	Dentro	0	0
3	Carga2	0,939	Dentro	0	0
4	Carga3	0,916	Abaixo	0	0
5	Carga4	0,896	Abaixo	0	0
6	Carga5	0,881	Abaixo	0	0
7	Carga6	0,871	Abaixo	0	0
8	Carga7	0,865	Abaixo	0	0
9	Entrega	0,865	Abaixo	0	0
10	BT1	0,799	Abaixo	0	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 17** - Simulação no Anarede/Anafas - Cenário 1



Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível notar que a SE operando em seu valor nominal de tensão apresenta uma queda muito rápida no decorrer do alimentador, prejudicando o atendimento dos critérios de qualidade. Há uma necessidade de controlar melhor os valores de tensão para que chegue até os pontos de consumo valores mais adequados ao uso. Essa correção de tensão é feita habitualmente na SE e é representada no Cenário 2.

No Cenário 2 (ajuste de tensão), como pode ser observado na Tabela 9 e na Figura 18, com a regulação de tensão feita na barra 1 (SE) há uma melhora geral no valor de tensão em todos os trechos de MT do alimentador. É possível notar que apenas a barra 10 (BT1) ainda apresenta um valor menor que o desejado, no entanto, também reflete o que acontece na operação real. Esse tipo de situação é

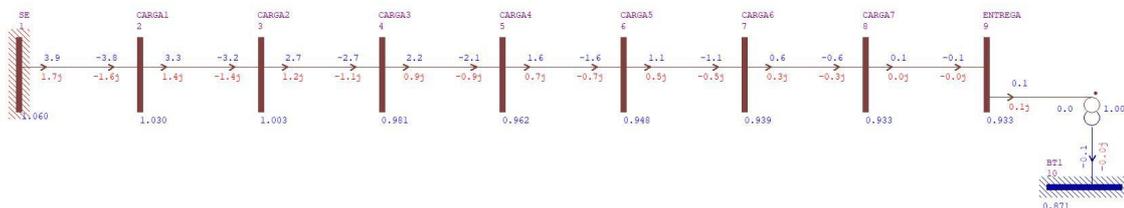
corrigido com a exigência da concessionária que o TAP do transformador seja ajustado em 0,95 %, portanto trabalhando com uma tensão menor que a nominal, regulando para valores adequados.

Tabela 9 - Cenário de simulação número 2

Barra	Identificação	Tensão (pu)	Limite	Geração (kW)	Geração (kVAr)
1	SE	1,060	Acima	4443	1886
2	Carga1	1,030	Dentro	0	0
3	Carga2	1,003	Dentro	0	0
4	Carga3	0,981	Dentro	0	0
5	Carga4	0,962	Dentro	0	0
6	Carga5	0,948	Dentro	0	0
7	Carga6	0,939	Dentro	0	0
8	Carga7	0,933	Dentro	0	0
9	Entrega	0,933	Dentro	0	0
10	BT1	0,867	Abaixo	0	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 - Simulação no Anarede/Anafas - Cenário 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados desses primeiros cenários, criados para validação, indicam que a simulação de rede de distribuição está operando em valores aceitáveis e condizentes com a realidade. Esse comportamento era esperado devido às características topológicas da rede e ao perfil de carga adotado seguindo as redes reais.

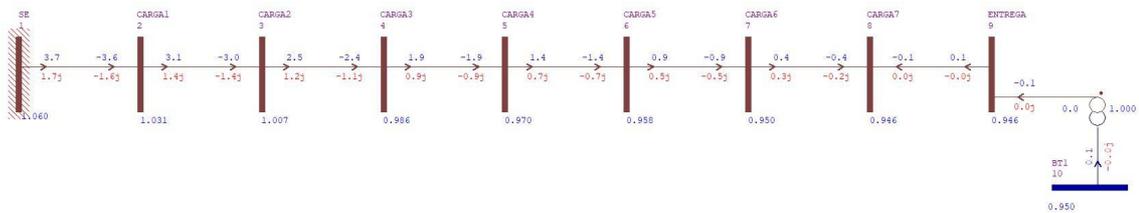
No Cenário 3 (instalação baixa de GD em uma barra), como pode ser observado na Tabela 10 e na Figura 19, com a simples instalação de um gerador na barra BT1, houve uma melhoria geral no valor de tensão do alimentador, inclusive na barra BT1, que estava fora do limite anteriormente. Nessa configuração, todos os pontos do alimentador considerados no estudo estão em valores adequados de tensão.

Tabela 10 - Cenário de simulação número 3

Barra	Identificação	Tensão (pu)	Limite	Geração (kW)	Geração (kVAr)
1	SE	1,06	Acima	4160	1868
2	Carga1	1,031	Dentro	0	0
3	Carga2	1,007	Dentro	0	0
4	Carga3	0,986	Dentro	0	0
5	Carga4	0,97	Dentro	0	0
6	Carga5	0,958	Dentro	0	0
7	Carga6	0,95	Dentro	0	0
8	Carga7	0,946	Dentro	0	0
9	Entrega	0,946	Dentro	0	0
10	BT1	0,95	Dentro	120	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 19 - Simulação no Anarede/Anafas - Cenário 3



Fonte: Elaborada pelo autor.

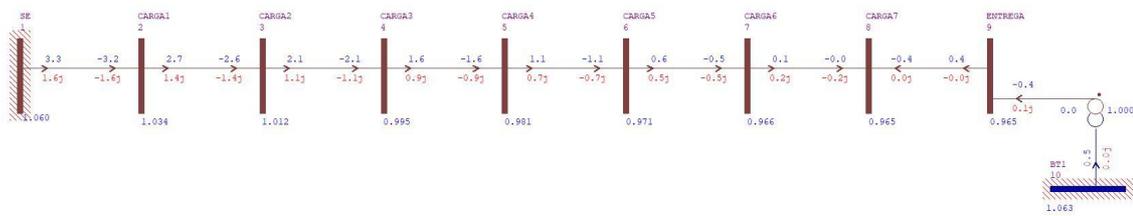
No Cenário 4 (instalação moderada de GD em uma barra), como pode ser observado na Tabela 11 e na Figura 20, com a ampliação da potência de GD na barra BT1, é possível notar uma piora nos valores de tensão nesse ponto, mas ao contrário do observado anteriormente, agora apresenta uma sobretensão acima do valor considerado desejado (ultrapassagem do limite superior). Isso acontece devido à inversão do fluxo de potência na barra BT1, que agora passa a injetar potência no transformador. A impedância do transformador e da rede atua como uma barreira ao fluxo de potência no circuito, influenciando a elevação de tensão como alternativa técnica para superar essa limitação.

Tabela 11 - Cenário de simulação número 4

Barra	Identificação	Tensão (pu)	Limite	Geração (kW)	Geração (kVAr)
1	SE	1,06	Acima	3758	1844
2	Carga1	1,034	Dentro	0	0
3	Carga2	1,012	Dentro	0	0
4	Carga3	0,995	Dentro	0	0
5	Carga4	0,981	Dentro	0	0
6	Carga5	0,971	Dentro	0	0
7	Carga6	0,966	Dentro	0	0
8	Carga7	0,965	Dentro	0	0
9	Entrega	0,965	Dentro	0	0
10	BT1	1,063	Acima	500	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 20 - Simulação no Anarede/Anafas - Cenário 4



Fonte: Elaborada pelo autor.

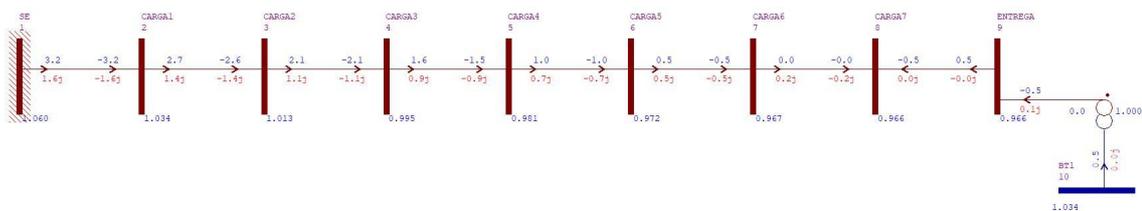
No Cenário 5 (troca do transformador), como pode ser observado na Tabela 12 e na Figura 21, há uma melhoria na tensão da barra BT1, ficando dentro dos valores desejados. Essa simulação teve o intuito de variar a impedância em ohms do alimentador, com a substituição do transformador por outro com o dobro da sua potência, mantendo inalterados as demais especificações do equipamento. É possível notar a relação entre a impedância e o fluxo de potência da geração distribuída e a consequente necessidade de variação da tensão do sistema para permitir um melhor escoamento da potência. Quanto maior a impedância do sistema, maior a tensão necessária para injetar a mesma potência.

Tabela 12 - Cenário de simulação número 5

Barra	Identificação	Tensão (pu)	Limite	Geração (kW)	Geração (kVar)
1	SE	1,06	Acima	3740	1844
2	Carga1	1,034	Dentro	0	0
3	Carga2	1,013	Dentro	0	0
4	Carga3	0,995	Dentro	0	0
5	Carga4	0,981	Dentro	0	0
6	Carga5	0,972	Dentro	0	0
7	Carga6	0,967	Dentro	0	0
8	Carga7	0,966	Dentro	0	0
9	Entrega	0,966	Dentro	0	0
10	BT1	1,034	Dentro	500	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 21 - Simulação no Anarede/Anafas - Cenário 5



Fonte: Elaborada pelo autor.

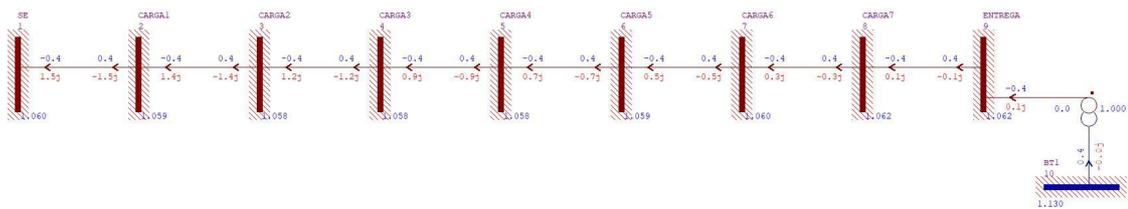
No Cenário 6 (instalação moderada de GD em todo o alimentador), como pode ser observado na Tabela 13 e na Figura 22, mesmo ainda não apresentando uma inversão de fluxo no alimentador, há uma piora generalizada dos valores de tensão, todos acima do valor considerado ideal. Nesse caso, fica evidente que os controles de tensão usuais podem não ser mais adequados. Essa característica de sobretensão gera um desafio maior no controle de tensão feito apenas na SE, que passa a não ter informações corretas da situação real da tensão no decorrer do alimentador.

Tabela 13 - Cenário de simulação número 6

Barra	Identificação	Tensão (pu)	Limite	Geração (kW)	Geração (kVAr)
1	SE	1,06	Acima	139	1741
2	Carga1	1,059	Acima	500	0
3	Carga2	1,058	Acima	500	0
4	Carga3	1,058	Acima	500	0
5	Carga4	1,058	Acima	500	0
6	Carga5	1,059	Acima	500	0
7	Carga6	1,06	Acima	500	0
8	Carga7	1,062	Acima	500	0
9	Entrega	1,062	Acima	0	0
10	BT1	1,13	Acima	500	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22 - Simulação no Anarede/Anafas - Cenário 6



Fonte: Elaborada pelo autor.

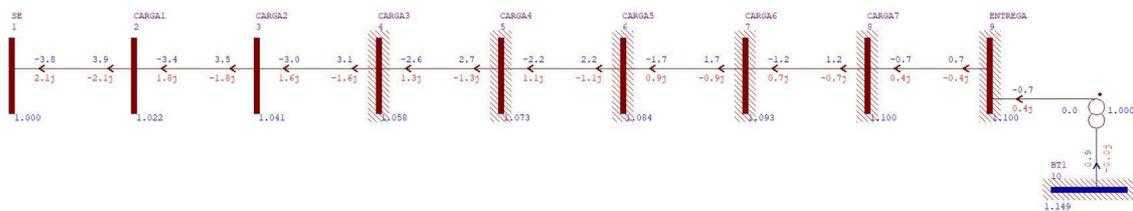
No Cenário 7 (instalação alta de GD em todo o alimentador), como pode ser observado na Tabela 14 e na Figura 23, o aumento de geração ao longo do alimentador gera uma indesejada inversão de fluxo devido à potência de geração estar maior que a potência demandada pelas cargas. A inversão de fluxo é representada pelo valor de -3300 kW indicado na barra 1 (SE), o que significa que há um excedente de energia no alimentador, sendo necessário uma redistribuição, em sentido inverso, para outros pontos da SE. Mesmo com a redução da tensão para os valores nominais na SE (1,00 pu), não há um controle eficaz da tensão, que persiste em estar fora dos limites na maior parte do alimentador. Pode-se notar uma inversão em relação ao caso base, pois em ambos os casos apenas os pontos mais próximos da SE estão com valores aceitáveis. No entanto, os pontos mais distantes passam a contar com uma tensão acima do limite máximo, e não mais baixo do limite inferior como acontecia no início das simulações.

Tabela 14 - Cenário de simulação número 7

Barra	Identificação	Tensão (pu)	Limite	Geração (kW)	Geração (kVAr)
1	SE	1	Dentro	-3300	2313
2	Carga1	1,022	Dentro	1000	0
3	Carga2	1,041	Dentro	1000	0
4	Carga3	1,058	Acima	1000	0
5	Carga4	1,073	Acima	1000	0
6	Carga5	1,084	Acima	1000	0
7	Carga6	1,093	Acima	1000	0
8	Carga7	1,1	Acima	1000	0
9	Entrega	1,1	Acima	0	0
10	BT1	1,149	Acima	1000	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 23 - Simulação no Anarede/Anafas - Cenário 7



Fonte: Elaborada pelo autor.

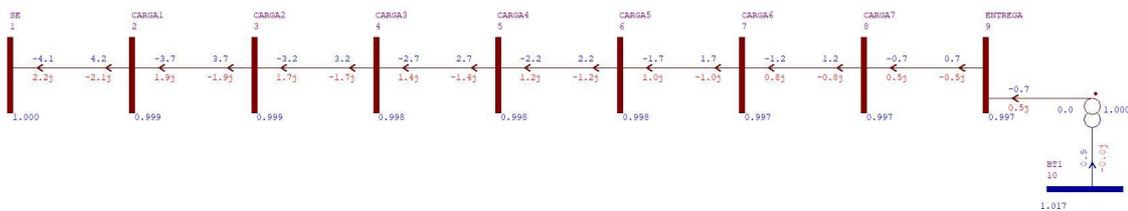
Por fim, no Cenário 8 (reforço de rede no alimentador), como pode ser observado na Tabela 15 e na Figura 24, os valores de tensão tiveram uma grande melhora, estando dentro dos limites em todos os pontos do alimentador. Nessa simulação, a variação de tensão entre as barras é bem menor que nas anteriores e a tensão desejada é obtida, mesmo mantendo o valor da tensão controlada na SE no valor nominal. A ampliação de capacidade de condução de corrente do alimentador, reduz a impedância do circuito, facilitando o escoamento da potência de geração (fluxo de potência), sem necessidade de grandes variações da tensão.

Tabela 15 - Cenário de simulação número 8

Barra	Identificação	Tensão (pu)	Limite	Geração (kW)	Geração (kVAr)
1	SE	1	Dentro	-3650	2313
2	Carga1	0,999	Dentro	1000	0
3	Carga2	0,999	Dentro	1000	0
4	Carga3	0,998	Dentro	1000	0
5	Carga4	0,998	Dentro	1000	0
6	Carga5	0,998	Dentro	1000	0
7	Carga6	0,997	Dentro	1000	0
8	Carga7	0,997	Dentro	1000	0
9	Entrega	0,997	Dentro	0	0
10	BT1	1,017	Dentro	1000	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 - Simulação no Anarede/Anafas - Cenário 8



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos resultados encontrados, pode-se notar a relação entre a sobretensão gerada pelo fluxo de potência de geração em sistemas com altos valores de impedância de rede/TFs (relação tensão/impedância). Quanto maior o valor de impedância, maior a necessidade do sistema de compensar a tensão para manter o fluxo de potência de geração necessário. Um alto valor de impedância da rede de distribuição reduz significativamente os níveis de tensão (queda de tensão) ao longo do alimentador. Essa variação também é proporcional à quantidade de carga demandada e distância da SE.

Os cenários com menores valores de impedância, apresentaram um valor de tensão mais estável, mesmo com a presença de geração distribuída. A redução da impedância de rede/TFs (reforço de rede) melhora o fluxo de potência de geração, melhorando a qualidade no sistema. Essa conclusão indica a relevância de realizar estudos de reforço de rede em cada solicitação de conexão, mediante orçamento de conexão da concessionária, com a finalidade de manter baixos valores de impedância na infraestrutura da rede, assegurando a qualidade de energia.

O aumento da potência de geração distribuída injetada no alimentador gera uma elevação nos níveis de tensão nas barras do alimentador, inclusive para patamares maiores que os considerados aceitáveis. Quanto mais distante da SE a GD for instalada, maior é o risco da presença de sobretensão. Com isso, pode-se afirmar que há uma relação clara entre a entrada em operação de novas plantas de geração com a degradação dos padrões de qualidade da rede.

Ainda, pode ser concluído que a inversão de fluxo de potência em SE é extremamente danosa ao controle de tensão. Os sistemas de controle de tensão tradicionais podem não ser mais adequados para redes com GD, devido à sua concepção ter sido pensada para fluxos unidirecionais. Com a difusão da GD, esses sistemas podem não reagir de forma eficiente às variações dinâmicas não previstas de tensão e carga no decorrer do dia, ocasionando dificuldade em manter os patamares de tensão em valores regulatórios em todo o alimentador. É necessário um estudo aprofundado para adequação das variáveis determinantes para o controle de tensão, inclusive com a eventual modernização de equipamentos e tecnologias mais inteligentes.

Quanto aos transformadores de distribuição, originalmente projetados para operar com tensões nominais ou levemente reduzidas, pode-se notar que estão cada vez mais expostos à conexão em pontos com presença de sobretensão. Essa situação causa novos desafios no controle da sua temperatura de operação (dependente de carga e tensão). Esse sobreaquecimento é prejudicial à sua vida útil, aumentando o desgaste dos materiais isolantes e podendo acarretar sua queima.

Cabe destacar que a troca do transformador por uma potência maior, mantendo demais especificações inalteradas, colabora com o controle de temperatura, não mais pela redução da sobrecarga, mas sim pela melhoria da relação impedância X tensão. Esse processo pode levar os profissionais da concessionária à troca do equipamento queimado por um de maior potência sem necessidade, porém resolvendo o problema de forma indireta (pela redução da impedância).

Para reduzir esse problema em transformadores, é necessário um estudo de revisão dos projetos desses equipamentos, adequando à nova realidade operacional, para maior robustez, maior resistência ao calor, melhor dimensionamento e menor impedância ôhmica.

Para concluir o estudo, são sugeridas soluções viáveis de mercado que podem ser melhor estudadas e incentivadas para contribuir com a redução dos impactos na qualidade do fornecimento de energia, minimizando os efeitos dos fatores limitantes que podem atrapalhar a plena expansão da potência de geração fotovoltaica em sistemas de distribuição. São elas:

- Frequente realização de obras de reforço e modernização de rede pelas concessionárias: as redes existentes devem passar por frequente revisão e adequação, garantindo maior preparação para as novas GD que podem ser instaladas. A construção de novas redes também deve ser executada considerando esses novos fatores. É importante que o sistema de distribuição busque cada vez mais o aumento de capacidade/redução de impedâncias.
- Instalação de sistemas de armazenamento de energia: maior uso/incentivo de sistemas (geralmente formados por baterias) que armazenam a energia durante períodos de baixa demanda, podendo liberar em horários de pico de consumo (maior demanda interna). Esses equipamentos colaboram de forma que evitam que o excedente de energia seja injetado nas redes de distribuição nos momentos de menor consumo/maior geração.
- Incentivos à geração sem injeção na rede (sistemas *zerogrid*): é recomendado que as concessionárias simplifiquem as normas técnicas de forma que incentivem a instalação de geração sem injeção de energia na rede de distribuição. Esses sistemas, permitem a ligação de GD apenas para suprir as cargas internas da unidade consumidora, sem usufruir da compensação de energia. Como não afetam as redes de distribuição, podem se beneficiar de um orçamento de conexão mais simples e com menor custo.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal expectativa a identificação das prováveis causas para uma eventual saturação da rede de distribuição devido à instalação de geração distribuída nas unidades consumidoras. Com base em um histórico recente de aumento de solicitação de acesso sendo reprovados pelas concessionárias, motivou a busca por encontrar os principais desafios do setor e propor formas de contornar essa situação.

Foram avaliados os maiores impactos na qualidade do fornecimento, por meio de estudo da literatura acadêmica e técnica disponível e confirmação em variações de cenários baseados em situações reais e simulações computacionais para obtenção dos resultados desejados. Abordagem prática e descritiva de um dos maiores desafios atuais da distribuição de energia.

Apesar da GD ser uma tecnologia que apresenta ganhos significativos para a operação do sistema elétrico de potência, com melhoria na disponibilidade de energia e uma maior competitividade nos custos, os resultados encontrados mostram o quão grande é o desafio que se pode enfrentar no médio prazo. As variações na forma de tensão, tanto na frequência quanto na grandeza, foram os principais impactos negativos na qualidade de fornecimento identificados, sendo gerados pela falta de projeto de redes e subestações para um fluxo bidirecional e com múltiplos barras de injeção de potência.

As distorções harmônicas na frequência podem se acentuar com o uso em larga escala de equipamentos de conversão. As simulações mostram evidentes problemas de sobretensão ocasionados pela relação entre a potência de geração injetada na rede com as impedâncias intrínsecas de condutores e equipamentos da rede, afetando um adequado fluxo de potência em geradores e cargas.

Com o trabalho, conclui-se que há uma necessidade iminente de revisão de regulações do setor para a modernização de procedimentos construtivos e operativos das redes de distribuição. A realização de estudos de fluxo de potência em diferentes condições de operação e um maior monitoramento e medições nas redes são fundamentais para uma melhor compreensão do comportamento do sistema e para a tomada de decisões estratégicas, contribuindo para um aprimoramento do controle de tensão com maior estabilidade.

O estudo tem limitações por adotar modelos de carga e geração estáticos. O fluxo de potência real é variável principalmente pela alternância de hábitos de consumo durante o dia e pela influência das condições climáticas e horárias na geração de energia solar. A utilização de modelos de geração simplificados também pode afetar os valores com variações em relação às redes de distribuição reais. Apesar disso, as simulações mostraram ser de grande relevância para as conclusões do trabalho.

Por fim, há lacunas de conhecimento que podem ser exploradas para contribuir com a expansão de sistemas de geração distribuída no Brasil. Identificar fatores limitantes e agir antecipadamente para evitar novos bloqueios de adesões contribui para que haja um sistema elétrico mais seguro e estável, inclusive com menos problemas, como falta e quedas de energia e aumento das tarifas vigentes. Tem-se uma grande oportunidade para modernizar o sistema elétrico, com a adoção de novas tecnologias, e conseqüentemente, estar preparados para um crescimento sustentável e perene de fontes de energias renováveis, contribuindo com a redução dos impactos no meio ambiente.

## REFERÊNCIAS

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, v. 57, n. 3, p. 195-204, 2001. ISSN 0378-7796.

AHUJA, D.; TATSUTANI, M. Sustainable energy for developing countries. *S.A.P.I.EN.S*, v. 2, n. 1, 2009.

AINAH, P. Coordinated active power reduction strategy for voltage rise mitigation in LV distribution network. 2018. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/185428916.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2024.

ALDO SOLAR. Energia Solar Fotovoltaica. Disponível em: <https://www.aldo.com.br/blog/energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 12 jul. 2024.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Site oficial da ANEEL. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 13 fev. 2025.

ANEEL. Resolução Normativa nº 1000, de 9 de dezembro de 2021. Altera e consolida as normas gerais e os procedimentos aplicáveis aos serviços de distribuição de energia elétrica. Brasília: Aneel, 2021a.

ANEEL. Prodist - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 1: Glossário de Termos Técnicos do Prodist. Brasília: Aneel, 2021b. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956\\_2.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2.pdf). Acesso em: 25 mar. 2024.

ANEEL. Prodist - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 8: qualidade do fornecimento de energia elétrica. Brasília: Aneel, 2021c. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956\\_2\\_7.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf). Acesso em: 25 mar. 2024.

ANEEL. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Brasília, DF, 17 abr. 2012.

ARIYARATNA, P. Distributed generation for energy harvesting in distributed systems using hybrid energy storage. 2019. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/224958205.pdf>. Acesso em: 18 set. 2024.

BAGNOLI, F.; LIVI, R. Michael Faraday: a virtuous life dedicated to science. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/201658743.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2023.

BARZEGKAR-NTOVOM, G. et al., Assessing the viability of battery energy storage systems coupled with photovoltaics under a pure self-consumption scheme. 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1910.07576>. Acesso em: 3 out. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) ou On-grid. Disponível em:

<http://www.mme.gov.br/projeteee/equipamento/sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede-sfcr-ou-on-grid/>. Acesso em: 12 jul. 2024.

CANAL SOLAR. Dimensionamento de sistemas híbridos, zero grid, baterias e fator de simultaneidade. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/dimensionamento-hibridos-zero-grid-baterias-fator-simultaneidade/>. Acesso em: 17 jul. 2024.

CEMIG. ND-3.1 - Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas. 2020. Disponível em: [https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/07/nd3\\_1\\_000001p.pdf](https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/07/nd3_1_000001p.pdf). Acesso em: 20 jul. 2024.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (Cresesb). Estatísticas de Energia Solar e Eólica. Disponível em: [https://cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content\(=pt&cid=321](https://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content(=pt&cid=321). Acesso em: 12 jul. 2024.

CEPEL. Produtos. 2024. Disponível em: <https://www.cepel.br/produtos/>. Acesso em: 20 jul. 2024.

COPEL. NTC 903110 - Atendimento à Clientes no Ambiente de Contratação Livre. Curitiba: Copel, 2023.

COPEL. NTC 905200 - Acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema da Copel com compensação de energia. Curitiba: Copel, 2024.

COPEL. Projeto de Redes de Distribuição Urbana NTC 841001. Curitiba: Companhia Paranaense de Energia, 1999. Disponível em: <[www.copel.com/normas](http://www.copel.com/normas)>. Acesso em: 19/10/2024.

CORSI, Sandro. Voltage control and protection in electrical power systems: from system components to wide-area control. Springer, 2015.

CPFL SOLUÇÕES. Rede de distribuição aérea vs subterrânea. 2024. Disponível em: <https://cpflsolucoes.com.br/rede-de-distribuicao-aerea-vs-subterranea/>. Acesso em: 13 jul. 2024.

DALL'ANESE, E.; DHOPE, V. S.; GIANNASKIS, B. G. Optimal dispatch of photovoltaic inverters in residential distribution systems. 2013. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1307.3751>. Acesso em: 30 jul. 2024.

DE ALMEIDA, H. A.; DE ALMEIDA, E. C. V. Potencial da energia solar fotovoltaica no Semiárido nordestino. Concilium, v. 22, n. 2, p. 197-210, 2022.

DIAS, M. V. X. Geração distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras. 2005. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2560>. Acesso em: 30 jul. 2024.

DUGAN, R. et al., Electrical Power Systems Quality. 2. ed. McGraw-Hill, 2003.

DUNHAM, H.; CUTLER, D.; MISHRA, S.; LI, X. Evaluation of Centralized and Distributed Microgrid Topologies Considering Power Quality Constraints. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 11, n. 5, p. 4531-4540, 2020. DOI: 10.1109/TSG.2019.2959072.

DUNN, B.; KAMATH, H.; TARASCON, J.-M. Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices. *Science*, v. 334, n. 6058, p. 928-935, 2011. Disponível em: <https://science.sciencemag.org/content/334/6058/928>. Acesso em: 11 mar. 2025.

DUTRA VIVENZA, S.; MATOS, P. Geração distribuída e o princípio da segurança jurídica. *Revista da Faculdade de Direito da Universidade Federal de Uberlândia*, v. 49, n. 2, p. 351-370, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Matriz Energética e Elétrica. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 13 jul. 2024.

FURNAS. Subestações. Disponível em: <https://www.furnas.com.br/subestacoes/?culture=pt>. Acesso em: 12 jul. 2024.

GALBIATTI-SILVEIRA, P. Energia e mudanças climáticas: impactos socioambientais das hidrelétricas e diversificação da matriz energética brasileira. *Opin. jurid.*, Medellín, v. 17, n. 33, p. 123-147, 2018. Disponível em: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1692-25302018000100123&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-25302018000100123&lng=en&nrm=iso). Acesso em: 19/10/2024.

GANDHI, O. et al. Review of power system impacts at high PV penetration. Part I: Factors limiting PV penetration. *Solar Energy*, v. 210, p. 181-201, 2020.

GOMES, F. V. Análise de sistemas elétricos de potência 1: representação em pu. Juiz de Fora, 2012.

GOOGLE. Google Maps. Disponível em: <https://www.google.com/maps>. Acesso em: 19/10/2024.

GUIMARAES, L. H.; SILVA, K. L.; GAZZANI, M. H. Os impactos da expansão da geração distribuída nos sistemas de distribuição de energia elétrica. *Caderno Pedagógico*, [S. l.], v. 22, n. 1, p. e13451, 2025. DOI: 10.54033/cadpedv22n1-161. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/13451>. Acesso em: 19 jan. 2025.

GREEN, M. A. Silicon photovoltaic modules: a brief history of the first 50 years. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 13, p. 447-455, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pip.612>. Acesso em: 15 jul. 2024.

HASNAIN, S. M. Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management*, v. 39, n. 11, p. 1127-1138, 1998. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890498000259>. Acesso em: 11 mar. 2025.

IEA. Technology Roadmap: Energy Storage. International Energy Agency, 2014. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-energy-storage>. Acesso em: 11 mar. 2025.

IEA PVPS. Snapshot of Global Photovoltaic Markets. 2023. Disponível em: <https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2023/>. Acesso em: 20 jul. 2024.

IEEE Power and Energy Magazine. Tesla vs. Edison: The War of Currents. IEEE Power and Energy Magazine, v. 16, n. 6, p. 18-23, nov./dez. 2018.

IEEE. IEEE 2778:2020 - IEEE Guide for Solar Power Plant Grounding for Personnel Protection. New York: IEEE, 2020.

IRENA. Global energy transformation: a roadmap to 2050 (2019 edition). Abu Dhabi: IRENA, 2019. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>. Acesso em: 12 mar. 2025.

IRENA. Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. International Renewable Energy Agency, 2017. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>. Acesso em: 11 mar. 2025.

KHAN, A. Analysing integrated renewable energy and smart-grid systems to improve voltage quality and harmonic distortion losses at electric-vehicle charging stations. 2019. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/227106864.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2024.

KHOSILJONOVICH, K. Electric Power Quality Analysis 6-10/0.4 kV Distribution Networks. Energy and Power Engineering, v. 8, p. 263-269, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/epe.2016.86025>. Acesso em: 19 jul. 2024.

LOGMASTER. 6 distúrbios de energia elétrica que você precisa conhecer. 2024. Disponível em: <https://www.logmaster.com.br/6-disturbios-de-energia-eletrica-que-voce-precisa-conhecer>. Acesso em: 12 jul. 2024.

MAJID, L. et al., Analysis of the Competitive Advantages and the Impact of the Green Energy Resources Utilization at the Micro and Macro-Economic Level Financial Analysis and Evaluation. International Journal of Sciences Basic and Applied Research (IJSBAR), p. 107-114, 2019.

MARQUES, F. A. S. et al., Impactos da expansão da geração distribuída nos sistemas de distribuição de energia elétrica. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas. Disponível em: [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022004000200004&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000200004&lng=en&nrm=abn). Acesso em: 25 mar. 2024.

MAUÉS, J. Floating solar PV—hydroelectric power plants in Brazil: Energy storage solution with great application potential. *International Journal of Energy Production and Management*, v. 4, p. 40-52, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2495/EQ-V4-N1-40-52>. Acesso em: 18 jul. 2024.

MCKINSEY & COMPANY. *The future of energy: How to drive rapid, sustainable change*. New York: McKinsey & Company, 2022.

MONTICELLI, A. J. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. São Paulo: E. Blucher, 1983.

NASCIMENTO, B. P. do; RAMOS, C. R.; LORETO, A. B. Análise de fluxo de potência através de métodos numéricos. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/231199342.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

NEOSOLAR. Tipos de placas solares fotovoltaicas. 2024. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/placa-solar-fotovoltaica/tipos>. Acesso em: 20 jul. 2024.

NGUYEN, H. D.; TURITSYN, K. Voltage Multistability and Pulse Emergency Control for Distribution System with Power Flow Reversal. *arXiv e-prints*, Art. no. arXiv:1407.1355, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1407.1355>. Acesso em: 12 jul. 2023.

ONS. O que é o SIN. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 17 jul. 2024.

OUR WORLD IN DATA. Global energy data. 2024. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy>. Acesso em: 20 jul. 2024.

PENA-BELLO, A. et al., Balancing DSO interests and PV system economics with alternative tariffs. 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2303.04433>. Acesso em: 30 out. 2024.

PERES, R. A.; GOMES, L. C. MICHAEL FARADAY E SEU PRIMEIRO CONTATO COM A INDUÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA: UMA VIAGEM HISTÓRICA A 1831. *Revista Ciências & Ideias* ISSN: 2176-1477, p. 50-62, 2021.

PIMM, A. J.; GARVEY, S. D.; DE JONG, M. Energy storage through variable gravity potential energy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, v. 229, n. 9, p. 1682-1695, 2015. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954406214550010>. Acesso em: 11 mar. 2025.

RAUGEI, M.; FRANKL, P. Life Cycle Impacts and Costs of Photovoltaic Systems: Current State of the Art and Future Outlooks. *Energy (Oxford)*, v.34, n.3, p.392–399, 2009.

REZENDE, L. A. *Proteção de Sistema Aéreo de Distribuição. Ilha Solteira*: UNESP, 2013. Disponível em:

[https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/2b\\_protecao\\_de\\_sistema\\_aereo\\_de\\_distribuicao.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/2b_protecao_de_sistema_aereo_de_distribuicao.pdf). Acesso em: 19 jul. 2024.

RIBSOL. Sistemas fotovoltaicos. 2024. Disponível em: <https://ribsol.com.br/sistemas-fotovoltaicos/>. Acesso em: 20 jul. 2024.

RITCHIE, H.; ROSADO, P.; ROSER, M. Energy. Published online at OurWorldinData.org. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy>. Acesso em: 20 jul. 2024.

SALEH, M. Smoothing of photovoltaic generation. 2017. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/195690219.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2024.

SANTOS, F. A.; SANTOS, F. M. Geração distribuída versus centralizada. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 35, p. 1-10, nov. 2008.

SEVERO, D. S. de M.; GOMES, L. C. Efeitos do desequilíbrio e harmônicos no motor de indução trifásico e o cálculo de potências desequilibradas. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/270307656.pdf>. Acesso em: 24 out. 2024.

SHAH, R. et al., A. Influence of large-scale PV on voltage stability of sub-transmission system. 2012. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/198108972.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2024.

SILVA, E. A. dos S. R. SPSA: Solar-Plus-Storage-Analysis: ferramenta de análise de viabilidade da instalação de sistemas fotovoltaicos e armazenamento de energia em baterias. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/159373423.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2024.

SILVA, T. A.; GUERRIERI, D. C. Análise dos impactos da penetração da geração distribuída na rede de distribuição relacionados ao sistema de compensação brasileiro. Revista AIDIS: AIDIS Journal of Water, Energy and Environment, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 1-10, 2023.

SIQUEIRA, V. Tutorial sobre o software de análise de faltas. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/196901133.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SMIL, Vaclav. Energy Transitions: History, Requirements, Prospects. Santa Barbara: Praeger, 2010.

SOARES, A. M. A.; BARRETO, Cristiane Gomes. Disputas e narrativas sobre o marco da geração distribuída no Brasil: retrocessos para a agenda 2030 e o acordo de Paris. Sustentabilidade em Debate, v. 13, n. 3, p. 32-71, 2022.

SOETHE, G.; BLANCHET, L. Geração distribuída e desenvolvimento sustentável. A&C - Revista de Direito Administrativo & Constitucional, v. 20, p. 233, 2020. DOI: 10.21056/aec.v20i79.1221.

SOVACOOOL, B. K.; WALTER, G. Internationalizing the Political Economy of Hydroelectricity: Security, Development and Sustainability in Hydropower States.

Review of International Political Economy, v. 26, n. 1, p. 49–79, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/09692290.2018.1511449>. Acesso em: 15 jul. 2024.

TERSARIOL, F. G. R. Estudo do caminho magnético médio em estrutura eletromagnética monofásica. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/161517852.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2024.

TRADER ENERGIA. Imagem da notícia "Geração distribuída é o caminho". 2014. Disponível em: <https://traderenergia.com.br/>. Acesso em: 5 fev. 2025.

UNITED NATIONS. Global development data. 2022. Disponível em: <https://data.un.org>. Acesso em: 20 jul. 2024.

UNIVERSITY OF STRATHCLYDE. Energy Systems Research Unit (ESRU) Courseware. 2019. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20190913010253/http://www.esru.strath.ac.uk:80/Courseware/Class-16110/>. Acesso em: 12 jul. 2024.

WAENGA, A. F. C.; PINTO, D. A. F.. Impactos da geração distribuída fotovoltaica no sistema de distribuição de energia elétrica. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

WATANABE, Edson H. et al. Flexible AC transmission systems. In: Power electronics handbook. Butterworth-Heinemann, 2024. p. 909-937.

WORLD BANK. World Development Indicators. 2024. Disponível em: <https://data.worldbank.org>. Acesso em: 20 jul. 2024.

XU, T.; TAYLOR, P. C. Voltage control techniques for electrical distribution networks including distributed generation. IFAC Proceedings Volumes, v. 41, n. 2, p. 11967-11971, 2008.

YOU, S. Impact of high PV penetration on the inter-area oscillations in the U.S. Eastern Interconnection. 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2101.03159>. Acesso em: 18 out. 2024.

ZAFARANI, R. et al., Assessing the utility of weather data for photovoltaic power prediction. 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1802.03913>. Acesso em: 12 set. 2024.