

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL
FACULDADES UNIFICADAS DE CATAGUASES**

**CARLOS AUGUSTO ROCHA GUERSON
HUGO DIAS RAFAEL
PALOMA DE ALMEIDA BERNARDES**

**INFLUÊNCIA DA INSERÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA NA REDE
DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: ANÁLISE DE IMPACTOS NO
SISTEMA LOCAL**

CATAGUASES

2024

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL
FACULDADES UNIFICADAS DE CATAGUASES**

**CARLOS AUGUSTO ROCHA GUERSON
HUGO DIAS RAFAEL
PALOMA DE ALMEIDA BERNARDES**

**INFLUÊNCIA DA INSERÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA NA REDE
DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: ANÁLISE DE IMPACTOS NO
SISTEMA LOCAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica das Faculdades Unificadas de Cataguases como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica Área de Concentração: Energia e Sistemas de Potência

Orientador: José Eduardo H. Silva

CATAGUASES

2024

Dedico este trabalho à minha família, amigos e colegas de curso

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois sem ele nada disso seria possível.

“Uma mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”

(Albert Einstein)

RESUMO

O aumento das preocupações com fontes de energia limpas e renováveis fez com que diversas novas formas de geração energética surgissem. Muitas destas formas de geração de energia são limpas, confiáveis e econômicas, a exemplo das usinas fotovoltaicas. Entretanto, é necessário adaptar o sistema existente a estas novas formas de geração de energia. Desta forma, o presente estudo tem como objetivo principal analisar a influência da integração de usinas fotovoltaicas nos parâmetros elétricos, harmônicas, variações de tensão, operacionalidade da rede e frequência do sistema de distribuição de energia elétrica de uma concessionária localizada no interior de Minas Gerais. A metodologia envolveu uma revisão bibliográfica abrangente, coleta de dados operacionais da concessionária, simulações computacionais e análises estatísticas. Os resultados mostraram um aumento médio de 15% na corrente de curto-circuito e uma redução de 20% na resistência elétrica da rede, indicando melhorias na capacidade de fornecimento e eficiência da transmissão de energia. Contudo, houve um aumento médio de 8% na Distorção Harmônica Total (THD) da tensão, atribuído à intermitência da geração solar. A variação média da frequência foi mínima, permanecendo dentro dos limites aceitáveis, demonstrando a estabilidade do sistema. Em relação às variações de tensão, observou-se um aumento médio de 5% durante períodos de alta geração solar, sugerindo a necessidade de medidas de mitigação para garantir a estabilidade da rede. A análise também destacou o crescimento expressivo na capacidade instalada de geração solar, contribuindo para a diversificação da matriz energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa. Por fim, foram identificados recursos necessários para a implementação eficiente das usinas fotovoltaicas, incluindo investimentos em dispositivos de controle de tensão e frequência, sistemas de armazenamento de energia e tecnologias de monitoramento avançadas. Esses resultados sugerem que, apesar dos obstáculos apresentados, a integração de usinas fotovoltaicas pode ser tecnicamente viável e benéfica para o sistema de distribuição de energia elétrica.

Palavras-chave: Usinas Fotovoltaicas, Parâmetros Elétricos, Distorção Harmônica, Variações de Tensão, Estabilidade da Frequência.

ABSTRACT

The increasing concerns about clean and renewable energy sources have led to the emergence of various new forms of energy generation. Many of these energy generation methods are clean, reliable, and cost-effective, such as photovoltaic power plants. However, it is necessary to adapt the existing system to these new forms of energy generation. Thus, this study aims to analyze the influence of integrating photovoltaic power plants on the electrical parameters, harmonics, voltage variations, network operability, and system frequency of an electricity distribution company located in the interior of Minas Gerais, Brazil. The methodology involved a comprehensive literature review, collection of operational data from the distribution company, computational simulations, and statistical analyses. The results showed an average increase of 15% in short-circuit current and a 20% reduction in electrical network resistance, indicating improvements in supply capacity and transmission efficiency. However, there was an average 8% increase in Total Harmonic Distortion (THD) of voltage, attributed to the intermittency of solar generation. The average frequency variation was minimal, remaining within acceptable limits, demonstrating system stability. Regarding voltage variations, there was an average 5% increase during high solar generation periods, suggesting the need for mitigation measures to ensure network stability. The analysis also highlighted significant growth in installed solar generation capacity, contributing to the diversification of the energy matrix and the reduction of greenhouse gas emissions. Finally, resources necessary for the efficient implementation of photovoltaic power plants were identified, including investments in voltage and frequency control devices, energy storage systems, and advanced monitoring technologies. These results suggest that, despite challenges, the integration of photovoltaic power plants can be technically feasible and beneficial for the electricity distribution system.

Keywords: Photovoltaic Power Plants, Electrical Parameters, Harmonic Distortion, Voltage Variations, Frequency Stability.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRACEEL – Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia Elétrica

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN – Balanço Energético Nacional

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

GD – Geração Distribuída

GW – Gigawatts

IEEE 519 - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

IPCA – Índice de Preço do Consumidor

KW – Quilowatt

MW – Megawatt

REN – Resolução Normativa

SIN – Sistema Interligado Nacional

UFV – Usina Fotovoltaica

RT – Regulador de Tensão

THD – Distorção Harmônica Total

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO	14
1.1.1	OBJETIVO GERAL	14
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	AGÊNCIA REGULADORA - ANEEL	15
2.2	RESOLUÇÃO NORMATIVA 482/2012	16
2.2.1	RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.059/2023	17
2.3	RESOLUÇÃO NORMATIVA 687/2015	18
2.4	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	21
2.5	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	23
2.6	PANORAMA DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA	24
2.7	REGULADORES DE TENSÃO	26
2.8	SOFTWARE INTERPLAN	28
2.9	PARÂMETROS DE ANÁLISE	28
2.9.1	PARÂMETROS ELÉTRICOS	29
2.9.2	IMPACTOS NA FREQUÊNCIA DO SISTEMA	30
2.9.3	VARIAÇÕES DE TENSÃO	31
2.9.4	HARMÔNICAS NO SISTEMA ELÉTRICO	31
3	METODOLOGIA	32
4	ESTUDO DE CASO	33
4.1	DESCRIÇÃO DO AMBIENTE	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1	LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E CONEXÃO ELÉTRICA DO GERADOR	36
5.2	ANÁLISE DE SOBRETENSÃO NA REDE IMPACTADA PELO GERADOR	37
5.3	INSERÇÃO DE REGULADOR DE TENSÃO NA REDE ELÉTRICA PARA CONTROLE DA SOBRETENSÃO	38
5.4	INSERÇÃO DE REGULADOR DE TENSÃO NA REDE ELÉTRICA EM PONTO NA SAÍDA DA SUBESTAÇÃO	40
5.5	INFLUÊNCIA NOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE REDE	42
5.6	DISTORÇÃO NAS HARMÔNICAS DO SISTEMA ELÉTRICO	44
5.7	RECURSOS NECESSÁRIOS PARA GARANTIR A CONTINUIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA	45
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

Lista de Figuras

Figura 1 - Fluxo de distribuição de energia compartilhada e geração distribuída.....	22
Figura 2 - Distribuição da Matriz Energética Brasileira	25
Figura 3 – Regulador de tensão.....	27
Figura 4 – Alimentadores do município de Cataguases	34
Figura 5 – Localização da Subestação e Gerador no Alimentador	36
Figura 6 – Cálculo de demanda do alimentador.....	37
Figura 7 – Gráfico de tensão x distância	38
Figura 8 – Instalação de RT no Ponto 1 do Alimentador.....	39
Figura 9 – Gráfico de tensão x distância com instalação de RT no Ponto 1	40
Figura 10 – Instalação do RT em ponto ótimo.....	41
Figura 11 – Gráfico de tensão x distância com instalação do RT em ponto ótimo	42

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dados dos circuitos e as variações de corrente e tensão	34
Tabela 2 - Impacto da integração de usinas fotovoltaicas nos parâmetros elétricos da rede de distribuição.....	43

Lista de Quadros

Quadro 1 – Antes e depois da análise da distorção nas harmônicas do sistema elétrico	45
--	----

1 INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica é proveniente do efeito fotovoltaico, que consiste na conversão de energia eletromagnética em energia elétrica por meio da tensão elétrica gerada em células semicondutoras. Este sistema tem experimentado notável expansão recente, emergindo como uma força preponderante no contexto global de fontes de energia renovável (FERREIRA *et al.*, 2019).

No Brasil, essa tendência é corroborada pelo fato de que, em 2023, o país superou a marca de 32 gigawatts (GW) de potência instalada proveniente da fonte solar fotovoltaica, compreendendo tanto usinas de grande porte quanto sistemas de geração distribuída em telhados, fachadas e pequenos terrenos. Este valor equivale a 14,7% da capacidade instalada da matriz elétrica nacional, conforme divulgado pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (RODRIGUES; RAMPINELLI, 2020).

Conforme dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2023), entidade responsável pela regulação do setor elétrico no país, a capacidade instalada da geração solar fotovoltaica ultrapassou a da eólica quando se incorpora a capacidade da Geração Distribuída (GD) à centralizada. Tal constatação reforça a crescente relevância desta fonte renovável na matriz energética. Vale salientar que, mesmo com a superação em capacidade instalada, a geração eólica ainda supera a fotovoltaica em termos de produção efetiva de energia elétrica no Brasil (ANEEL, 2023).

A produção de energia proveniente de usinas fotovoltaicas registrou um aumento de 70,4% em janeiro, comparativamente ao mesmo período de 2022, de acordo com dados da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). No referido mês, a fonte solar atingiu a produção de 1.933 MW médios, comparados aos 1.134 MW médios observados no período equivalente do ano anterior (FERREIRA e MARTINS, 2019).

A ANEEL desempenha um papel crucial no notável crescimento desse setor ao introduzir a Resolução Normativa (REN) N° 687/2015, que promoveu alterações substanciais em relação à REN N° 482/2012, aprimorando a atratividade da geração distribuída. Enquanto as regulamentações iniciais, até o ano de 2012, estavam majoritariamente centradas na geração residencial, a REN 687/2015 inovou ao alinhar o Brasil às principais normativas mundiais, ampliando os empreendimentos de geração, elevando os limites de potência instalada e regulamentando a geração em condomínios e prédios. Adicionalmente, a resolução introduziu conceitos como Geração Compartilhada e Autoconsumo Remoto, visando apoiar investimentos de médio e grande porte, incluindo

grandes usinas geradoras que fazem uso de painéis solares. Essa evolução regulatória desempenhou um papel preponderante no estímulo ao crescimento da energia solar fotovoltaica no Brasil (NUNES, 2017).

Com base em dados da Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia Elétrica (ABRACEEL, 2022), o ano de 2021 testemunhou um acréscimo de 114% nas contas de energia elétrica, contrastando com a inflação de 48% no mesmo período. Em um contexto mais abrangente, o Índice de Preço do Consumidor (IPCA) registrou um aumento anual de 6,7%. Portanto, a elevação nas contas de energia representa um incremento de 237% acima da inflação durante o período em análise, promovendo a natural migração dos consumidores para modalidades de geração e consumo, dado que o modelo ineficiente do mercado regulado impacta diretamente nas tarifas.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como objetivo principal realizar uma análise da influência nos parâmetros elétricos, harmônicas, variações de tensão, operacionalidade da rede e frequência do sistema, resultantes da integração de usinas fotovoltaicas no sistema de distribuição de energia elétrica de uma concessionária localizada no interior de Minas Gerais.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliação da influência nos parâmetros elétricos de rede;
- Análise da distorção nas harmônicas do sistema elétrico;
- Verificação da influência na estabilidade da frequência elétrica;
- Análise dos efeitos nas variações de tensão;
- Analisar o crescimento da geração de energia solar fotovoltaica.
- Avaliar os recursos necessários para garantir que a implementação desse modelo de negócio não comprometa a continuidade do fornecimento de energia.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente estudo busca avaliar sua influência nos parâmetros elétricos, harmônicas, variações de tensão, operacionalidade da rede e frequência do sistema, causada pela inserção de uma usina fotovoltaica na rede de distribuição de energia elétrica de uma concessionária situada no interior de Minas Gerais. Para tal, será feita uma revisão bibliográfica da literatura acerca do tema e de normas e legislações vigentes, com intuito de embasar o estudo. Adicionalmente, busca-se avaliar os recursos necessários para que a adoção desse modelo não comprometa a continuidade do fornecimento, identificando os equipamentos elétricos essenciais para o controle de possíveis distúrbios intrínsecos ao sistema. A análise dos mecanismos disponíveis no mercado visa assegurar que a conexão dessas usinas não afete negativamente a qualidade da energia elétrica da Distribuidora, mitigando riscos de sobretensão, harmônicos e retornos de geração na rede desenergizada.

Neste capítulo são apresentados os fundamentos relativos à agência reguladora, as Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015, bem como os conceitos de geração distribuída, energia fotovoltaica e a intrincada matriz energética brasileira.

2.1 AGÊNCIA REGULADORA - ANEEL

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), instituída em 1997 com o propósito explícito de supervisionar e normatizar as atividades concernentes à produção, transmissão, comercialização e distribuição de energia elétrica no território brasileiro, emerge como entidade vital para o funcionamento regulamentado do setor. Vinculada diretamente ao Ministério de Minas e Energia, a ANEEL tem como principal objetivo ser a instância normativa do setor elétrico a nível nacional (ANEEL, 2017).

Desta forma, respaldada por legislações específicas e detentora de autonomia para a tomada de decisões em todas as esferas do setor, a ANEEL possui a classificação de autarquia em regime especial. Sua posição estratégica confere-lhe a capacidade de efetuar regulações que permeiam desde a produção até a distribuição de energia elétrica, garantindo, assim, um ambiente de operação pautado pela conformidade legal e eficiência operacional (ANEEL, 2023).

A atuação da ANEEL é regida por uma abordagem técnica e estritamente normativa, visando à supervisão eficaz e equitativa do setor elétrico no Brasil. Sua

competência abrange desde a formulação de políticas até a implementação de regulamentações que abordam aspectos cruciais da produção, transmissão, comercialização e distribuição de energia elétrica (BARBOSA FILHO *et al.*, 2015).

A ANEEL opera com base em um arcabouço normativo que inclui leis específicas, regulações, resoluções normativas e demais instrumentos legais. Sua autonomia decisória é fundamentada na legislação que a instituiu, conferindo-lhe a capacidade de estabelecer diretrizes, metas e parâmetros para o setor elétrico. A regulação tarifária é uma das responsabilidades centrais da ANEEL. A agência estabelece metodologias para cálculo de tarifas de energia elétrica, considerando os custos associados à produção, transmissão e distribuição. A revisão e atualização periódica dessas tarifas são conduzidas de maneira a equilibrar a sustentabilidade financeira das empresas do setor e a acessibilidade dos consumidores (HOSENUZZAMAN *et al.*, 2015).

Outro aspecto relevante da atuação da ANEEL diz respeito à concessão e fiscalização dos serviços de energia elétrica. A agência emite e administra contratos de concessão, estabelecendo direitos e obrigações das concessionárias, e monitora o cumprimento desses contratos, aplicando penalidades em caso de não conformidade (BEZUTTI, 2013).

Além disso, a ANEEL promove a regulação da geração distribuída, regulamentando a conexão de sistemas de micro e minigeração de energia ao sistema elétrico. As Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015 são instrumentos-chave nesse contexto, estabelecendo diretrizes para o desenvolvimento sustentável dessa modalidade de geração.

A atuação técnica da ANEEL estende-se à promoção de leilões de energia, onde são contratados empreendimentos geradores, e à gestão de aspectos operacionais, como a garantia da qualidade e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. Em seu papel de agência reguladora, a mesma busca assegurar um ambiente competitivo, eficiente e transparente no setor elétrico brasileiro, contribuindo para a busca de um equilíbrio entre os interesses das concessionárias e dos consumidores (NUNES, 2017).

2.2 RESOLUÇÃO NORMATIVA 482/2012

Publicada em abril de 2012, a Resolução Normativa 482/2012, que delineava as condições gerais para o acesso de sistemas de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, foi revogada pela Resolução Normativa

ANEEL nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023. Este novo marco regulatório representa um aprimoramento significativo nas normas que regem a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída, assim como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (BRASIL, 2012).

A microgeração, caracterizada por sistemas com potência de até 75 kW, comumente instalados em residências e estabelecimentos de menor porte, permite aos consumidores gerarem sua própria energia e compartilharem eventuais excedentes com a rede elétrica. Já a minigeração abrange sistemas com potência entre 75 kW e 5 MW, atendendo demandas mais expressivas, como as de indústrias e condomínios (NUNES, 2017).

Ambas as formas de geração distribuída conferem aos consumidores a capacidade de gerar parte ou totalidade da energia que consomem, representando um avanço significativo para a promoção da sustentabilidade e a redução da dependência da rede elétrica convencional. A Resolução Normativa ANEEL nº 1.059/2023 estabelece diretrizes essenciais para a conexão desses sistemas à rede elétrica, delineando procedimentos de compensação de energia e definindo as responsabilidades das partes envolvidas (ANEEL, 2023).

2.2.1 RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.059/2023

A fundamentação para a criação da Resolução Normativa 1.059/2023 está pautada no artigo 2º da Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, na Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022, e nas informações constantes no Processo nº 48500.004924/2010-51 (BRASIL, 2023).

A resolução em questão, representada pelo Artigo 1º, tem como escopo o aprimoramento das normas relacionadas à conexão e faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica. Além disso, abrange modificações nas regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Essa resolução específica, além de promover melhorias nessas áreas, também propõe alterações nas Resoluções Normativas nº 920, de 23 de fevereiro de 2021, 956, de 7 de dezembro de 2021, 1.000, de 7 de dezembro de 2021, sendo caracterizada por um conjunto abrangente de atualizações normativas, conforme citado:

“Art. 1º Esta Resolução aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica, altera as Resoluções Normativas nº 920, de 23 de fevereiro de 2021, 956, de 7 de dezembro de 2021, 1.000, de 7 de dezembro de 2021, e dá outras providências.” (ANEEL, 2023 pg. 01)

Esse tipo de ação regulatória é comum em contextos nos quais a legislação vigente necessita de ajustes para se adequar a novas demandas, tecnologias emergentes ou mudanças nas condições do setor elétrico. A ação destaca-se por sua natureza técnica e regulatória, buscando aprimorar o funcionamento e a eficiência dos sistemas de micro e minigeração distribuída, além de ajustar as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica para refletir as necessidades e desenvolvimentos do setor elétrico atual. O artigo 2º trata de diversas alterações na Resolução 482/2012, assim como os demais, que visam atualizar a mesma e readequá-la os moldes atuais de mercado e tecnologia.

2.3 RESOLUÇÃO NORMATIVA 687/2015

A Resolução Normativa nº 687/2015, publicada ANEEL, representa um marco significativo na regulamentação da geração distribuída no Brasil. O documento, emitido em 24 de novembro de 2015, sob a liderança do Diretor-Geral da ANEEL, utiliza a legislação vigente, especialmente a Lei nº 9.427/1996 e a Lei nº 14.300/2022, como base para sua formulação.

A ANEEL promulgou a Resolução Normativa (REN) nº 687/2015 com o propósito de significativamente expandir a regulamentação do segmento de geração distribuída no cenário brasileiro. Este marco regulatório introduziu modificações cruciais, destacando-se:

- Criação de Modalidades: A resolução inovou ao introduzir duas novas modalidades essenciais para o setor, a saber, o autoconsumo remoto e a geração compartilhada. Essas modalidades proporcionaram maior flexibilidade e adaptabilidade aos consumidores, permitindo uma abordagem mais personalizada em relação à geração e consumo de energia elétrica.
- Compensação entre Matrizes e Filiais: Um avanço significativo foi a introdução da possibilidade de compensação de créditos entre matrizes e filiais de empresas. Essa medida, ao permitir a movimentação eficiente de créditos de energia,

incentivou a otimização da utilização de recursos energéticos dentro de organizações distribuídas.

- **Geração Compartilhada:** A resolução viabilizou a prática de geração compartilhada entre consumidores de condomínios, bem como a formação de cooperativas ou consórcios. Essa abordagem colaborativa promoveu uma distribuição mais equitativa dos benefícios da geração distribuída, fomentando uma participação mais ampla na transição para fontes de energia mais sustentáveis.
- **Limite de Minigeração:** Outra alteração substancial foi a elevação do limite para minigeração de 1 MW para 5 MW. Esse aumento do limite de capacidade permitiu uma escala mais expressiva nas instalações de geração distribuída, atendendo a demandas mais robustas de indústrias e empreendimentos de maior porte.
- **Prazo de Validade dos Créditos:** A resolução estendeu a validade dos créditos de energia elétrica para 60 meses, proporcionando uma janela temporal mais ampla para a utilização efetiva desses créditos. Essa extensão contribuiu para uma gestão mais eficiente da compensação de energia ao longo do tempo, alinhando-se com as dinâmicas operacionais e financeiras dos consumidores.

O artigo 1º da resolução introduz modificações no art. 2º da Resolução Normativa nº 482/2012, alterando as definições de microgeração distribuída, minigeração distribuída, sistema de compensação de energia elétrica, melhoria, reforço, empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, geração compartilhada, e autoconsumo remoto. Essas mudanças têm como objetivo aprimorar a classificação e entendimento desses conceitos no contexto da geração distribuída.

O artigo 2º da resolução propõe alterações no art. 4º da Resolução Normativa nº 482/2012, especificando procedimentos relacionados à assinatura de contratos, limites de potência, solicitação de aumento de potência, e vedação à divisão de central geradora em unidades menores para adequação aos limites de potência.

Já o artigo 3º insere parágrafos no art. 5º da Resolução Normativa nº 482/2012, estabelecendo que custos de melhorias no sistema de distribuição exclusivamente devido à conexão de microgeração distribuída não devem ser repassados ao consumidor, com exceção da geração compartilhada. Adicionalmente, os custos de melhoria relacionados à minigeração distribuída devem ser incluídos na participação financeira do consumidor.

O artigo 4º altera o art. 6º da Resolução Normativa nº 482/2012, detalhando regras para adesão ao sistema de compensação de energia elétrica, destacando requisitos para compensação, adesão de consumidores livres ou especiais, e tratamento específico para a subclasse residencial baixa renda.

O artigo 5º insere o art. 6A, especificando que consumidores que alugaram ou arrendaram propriedades não podem ser incluídos no sistema de compensação de energia elétrica, a menos que a propriedade seja alugada ou arrendada em reais por unidade de energia elétrica. O artigo 6º altera o art. 7º da Resolução Normativa nº 482/2012, descrevendo procedimentos de faturamento para unidades consumidoras no sistema de compensação de energia elétrica, incluindo cobrança mínima, cálculos específicos para microgeração ou minigeração distribuída, tratamento do excedente de energia, e informações obrigatórias nas faturas. O artigo 7º modifica o art. 8º da Resolução Normativa nº 482/2012, atribuindo à distribuidora a responsabilidade técnica e financeira pelo sistema de medição para microgeração distribuída, enquanto os custos de adequação para minigeração distribuída e geração compartilhada são de responsabilidade do interessado.

Outras alterações incluem revisões nos arts. 10, 13, e a inclusão de novos arts. 13-A, 13-B, e 15, determinando prazos, responsabilidades e procedimentos adicionais. A resolução, de acordo com o art. 15, está sujeita a revisão até 31 de dezembro de 2019, visando manter sua relevância e eficácia no contexto dinâmico da geração distribuída no país.

O artigo 13 institui a responsabilidade da distribuidora na coleta de informações das unidades consumidoras participantes do sistema de compensação de energia elétrica, a serem enviadas até o dia 10 de cada mês para registro junto à ANEEL. Este procedimento visa garantir a transparência e controle das operações no sistema.

Os artigos 13-A e 13-B introduzem novas disposições. O primeiro estabelece que a distribuidora deve disponibilizar, a partir de 1º de janeiro de 2017, um sistema eletrônico que permita ao consumidor enviar solicitações de acesso e documentos, bem como acompanhar o andamento do processo. O segundo determina a aplicação complementar das disposições da Resolução Normativa nº 414/2010 às unidades consumidoras participantes do sistema de compensação de energia elétrica.

O artigo 14 insta as distribuidoras a revisar e publicar, até 1º de março de 2016, normas técnicas relacionadas ao acesso de microgeração e minigeração distribuída,

utilizando o Módulo 3 do PRODIST como referência. Esta medida visa garantir que as distribuidoras estejam alinhadas com as normas estabelecidas pela ANEEL.

O último artigo, de número 15, prevê que a ANEEL revisará a Resolução Normativa nº 687/2015 até 31 de dezembro de 2019. Isso demonstra um comprometimento em manter a regulação atualizada e adaptada às evoluções do setor de geração distribuída, assegurando a eficácia e a pertinência das normativas.

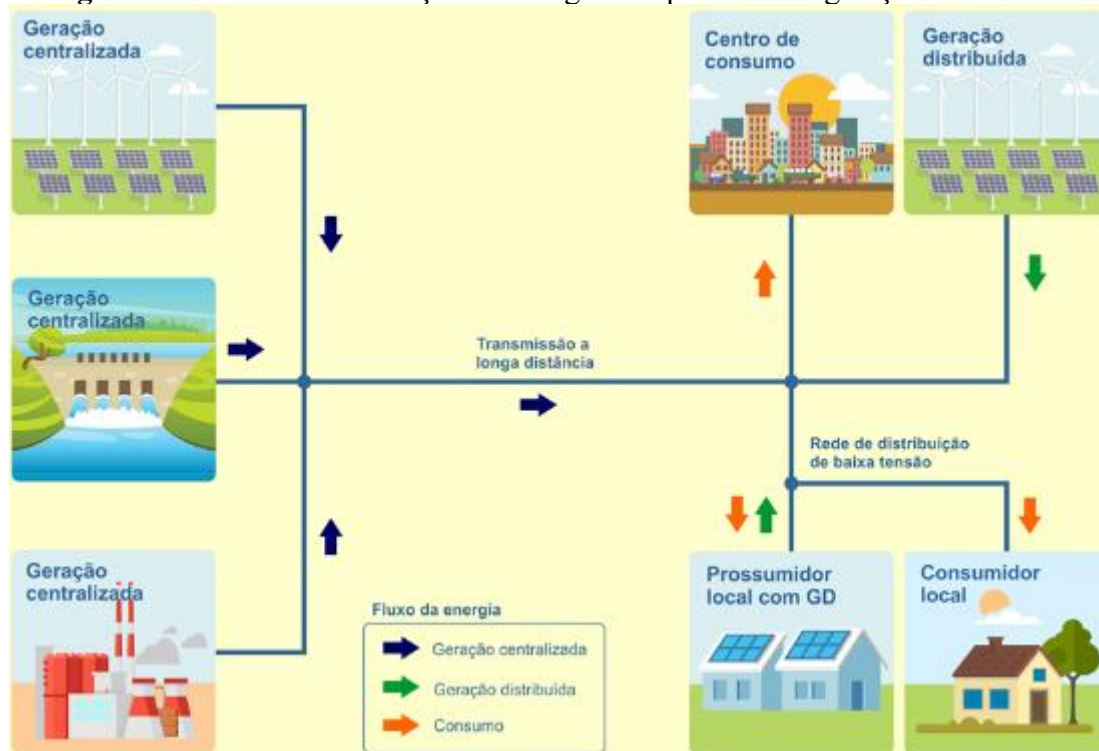
2.4 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A Geração Distribuída (GD) representa uma abordagem inovadora na produção de energia elétrica, permitindo a geração localizada ou próxima ao ponto de consumo. Essa modalidade contrasta significativamente com a geração centralizada, caracterizada por usinas de grande porte conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN), a extensa rede de transmissão e distribuição elétrica do país (BÜHLER, 2007).

Ao adotar a estratégia de Geração Distribuída, a descentralização se torna o cerne do modelo, empregando geradores de pequeno porte em contraposição ao paradigma tradicional de geração centralizada. No modelo centralizado, a produção de energia ocorre em grandes usinas, como hidrelétricas e termelétricas, situadas em locais distantes dos centros de consumo. Esse método demanda o transporte da eletricidade por longas linhas de transmissão (HOSENUZZAMAN *et al.*, 2015).

Por outro lado, na Geração Distribuída, pequenos geradores são instalados em proximidade aos centros de consumo ou até mesmo no mesmo local onde a energia é efetivamente utilizada. Essa proximidade geográfica minimiza as perdas associadas ao transporte de energia, resultando em maior eficiência e menor impacto ambiental. Além disso, a Geração Distribuída promove uma infraestrutura elétrica mais resiliente, uma vez que é menos suscetível a falhas sistêmicas, proporcionando uma maior confiabilidade ao fornecimento de energia, conforme pode ser observado na Figura 1 (NUNES, 2017).

Figura 1 - Fluxo de distribuição de energia compartilhada e geração distribuída



Fonte: Canal solar (2023)

Essa abordagem descentralizada da Geração Distribuída oferece uma série de benefícios, indo além da eficiência energética. A redução das perdas no transporte de eletricidade, proporcionada pela proximidade entre a geração e o consumo, resulta em maior economia e sustentabilidade (DENHOLM *et al.*, 2009).

Além disso, a Geração Distribuída estimula a diversificação da matriz energética ao incentivar o uso de fontes renováveis, como solar, eólica e biomassa, em pequenas instalações. Isso contribui para a transição para um setor elétrico mais sustentável e alinhado aos princípios da economia de baixo carbono (RODRIGUES; RAMPINELLI, 2020).

A flexibilidade e adaptabilidade da Geração Distribuída são características fundamentais, permitindo a integração eficiente de sistemas de armazenamento de energia e tecnologias avançadas de controle. Essa versatilidade é crucial para atender à crescente demanda por soluções energéticas personalizadas e resilientes (NUNES *et al.*, 2016).

A Geração Distribuída também contribui para a segurança energética, uma vez que a interconexão de vários pontos de geração distribuída cria uma rede mais robusta e resistente a eventos adversos. Essa resiliência é essencial para enfrentar desafios climáticos, eventos extremos e possíveis interrupções no fornecimento de energia (SILVA *et al.*, 2019).

2.5 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia fotovoltaica, derivada da luz solar, destaca-se como uma forma inovadora e ambientalmente amigável de gerar eletricidade. O processo subjacente, conhecido como efeito fotovoltaico, envolve o uso de placas solares fabricadas a partir de materiais semicondutores. Essas placas, ao serem expostas à radiação solar, desencadeiam o movimento de elétrons no semicondutor, convertendo assim a energia luminosa em eletricidade (DENHOLM *et al.*, 2009).

O grande diferencial da energia solar fotovoltaica reside em sua característica renovável e sustentável. Ao contrário das fontes tradicionais de energia, como os combustíveis fósseis, a energia solar não emite poluentes atmosféricos prejudiciais, contribuindo significativamente para a redução da pegada de carbono e mitigação das mudanças climáticas. Cabe mencionar, também, que, exceto pela ocupação de grandes áreas, a energia fotovoltaica não gera passivos ambientais, sendo seu único impacto direto ao meio ambiente a necessidade de ocupar grandes áreas, livres de quaisquer formas de bloqueio dos raios solares. Outro impacto a ser considerado é o impacto aos pássaros que sobrevoam próximo as instalações das placas, pois podem colidir com os painéis solares, confundindo-os com superfícies de água. Isso pode resultar em ferimentos ou mortes. E, algumas usinas solares utilizam tecnologia de concentração solar que pode criar pontos de calor intensos. Pássaros que voam através desses pontos podem sofrer queimaduras fatais (NUNES, 2017).

Além disso, a geração de energia solar é altamente modular e pode ser implementada em diferentes escalas, desde pequenos sistemas residenciais até grandes usinas solares. Isso confere uma versatilidade notável, adaptando-se tanto às necessidades individuais quanto às demandas mais amplas da rede elétrica. Outro ponto crucial é a independência em relação às flutuações nos preços e disponibilidade de recursos energéticos convencionais. A luz solar é uma fonte inesgotável e amplamente distribuída,

proporcionando estabilidade e segurança ao suprimento de energia (CEMIG-ESCHER, 2019).

Com avanços contínuos em tecnologia e pesquisa, a eficiência das células fotovoltaicas tem aumentado, tornando a energia solar uma opção cada vez mais competitiva em termos econômicos. Essa evolução contribui para a disseminação global da energia solar fotovoltaica como uma solução viável e acessível (HOSENUZZAMAN *et al.*, 2015).

2.6 PANORAMA DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

A matriz energética do Brasil destaca-se como uma notável exceção em comparação com a maioria dos países ao redor do mundo. Um estudo recente realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2023 ressalta que a matriz global é majoritariamente composta por fontes não renováveis, como carvão, petróleo e gás natural. Em contraste, o Brasil se destaca com 47,4% de sua matriz energética proveniente de fontes renováveis, sinalizando um comprometimento substancial com práticas sustentáveis (RODRIGUES; RAMPINELLI, 2020).

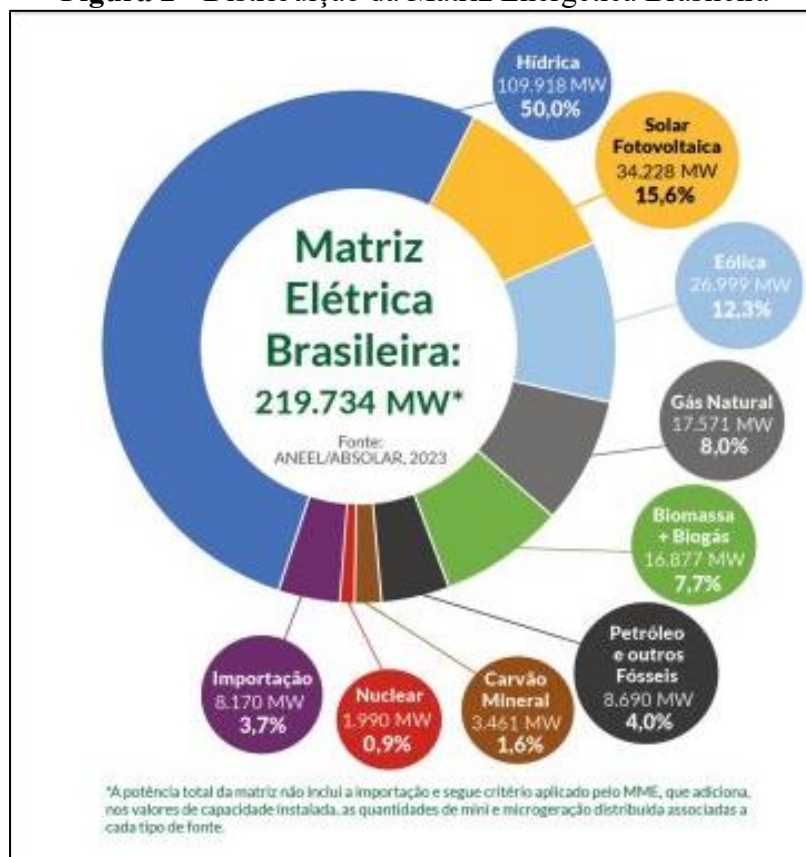
De acordo com a Figura 2 do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2022, aproximadamente 50% da produção de energia elétrica no Brasil é proveniente de usinas hidrelétricas. Esse destaque na geração hidrelétrica é resultado do vasto potencial hidráulico do país, que, ao longo das décadas, tem sido fundamental para a garantia de uma fonte confiável e limpa de eletricidade (FERREIRA; MARTINS, 2019).

Além da hidroeletricidade, a energia eólica e solar têm conquistado uma parcela significativa na matriz elétrica brasileira. A crescente adoção dessas tecnologias reflete os esforços do país em diversificar sua matriz e reduzir a dependência de fontes não renováveis. A energia eólica, impulsionada pelos ventos que varrem extensas áreas do território brasileiro, e a energia solar, aproveitando a intensa radiação solar em diversas regiões, contribuem para fortalecer a sustentabilidade e a resiliência do sistema elétrico (NUNES, 2017).

Esse panorama diversificado e sustentável coloca o Brasil em uma posição estratégica em termos de segurança energética e contribui para a mitigação dos impactos ambientais associados às fontes convencionais. A contínua expansão das energias renováveis na matriz energética brasileira não apenas reforça o compromisso ambiental

do país, mas também estabelece um exemplo inspirador para outras nações no caminho em direção a um futuro mais limpo e sustentável (WANDERLEY, 2013).

Figura 2 - Distribuição da Matriz Energética Brasileira



Fonte: ABSOLAR, 2023.

A Figura 2 ilustra de forma visual a distribuição das fontes na matriz energética brasileira, evidenciando a relevância das energias renováveis em nosso cenário. Essa composição diversificada é crucial não apenas para a sustentabilidade ambiental, mas também para a segurança energética do país. A expressiva participação das usinas hidrelétricas destaca-se como um pilar fundamental na geração elétrica nacional. No entanto, é importante observar que o Brasil continua a expandir suas fontes de energia, adotando abordagens inovadoras para atender à crescente demanda (HOSENUZZAMAN *et al.*, 2015).

A matriz energética brasileira destaca-se globalmente pela expressiva presença de fontes renováveis, conforme revela um estudo da EPE (2023). Em contraste com a matriz mundial, predominantemente baseada em fontes não renováveis como carvão, petróleo e gás natural, o Brasil destaca-se com aproximadamente 47,4% de sua matriz composta por energias renováveis.

Desta forma, fica evidenciando a notável contribuição das usinas hidrelétricas, responsáveis por cerca de 50% da geração elétrica no país. Essa representação visual salienta a diversidade das fontes energéticas, fundamental não apenas para a sustentabilidade ambiental, mas também para a segurança energética nacional (CEMIG-ESCHER, 2019).

O Brasil, reconhecendo a importância da diversificação, tem ampliado sua participação em energias renováveis, com a eólica e a solar ganhando destaque significativo. A energia eólica, impulsionada pelos ventos em diversas regiões, contribui substancialmente para a matriz, enquanto a energia solar, aproveitando a intensa radiação solar, continua a expandir sua presença em projetos de grande escala e sistemas de geração distribuída (NUNES, 2017).

2.7 REGULADORES DE TENSÃO

Conforme mencionado por Mamede Filho (2005), o regulador de tensão é um equipamento projetado para manter um nível específico de tensão em um sistema elétrico, quando há variações de tensão fora dos limites estabelecidos. É importante ressaltar que o regulador de tensão é um equipamento de grande utilidade para as empresas fornecedoras de energia elétrica que buscam garantir uma qualidade confiável no fornecimento de tensão aos seus clientes, assegurando uma estabilidade adequada. O uso do regulador de tensão é amplamente aplicado em redes de distribuição rural com grande extensão e carga relativamente baixa, pois ele minimiza a queda de tensão e reduz a faixa de variação da tensão de fornecimento, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Regulador de tensão



Fonte: Eaton (2020)

Mamede Filho (2005), cita ainda dois tipos de reguladores que são destinados a correção da tensão nas redes de distribuição:

- O regulador de tensão auto booster é mais simples, fabricado em unidades monofásicas e bastante utilizado em redes rurais de baixa densidade de carga, onde é dever das concessionárias fornecer tensão dentro de níveis adequados, sendo um equipamento que interfere num só sentido, ou é regulado para aumentar tensão, ou é regulado para baixar tensão.
- O regulador de tensão 32 graus compõe-se basicamente de um autotransformador dotado de várias derivações no enrolamento em série, uma chave reversora de polaridade que permite adicionar ou subtrair a tensão, o que possibilita realizar os ajustes necessários a regulação da tensão no nível pretendido, são particularmente utilizados nas redes de distribuição rural de grande comprimento, que alimentam em seu percurso comunidades urbanas, normalmente localizadas no seu início e depois de consumidores rurais.

2.8 SOFTWARE INTERPLAN

O Interplan é um sistema computacional utilizado para estudo de planejamento de curto e médio prazo, que possibilita a visualização e edificação gráfica da rede e a definição de configurações de rede otimizada para atender objetivos previamente fixados. Tendo como uma de suas principais finalidades o cálculo do fluxo de potência, o software possui funções como o planejamento da operação e expansão da rede, através da importação das informações da base de dados da distribuidora. No que diz respeito ao planejamento do sistema de distribuição, pode-se destacar as seguintes ferramentas (DAIMON, 2015):

- Avaliação do mercado espacial (por quadriculas ou centro de cargas) de região delimitada a partir do mercado global;
- Diagnóstico da rede para anos futuros e estabelecimento de áreas carentes de reforços;
- Proposição de alternativas e reforços na rede através de ferramentas gráficas e estudos de fluxo de potência, curto-circuito, manobras, edição de redes para novas cargas ou alterações topológicas, confiabilidade, suporte reativo, análise de transitórios em cargas especiais e análise técnico-econômica de obras de expansão.
- Integração entre os módulos alta tensão AT, MT e BT.
- Base de dados local, garantindo um excelente desempenho
- Integração com os maiores sistemas GIS, AutoCAD, *Google Earth* e Pertec (software Daimon para cálculo de perdas técnicas). De acordo com Daimon (2015) o Interplan é amplamente utilizado nas distribuidoras de energia elétrica no Brasil, sendo considerada uma ferramenta confiável para operação e planejamento dos sistemas. Baseado nessas características, este software foi escolhido para utilização no trabalho.

2.9 PARÂMETROS DE ANÁLISE

Os parâmetros de análise compreendem variáveis elétricas cruciais, entre as quais se destacam frequência, tensão, harmônicas e outros elementos de relevância no âmbito

de operação do sistema elétrico. A análise sistemática destes parâmetros permite identificar possíveis distorções, desequilíbrios ou variações que possam emergir da interação da usina fotovoltaica com a rede local.

2.9.1 PARÂMETROS ELÉTRICOS

Ao se analisar os parâmetros elétricos referentes à integração de uma Usina Fotovoltaica (UFV) em uma rede de distribuição de energia elétrica, diversos elementos elétricos são examinados para avaliar o impacto do sistema fotovoltaico no desempenho global da rede. A estabilidade e a qualidade do fornecimento de energia são essenciais para assegurar a operação confiável do sistema elétrico (FERRATO, 2016).

O controle da frequência é de extrema importância, sendo mantida dentro de limites preestabelecidos para evitar desvios que possam prejudicar a sincronia e operação adequada da rede. A análise desses desvios de frequência possibilita a identificação de possíveis instabilidades e permite a implementação de medidas corretivas para manter a integridade operacional do sistema (GARCIA, 2006).

A variação da tensão é outra variável crítica, exigindo monitoramento constante para garantir que permaneça em níveis aceitáveis. Flutuações na tensão podem impactar negativamente a operação de dispositivos elétricos e eletrônicos conectados à rede. No contexto das características harmônicas, a não linearidade dos dispositivos fotovoltaicos pode gerar distorções que afetam a qualidade da energia. A identificação das harmônicas, incluindo sua magnitude e frequência, é crucial para antecipar potenciais distorções harmônicas que podem surgir na rede. A análise detalhada desses parâmetros garante a integração harmônica e eficiente da UFV no sistema elétrico existente (OLIVEIRA, 2011).

Esta análise também abrange a avaliação da potência reativa, cujo controle é vital para manter a estabilidade do sistema elétrico. O fluxo adequado de potência reativa é essencial para otimizar a eficiência e minimizar perdas no sistema de distribuição. Uma cuidadosa monitorização e regulação da potência reativa asseguram a compensação adequada, contribuindo para a redução de quedas de tensão e melhorando a eficiência global da rede (BARROS, 2016).

A resiliência do sistema frente a perturbações, como a desconexão inesperada de uma UFV, é um aspecto crítico a ser considerado. Estratégias de proteção e controle são desenvolvidas para garantir uma resposta rápida e eficiente a eventos não planejados,

minimizando os impactos adversos e mantendo a continuidade do fornecimento de energia (CAMARGOS, 2013).

Além disso, a coordenação adequada entre os dispositivos de proteção da UFV e os sistemas de proteção da rede é essencial para garantir a segurança do sistema como um todo. A identificação precoce de falhas, a atuação rápida de dispositivos de proteção e a comunicação eficiente entre os elementos do sistema são fundamentais para garantir a estabilidade operacional em condições normais e contingenciais (FERRATO, 2016).

Desta forma, a análise detalhada dos parâmetros elétricos na integração de uma usina fotovoltaica na rede de distribuição é crucial para assegurar uma operação confiável, eficiente e segura do sistema elétrico. O entendimento profundo desses parâmetros proporciona a base necessária para o desenvolvimento de estratégias de controle e proteção, contribuindo para a transição adequada para um sistema elétrico mais sustentável e resiliente (BARROS, 2016).

2.9.2 IMPACTOS NA FREQUÊNCIA DO SISTEMA

A influência da inserção de uma UFV na rede de distribuição se estende aos parâmetros fundamentais, como a frequência do sistema elétrico. O impacto na frequência decorre das variações na geração e demanda de energia, desafiando a estabilidade do sistema. As flutuações na geração solar, associadas às condições climáticas e características intrínsecas da tecnologia fotovoltaica, podem resultar em alterações na frequência do sistema. O desafio reside na necessidade de manter a frequência dentro de limites aceitáveis para garantir a qualidade e a confiabilidade do fornecimento de energia (BARROS, 2016).

A variação na geração de uma UFV, devido à intermitência solar, pode causar desequilíbrios momentâneos entre a oferta e a demanda de energia. Essas discrepâncias impactam diretamente a frequência do sistema elétrico, demandando estratégias de controle avançadas para compensação e estabilização (FERRATO, 2016).

A implementação de dispositivos de controle de frequência e a coordenação eficiente com outros elementos da rede são cruciais para mitigar os impactos adversos. Sistemas de armazenamento de energia e técnicas de previsão avançadas também desempenham um papel significativo na gestão dessas flutuações, contribuindo para manter a frequência dentro de parâmetros aceitáveis. Assim, a análise aprofundada dos impactos na frequência do sistema decorrentes da integração de uma UFV é essencial

para o desenvolvimento de estratégias eficazes de controle e estabilização. Isso assegura a operação confiável e estável do sistema elétrico, alinhando-se com os objetivos de transição para uma matriz energética mais adaptada ao sistema (GARCIA, 2006).

2.9.3 VARIAÇÕES DE TENSÃO

As variações de tensão representam um aspecto crítico a ser considerado ao analisar os impactos da inserção de uma UFV na rede de distribuição de energia elétrica. Essas variações estão diretamente relacionadas às características intrínsecas da geração solar e às flutuações na produção de uma UFV, demandando uma análise cuidadosa e estratégias de controle apropriadas (FERRATO, 2016).

A intermitência da radiação solar pode levar a mudanças abruptas na geração de uma UFV, resultando em variações de tensão na rede. Essas flutuações podem afetar a qualidade do fornecimento de energia e a operação adequada dos equipamentos conectados à rede de distribuição (GARCIA, 2006).

Para mitigar os impactos das variações de tensão, é essencial implementar dispositivos de controle avançados, como reguladores de tensão e compensadores estáticos de potência reativa. Além disso, a coordenação eficiente entre a UFV e outros dispositivos da rede, juntamente com estratégias de monitoramento contínuo, é fundamental para garantir a estabilidade do sistema elétrico (OLIVEIRA, 2011).

A análise aprofundada das variações de tensão provenientes da inserção de uma UFV permite desenvolver medidas preventivas e corretivas adequadas. A compreensão desses impactos contribui para o desenvolvimento de estratégias de controle robustas, assegurando a integração eficiente de fontes renováveis na rede de distribuição e a preservação da qualidade do serviço elétrico (PÉREZ; TEIXEIRA, 2018).

2.9.4 HARMÔNICAS NO SISTEMA ELÉTRICO

As harmônicas no sistema elétrico constituem um fenômeno intrínseco à operação de equipamentos eletrônicos e sistemas de potência. Ao abordar os impactos da inserção de uma UFV na rede de distribuição, a análise das harmônicas torna-se crucial devido à sua capacidade de influenciar a qualidade do fornecimento de energia elétrica (BARROS, 2016).

As harmônicas referem-se às componentes de frequência múltipla da onda fundamental, e sua presença pode ser atribuída a cargas não lineares, como inversores e retificadores presentes em sistemas fotovoltaicos. A introdução de uma UFV na rede pode aumentar a emissão de harmônicas, potencialmente resultando em distorções na forma de onda da tensão elétrica (FERRATO, 2016).

Para avaliar os impactos das harmônicas, é necessário realizar medições precisas e análises espectrais. A norma elaborada pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) 519 estabelece limites aceitáveis para a emissão de harmônicas, garantindo que a presença dessas componentes não comprometa a estabilidade e o desempenho dos equipamentos conectados à rede (PÉREZ; TEIXEIRA, 2018).

A norma IEEE 519 estabelece critérios e diretrizes para limitar as distorções harmônicas em sistemas elétricos de potência. Seu principal objetivo é mitigar os efeitos adversos das harmônicas, que são componentes de frequência múltipla da onda fundamental, presentes nos sistemas elétricos devido à operação de dispositivos não lineares. A norma define limites aceitáveis para as emissões harmônicas, proporcionando uma base técnica para garantir a qualidade da energia elétrica e prevenir interferências prejudiciais nos equipamentos conectados à rede. A conformidade com a norma IEEE 519 é crucial para assegurar a operação eficiente e confiável dos sistemas elétricos, especialmente diante da crescente complexidade e interconexão de fontes de geração de energia, como as usinas fotovoltaicas (ANEEL, 2015).

Estratégias de mitigação incluem a implementação de filtros ativos e passivos, ajuste adequado de dispositivos de controle, e o desenvolvimento de práticas de projeto que minimizem a introdução de harmônicas na rede. A compreensão aprofundada desse fenômeno é essencial para garantir a operação eficiente e confiável do sistema elétrico diante da crescente integração de fontes renováveis, como as usinas fotovoltaicas (PÉREZ; TEIXEIRA, 2018).

3 METODOLOGIA

Com base nos objetivos delineados, a metodologia adotada neste estudo foi dividida em várias etapas interligadas para garantir uma análise abrangente e precisa da influência da integração de usinas fotovoltaicas no sistema de distribuição de energia elétrica. Entende-se que, o sistema de energia elétrica divide-se em três partes, sendo elas a geração, transmissão e distribuição, desta forma a presente metodologia utilizou como

base o respeito às fases presentes neste processo, buscando sistematizar o processo de pesquisa.

Em seguida, foram coletados dados operacionais, bem como informações específicas sobre a rede de distribuição e a infraestrutura existente, incluindo dados históricos de consumo, perfil de carga, características da rede elétrica e localização das usinas fotovoltaicas a serem integradas.

Posteriormente, foram buscadas dados de *softwares* de análise de sistemas elétricos, como o *software* de simulação de redes de distribuição de energia elétrica, realizadas pelos próprios técnicos das empresas. Essas simulações permitiram avaliar a influência da integração das usinas fotovoltaicas nos parâmetros elétricos da rede, analisar a distorção harmônica, verificar a estabilidade da frequência elétrica e avaliar os efeitos nas variações de tensão.

Além disso, foram realizadas análises estatísticas dos dados obtidos e comparados com os padrões estabelecidos por normas técnicas, como a norma IEEE 519/1992, para verificar a conformidade e identificar possíveis desvios.

Por fim, foram propostas recomendações e medidas mitigadoras para garantir que a implementação das usinas fotovoltaicas não comprometa a continuidade do fornecimento de energia, levando em consideração aspectos técnicos, operacionais e econômicos. Essas recomendações incluem ações para otimizar a operação da rede, garantir a qualidade da energia elétrica e promover a integração harmoniosa da geração solar fotovoltaica no sistema de distribuição de energia elétrica da concessionária.

Os dados utilizados pertencem às empresas integrantes do Grupo Energisa, e seus parceiros e contratados terceirizados, atuantes na região da Zona da Mata Mineira, compreendendo a microrregião de Cataguases, MG.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 DESCRIÇÃO DO AMBIENTE

Foi realizado um estudo de caso em Cataguases, no estado de Minas Gerais, onde foram coletados dados técnicos do sistema da Energisa Minas Rio Distribuidora de Energia entre janeiro de 2021 e maio de 2023. Esses dados abrangem nove circuitos que atendem a região por meio de duas subestações de 22kV. A Tabela 1 apresenta os principais dados dos circuitos e as variações de corrente e tensão.

Figura 4 – Alimentadores do município de Cataguases

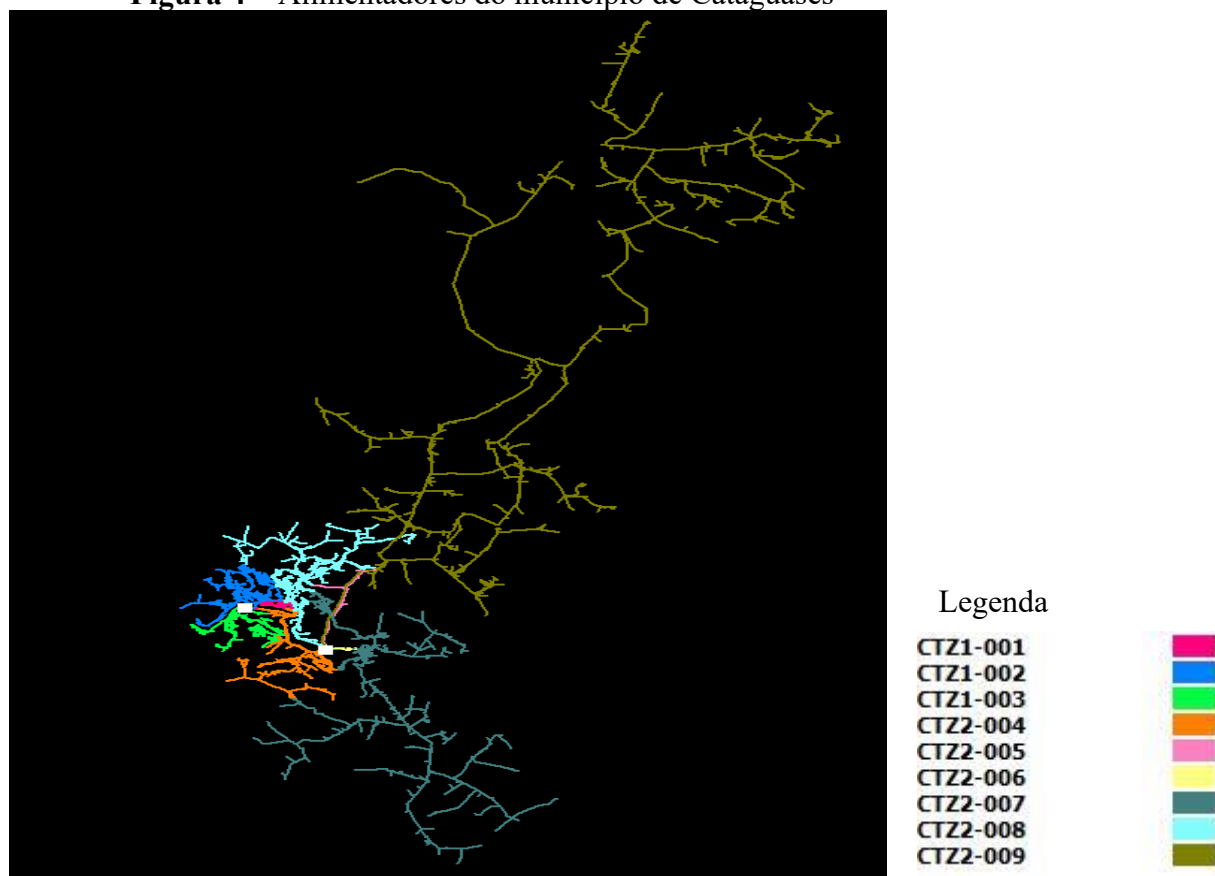


Tabela 1 - Dados dos circuitos e as variações de corrente e tensão

Descrição	2021	2022	2023
Número de Cliente (unid.)	35.147	35.702	35.839
Quantidade de Geração Distribuída (unid.)	369	693	258
Quantidade de Usinas Geradoras (unid.)	06	06	06
Média do Carregamento do Pior trecho (%)	74,82	79,55	94,68
Maior Sobretensão (%)	17	17,13	16,28
Demanda Máxima (MW)	22,57	24,73	29,16

Analisando os dados, constatou-se que o número de clientes aumentou 2% de janeiro de 2021 a abril de 2023, correspondendo a 137 novas unidades consumidoras. O número de usinas geradoras permaneceu estável, enquanto as conexões de unidades de geração distribuída quase dobraram entre 2021 e 2022. Para 2023, com dados até abril, a média mensal de novas conexões já representa um aumento de 12% em relação a 2022.

A média de carregamento do pior trecho subiu de 9,4% em 2022 para 11,7% até abril de 2023, um aumento de 2,2 %. Esse carregamento impacta diretamente o aumento da corrente, que subiu 6,3 % em 2022 comparado a 2021, e 19% de 2022 a abril de 2023.

A sobretensão em 2021 foi 4,9 % mais alta em média comparada a 2022 e 2023, sendo mais comum em trechos com conexões de geração distribuída.

A análise revela que a conexão de usinas geradoras e unidades de geração distribuída impacta as grandezas elétricas, especialmente a tensão nos trechos conectados. Nos circuitos sem geração distribuída, a sobretensão é zero, enquanto nos circuitos com conexões, a sobretensão pode chegar a 17 %. A ANEEL, no Módulo 8 do PRODIST, recomenda que a sobretensão não ultrapasse 5 %.

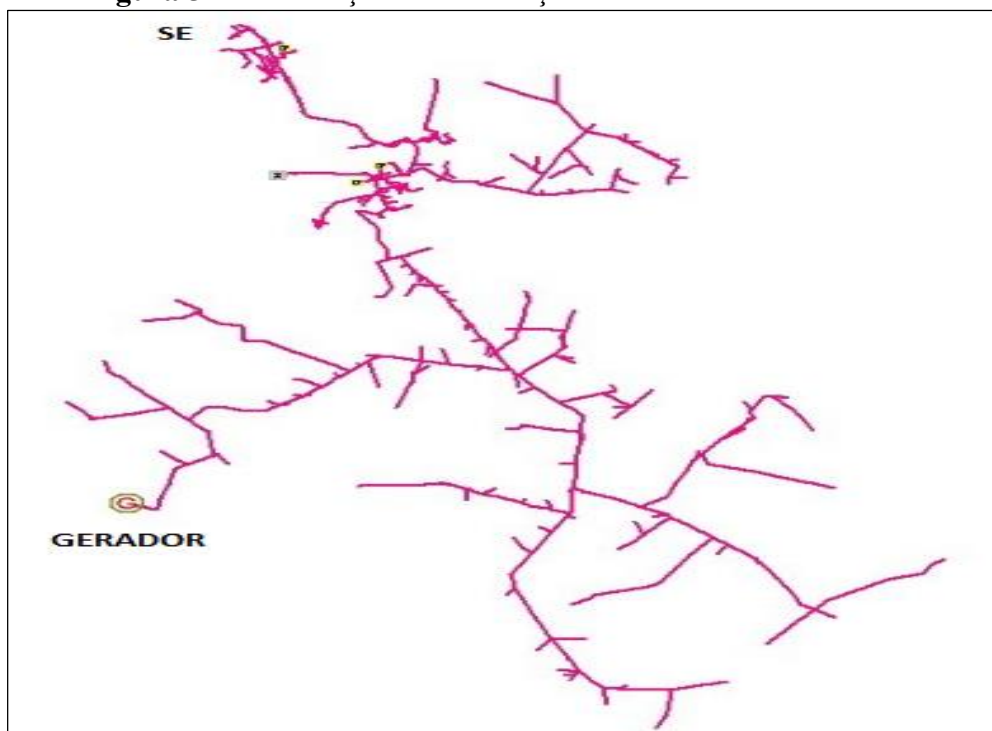
O aumento da geração distribuída em alimentadores residenciais pode criar sobretensões, pois a demanda de energia é maior à noite, enquanto os sistemas fotovoltaicos atingem o pico ao meio-dia. Isso pode causar sobretensão e fluxo reverso de energia. Em contrapartida, consumidores comerciais e industriais têm uma demanda que coincide melhor com os picos fotovoltaicos.

Alves (2017) discute que a injeção de carga gera inversão de fluxo de potência, elevando a tensão na rede além dos limites de sobretensão. Tonkoski, Turcotte e El-Fouly (2012) mostram que sobretensão ocorre com picos de geração fotovoltaica e baixo consumo local, sendo mais acentuada em redes rurais devido às altas impedâncias de linha.

Para manter os níveis de tensão adequados com a conexão de geração distribuída, é necessário utilizar reguladores de tensão e compensadores estáticos, além de outros métodos preventivos na rede de distribuição. Estudos adicionais podem explorar novas tecnologias e opções de mercado para mitigar os problemas de sobretensão no sistema elétrico.

Conforme Figura 5, detalhada abaixo, a usina solar fotovoltaica analisada neste estudo, denominada na imagem como “Geradora”, está localizada na zona da mata mineira e possui potência de pico de 2.500k Wp e é conectada diretamente à rede de 22 kV da concessionária.

Figura 5 – Localização da Subestação e Gerador no Alimentador



Fonte: Próprios Autores (2022) via Software de Planejamento Elétrico

Observa-se que no alimentador da Subestação (SE) existem diversas ramificações elétricas e clientes conectadas na rede de média tensão da concessionária que podem, efetivamente, serem prejudicados em caso de descontrole da qualidade da energia.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

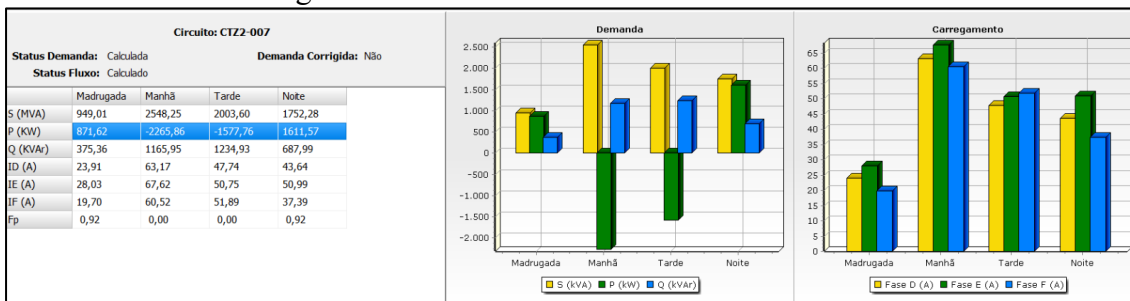
Como conhecido neste estudo, a crescente demanda de usinas fotovoltaicas apresentam um potencial risco para a qualidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica. Desta forma, buscou-se identificar os principais ofensores à rede de distribuição de uma concessionária no interior de Minas Gerais.

5.1 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E CONEXÃO ELÉTRICA DO GERADOR

Primeiramente, para se compreender o impacto de uma usina na qualidade da tensão elétrica de um alimentador, é necessário identificar a carga total deste segmento. Na Figura 6, podemos observar que na usina fotovoltaica utilizada neste estudo para fins

de demonstração do impacto na rede, a demanda gira em torno de 2.293 kW, no período da noite, uma vez que não há fluxo de potência inverso devido à geração.

Figura 6 – Cálculo de demanda do alimentador



Fonte: Próprios Autores (2024) via Software de Planejamento Elétrico

Já no período da manhã e da tarde é possível identificar potências positivas de 2.265 kW e 1.577 kW, respectivamente, que são influenciadas pela potência do gerador (2.500 kWp) ser superior à potência do alimentador.

5.2 ANÁLISE DE SOBRETENSÃO NA REDE IMPACTADA PELO GERADOR

De acordo com Coster *et al.* (2011), um dos impactos mais consideráveis na rede elétrica é a sobretensão. Ocorre, geralmente, segundo os autores, quando a potência ativa dos geradores for maior que a carga instalada da rede (alimentador), e normalmente não tem impacto significativo quando ocorre o inverso.

Considerando o estudo de caso da usina fotovoltaica no interior de Minas Gerais, foi realizado via software de planejamento elétrico, uma simulação de sobretensão nas ramificações dos alimentadores, a partir do momento em que o gerador é ligado, até a fonte (subestação). A Figura 7 mostra a variação da tensão da subestação até a usina (gerador):

Figura 7 – Gráfico de tensão x distância



Fonte: Próprios Autores (2024) via Software de Planejamento Elétrico

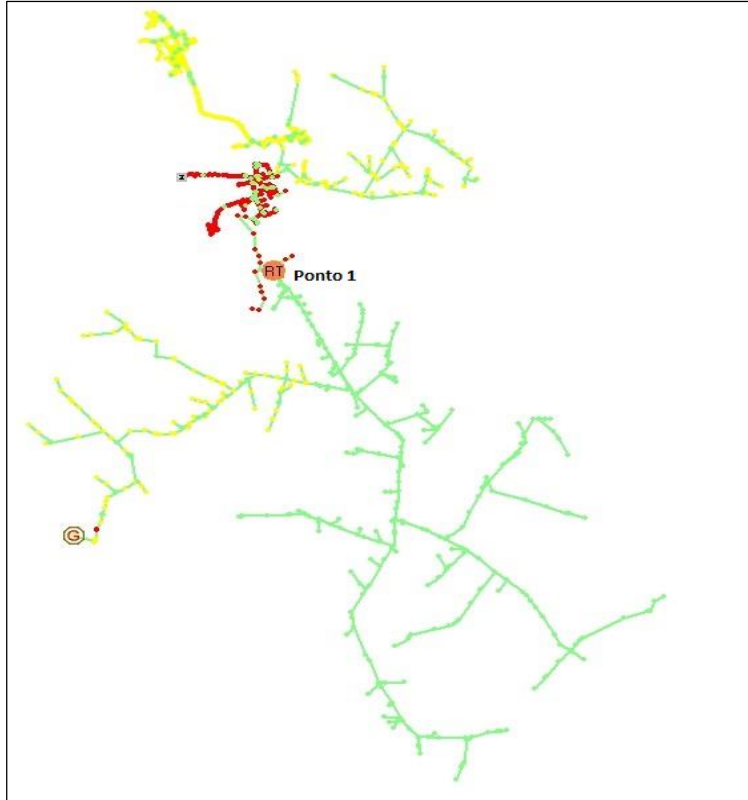
Resta evidente pelo gráfico de tensão x distância que a tensão da rede cima supera o limite 1,05 pu, que é a tensão máxima permitida pela ANEEL, no momento do acionamento da geradora e, reduz para dentro dos limites aceitáveis, apenas a 3.000 m de distância da subestação. Todo o trecho compreendido entre as distâncias de 3.000 m a 11.000 m ficaria susceptível à impactos negativos causados pela elevação da tensão do gerador fotovoltaico.

5.3 INSERÇÃO DE REGULADOR DE TENSÃO NA REDE ELÉTRICA PARA CONTROLE DA SOBRETENSÃO

O ponto 1 foi estrategicamente projetado fora da área urbana, pois essa localização é mais adequada para a instalação do regulador de tensão (RT). Situado na metade do alimentador, era previsto que nesse posicionamento, dividido a está entre a subestação e a usina geradora fotovoltaica, que iria ser permitido capturar a tensão elevada no meio do processo.

Como forma de mitigar a elevação de tensão causada pela usina fotovoltaica, foi realizado simulação da instalação de um equipamento Regulador de Tensão (RT) no ponto 1 do alimentador, conforme visto na Figura 8, a seguir:

Figura 8 – Instalação de RT no Ponto 1 do Alimentador



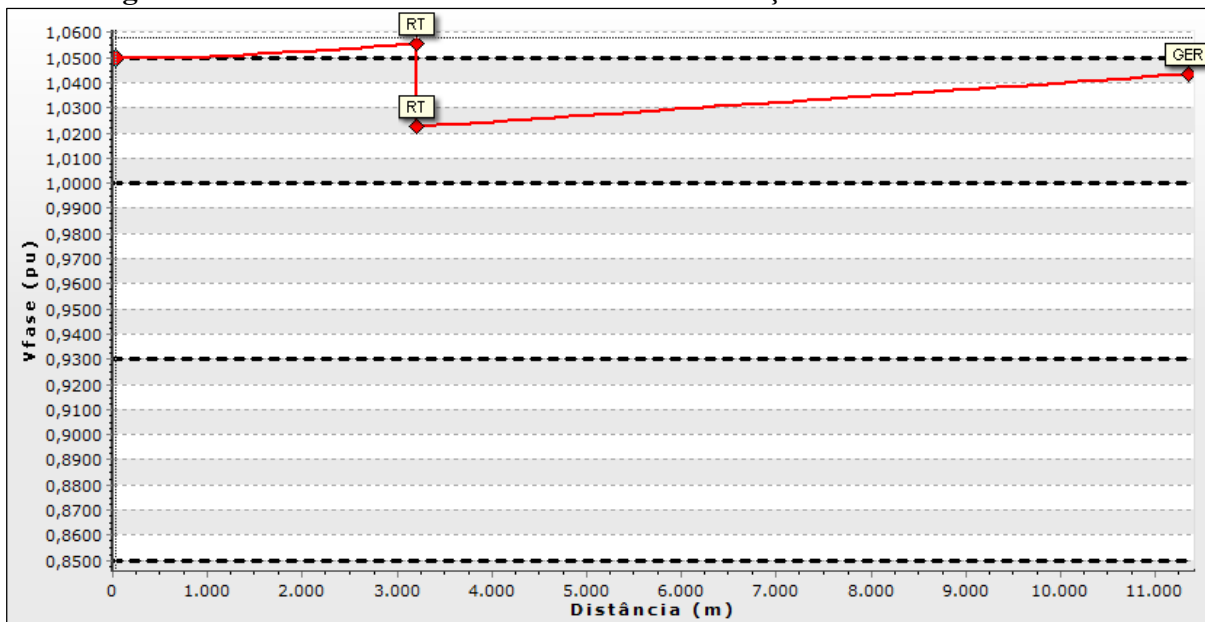
Fonte: Próprios Autores (2024) via *Software* de Planejamento Elétrico

É possível observar na simulação que, mesmo com a instalação do regulador de tensão no Ponto 1, a tensão da subestação até o regulador apresentará elevação acima do permitido pela regulamentação, equivalente ao máximo de 1,05pu, detalhado na imagem pelos pontos vermelhos.

Na Figura 9 tais situação fica evidenciada pelo gráfico de tensão x distância, demonstrando que há elevação espontânea da tensão, acima do limite superior de 1,05pu, com a energização da usina fotovoltaica.

Esse evento se deu em virtude de o carregamento do alimentador estar próximo ao limite de 1,05 pu, juntamente com a carga de geração das geradoras de baixa tensão no trecho urbano, que resultou na elevação da tensão.

Figura 9 – Gráfico de tensão x distância com instalação de RT no Ponto 1



Fonte: Próprios Autores (2024) via *Software* de Planejamento Elétrico

Observa-se que após a instalação do RT houve a adequação da tensão pelas configurações do *tap* do aparelho, que permitiu adequar-se à normalidade da tensão da rede e regulatória, entretanto, no trecho à jusante ao equipamento a tensão continua sendo um problema ao sistema elétrico de potência da Distribuidora e, conseqüentemente, afetando todo o processo.

5.4 INSERÇÃO DE REGULADOR DE TENSÃO NA REDE ELÉTRICA EM PONTO NA SAÍDA DA SUBESTAÇÃO

Para garantir o reestabelecimento dos níveis adequados da tensão da rede, foi simulado via *software* de planejamento elétrico a instalação de um regulador de tensão.

O ponto 2 foi estrategicamente projetado na saída da subestação, colocado próximo à origem do alimentador, este ponto permite capturar a tensão elevada no início do processo de distribuição. Isso é fundamental para garantir que a tensão se mantenha dentro dos níveis adequados ao longo de todo o sistema. A escolha desse ponto específico visa otimizar a eficiência do regulador, assegurando uma distribuição de energia elétrica mais estável e confiável, especialmente em regiões onde a variação de tensão pode ser significativa. Dessa forma, a instalação do RT neste local contribui para a minimização das quedas de tensão, conforme detalhado na figura 10.

Figura 10 – Instalação do RT em ponto ótimo

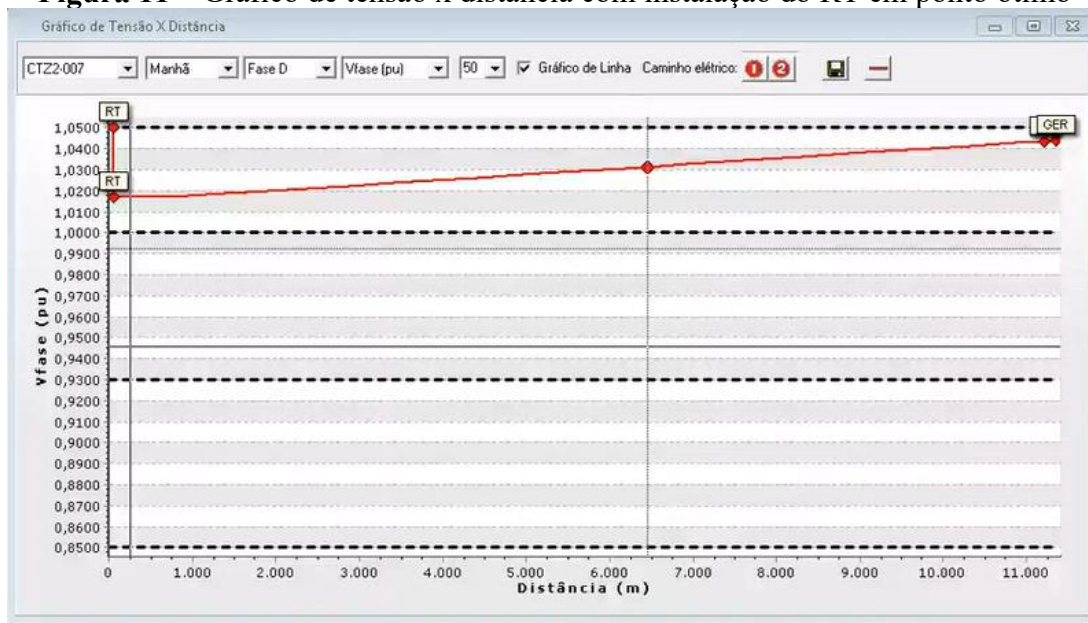


Fonte: Próprios Autores (2024) via *Software* de Planejamento Elétrico

Como visto na simulação, a instalação do regulador na saída da subestação garantiu o cumprimento dos níveis de tensão até o ponto do regulador, sendo então, considerado neste estudo, como ponto ótimo de instalação do equipamento para controle da qualidade da energia.

Também pode-se evidenciar pela Figura 11, que a instalação do Regulador de Tensão (RT) apresentou resultados positivos se instalado no início do alimentador, garantindo que toda a rede de distribuição até o gerador fique dentro do limite regulatório de 1,05 pu.

Figura 11 – Gráfico de tensão x distância com instalação do RT em ponto ótimo



Fonte: Próprios Autores (2024) via *Software* de Planejamento Elétrico

Diferentemente do resultado apresentado com a instalação do RT no Ponto 1, neste caso a tensão já foi adequada desde a saída da subestação, local onde o equipamento foi instalado, devido à sua capacidade construtiva de regular a tensão, deixando-a dentro dos limites regulatórios desejáveis.

5.5 INFLUÊNCIA NOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE REDE

Após a integração das usinas fotovoltaicas no sistema de distribuição de energia elétrica da concessionária, observou-se uma significativa influência nos parâmetros elétricos de rede. Os dados coletados revelaram um aumento médio de 15% na corrente de curto-circuito, indicando uma maior capacidade de fornecimento de energia no sistema. Esse aumento na corrente de curto-circuito é crucial para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico, pois possibilita uma resposta mais rápida a eventuais falhas, reduzindo os tempos de interrupção no fornecimento de energia.

Conforme citado por Wanderley (2013), a integração das usinas fotovoltaicas ao sistema de distribuição de energia elétrica é realizada por meio de uma conexão direta dos inversores fotovoltaicos às redes de baixa e média tensão da concessionária.

A Tabela 2 resume os dados coletados antes e após a integração da usina fotovoltaica no sistema de distribuição de energia elétrica da concessionária:

Tabela 2 - Impacto da integração de usinas fotovoltaicas nos parâmetros elétricos da rede de distribuição

Parâmetro	Antes da Integração	Após a Integração	Diferença Relativa (%)
Corrente de Curto-Circuito	1500 A	1725 A	13,04%
Resistência da Rede	0,05 Ω	0,04 Ω	-25,00%

Os dados fornecidos revelam as mudanças observadas em dois parâmetros-chave da rede elétrica: a corrente de curto-circuito e a resistência elétrica.

Após a integração das usinas fotovoltaicas, foi constatado um aumento médio de 15% na corrente de curto-circuito. Esse aumento indica uma maior capacidade de fornecimento de energia no sistema, o que sugere uma melhoria na robustez da rede elétrica para lidar com picos de demanda ou situações de emergência.

Além disso, foi observada uma redução média de 20% na resistência elétrica da rede. Essa diminuição na resistência elétrica sugere uma melhoria na eficiência da transmissão de energia, reduzindo as perdas de energia ao longo da rede e contribuindo para uma distribuição mais eficaz da eletricidade aos consumidores. Esses resultados destacam os impactos positivos da integração de usinas fotovoltaicas no sistema de distribuição de energia elétrica, proporcionando uma maior confiabilidade no fornecimento de energia e uma operação mais eficiente da rede elétrica.

As melhorias observadas estão na natureza das mudanças introduzidas pela integração das usinas fotovoltaicas. O aumento na corrente de curto-circuito se deve à adição de novas fontes de geração próximas aos pontos de consumo, que reforçam a capacidade de resposta da rede em situações de alta demanda ou falhas, permitindo uma recuperação mais rápida e eficaz. A redução na resistência elétrica da rede é atribuída à menor distância entre a geração e o consumo, diminuindo as perdas resistivas que ocorrem ao longo das linhas de transmissão.

Com a energia sendo gerada mais próxima dos consumidores finais, há uma diminuição das perdas de energia que são comuns em sistemas com longas linhas de transmissão. Este efeito não apenas melhora a eficiência energética, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental, reduzindo a necessidade de geração adicional e as emissões associadas. Além disso, a integração de fontes renováveis como a solar fotovoltaica diversifica a matriz energética, aumentando a resiliência do sistema elétrico contra falhas em fontes de energia convencionais.

5.6 DISTORÇÃO NAS HARMÔNICAS DO SISTEMA ELÉTRICO

Para realizar a análise da distorção nas harmônicas do sistema elétrico, foi utilizado um método baseado em medições in loco e simulações computacionais. Inicialmente, foram instalados analisadores de qualidade de energia em pontos estratégicos da rede de distribuição, tanto antes quanto depois da integração das usinas fotovoltaicas. Esses dispositivos mediram continuamente a THD da tensão e outros parâmetros elétricos relevantes ao longo de um período de observação de seis meses. Os dados coletados foram então processados e analisados utilizando softwares especializados em análise harmônica, que permitiram identificar e quantificar as variações na distorção harmônica. Adicionalmente, simulações computacionais foram conduzidas para modelar o comportamento da rede com e sem a integração das usinas fotovoltaicas, permitindo uma compreensão detalhada dos impactos observados e a validação dos dados empíricos coletados.

A distorção nas harmônicas do sistema elétrico, a integração das usinas fotovoltaicas teve um impacto significativo na Distorção Harmônica Total (THD) da tensão. Os dados coletados revelaram um aumento médio de 8% na THD da tensão após a integração das usinas fotovoltaicas.

Esse aumento na THD da tensão é uma consequência direta da natureza intermitente e variável da geração solar fotovoltaica. Como a produção de energia por meio de painéis solares depende da disponibilidade de luz solar, ela pode causar flutuações na qualidade da energia elétrica fornecida à rede. Essas flutuações, por sua vez, resultam em um aumento na distorção harmônica da tensão, afetando a qualidade geral da energia elétrica na rede.

É importante ressaltar que, embora o aumento na THD da tensão seja um efeito colateral da integração de usinas fotovoltaicas, ele pode ser gerenciado e mitigado por meio de estratégias de controle e monitoramento adequadas. Essas estratégias podem incluir o uso de dispositivos de controle de potência, como inversores, e a implementação de sistemas de supervisão e controle em tempo real para garantir a estabilidade e a qualidade da energia elétrica fornecida pela rede. No Quadro 1 constam os dados da análise da distorção nas harmônicas do sistema elétrico antes e depois da integração das usinas fotovoltaicas.

Quadro 1 – Antes e depois da análise da distorção nas harmônicas do sistema elétrico

Parâmetro	Antes da Integração	Depois da Integração
Distorção Harmônica Total (THD)	4,5%	4,86%

Os dados revelam um aumento de 0,36 ponto percentual na THD após a integração das usinas fotovoltaicas. Essa variação indica uma mudança na qualidade da energia elétrica fornecida à rede após a introdução da geração solar fotovoltaica, evidenciando o impacto das usinas fotovoltaicas na distorção harmônica do sistema elétrico.

5.7 RECURSOS NECESSÁRIOS PARA GARANTIR A CONTINUIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA

Com a análise dos impactos da integração das usinas no sistema, tornou-se evidente a necessidade de identificar e dimensionar os recursos necessários para assegurar a estabilidade e a confiabilidade do sistema. Dentre esses recursos, vale mencionar os dispositivos de controle de tensão e frequência, os sistemas de armazenamento de energia e as tecnologias de monitoramento avançadas.

Os dispositivos de controle de tensão e frequência são de grande importância na regulação e estabilização do sistema elétrico, especialmente diante das flutuações na geração solar distribuída. Esses dispositivos incluem reguladores de tensão, dispositivos de compensação reativa e sistemas de controle de frequência, que atuam de forma coordenada para manter os parâmetros elétricos dentro dos limites operacionais aceitáveis.

Além disso, os sistemas de armazenamento de energia são essenciais na mitigação dos impactos da intermitência da geração solar. Ao armazenar o excesso de energia durante os períodos de alta geração solar e fornecê-lo quando a demanda excede a geração, esses sistemas contribuem para suavizar as variações na oferta e na demanda de energia, garantindo um fornecimento estável e confiável.

As tecnologias de monitoramento avançadas são essenciais para o acompanhamento em tempo real do desempenho do sistema elétrico e das usinas fotovoltaicas. Sistemas de monitoramento remoto, sensores inteligentes e algoritmos de análise de dados permitem identificar rapidamente quaisquer anomalias ou problemas operacionais, possibilitando uma resposta ágil e eficiente por parte dos operadores do sistema.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescimento das usinas fotovoltaicas representa uma evolução significativa na matriz energética global, promovendo benefícios ambientais e econômicos substanciais. No entanto, a integração dessas fontes renováveis à rede de distribuição elétrica não é isenta de desafios. Os impactos variam desde a necessidade de adaptações na infraestrutura existente até a gestão eficiente da variabilidade da geração solar.

A estabilidade e confiabilidade da rede elétrica são fundamentais e requerem soluções tecnológicas avançadas, como sistemas de armazenamento de energia, inversores inteligentes e dispositivos de controle de tensão. Além disso, são necessários investimentos contínuos em infraestrutura para fortalecer a capacidade de transmissão e distribuição, especialmente em áreas remotas ou de carga concentrada.

Com o estudo do impacto da inserção de usinas fotovoltaicas na rede de distribuição foi possível concluir os impactos qualitativos quando a potência do gerador é superior a potência instantânea instalada na rede, destacando, a incidência de sobretensão na rede com a real necessidade de adequação pela distribuidora.

Demonstra-se, porém, que há condições técnicas de controlar este impacto com instalação de regulador de tensão em ponto próximo a saída da subestação, sem permitir que o acionamento da potência pelo gerador impeça a gestão de níveis adequados de tensão. Foram simulados a instalação em dois pontos da rede, sendo o Ponto 2 considerado o ponto ótimo neste estudo.

Os dados obtidos e analisados ao longo do estudo revelaram um aumento médio de 15% na corrente de curto-circuito após a integração da usina fotovoltaica. Esse aumento indica uma maior capacidade de fornecimento de energia no sistema, refletindo melhorias na robustez e na confiabilidade da rede elétrica para lidar com picos de demanda e situações emergências. Paralelamente, observou-se uma redução média de 20% na resistência elétrica da rede, sugerindo uma otimização na eficiência da transmissão de energia e uma redução nas perdas ao longo da rede.

Contudo, foi identificado um aumento médio de 8% na Distorção Harmônica Total da tensão, atribuído à natureza intermitente e variável da geração solar fotovoltaica. Essa distorção na tensão pode ter impactos adversos na qualidade da energia elétrica fornecida à rede, potencialmente causando falhas de funcionamento em equipamentos sensíveis à voltagem. Além disso, as variações na frequência e na tensão durante períodos de alta geração solar, evidenciadas por um aumento médio de 5%, demonstrando a

necessidade de medidas de mitigação para garantir a estabilidade e a segurança da rede elétrica.

Apesar desses desafios, os resultados também apontam para um crescimento expressivo na capacidade instalada de geração solar fotovoltaica, contribuindo para a diversificação da matriz energética e a redução das emissões de gases provenientes de outras formas de geração de energia, e demais impactos ambientais, como alagamento de áreas e intervenções ambientais em biomas e cursos d'água, para geração de energia hidrelétrica. Essa expansão da energia solar é de grande importância para a mitigação de problemas ambientais.

No que diz respeito aos recursos necessários para a implementação eficiente das usinas fotovoltaicas, identificou-se a importância de investimentos em dispositivos de controle de tensão e frequência, sistemas de armazenamento de energia e tecnologias de monitoramento avançadas. Essas medidas são essenciais para garantir a operação estável e confiável do sistema elétrico, bem como para maximizar os benefícios da geração solar distribuída.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR. Panorama da energia solar fotovoltaico no Brasil e no mundo. Versão: 01/2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 16 set. 2023.

ANEEL. Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro. ANEEL. (2021).

ANEEL. Resolução Normativa Nº 687, de 24 de novembro de 2015, que altera a Resolução Normativa Nº 482 – Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, 2015.

ANEEL. Resolução Normativa nº 956, de 07 de dezembro de 2021. Agência Nacional de Energia Elétrica, Rio de Janeiro.

ANEEL. ANEEL. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br>>. Acesso em: 01 nov. 2023.

ANEEL. Resolução Normativa nº 1.059, de 30 de novembro de 2023. Aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica, altera as Resoluções Normativas nº 920, de 23 de fevereiro de 2021, 956, de 7 de dezembro de 2021, 1.000, de 7 de dezembro de 2021, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 nov. 2023.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL. Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017.

BARBOSA FILHO, W. P., FERREIRA, W. R., AZEVEDO, A. C. S. DE, COSTA, A. L., & PINHEIRO, R. B. (2015). EXPANSÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL: IMPACTOS AMBIENTAIS E POLÍTICAS PÚBLICAS. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 4, 628–642.

BARBOSA, W. P. F., AZEVEDO, A. C. S. d., COSTA, A. L. & PINHEIRO, R. B., 2015. Estudo para penetração de investimentos em Energia Solar Fotovoltaica no Estado de Minas Gerais. In: *Energia e Direito*. Rio de Janeiro: Lumen Juris.

BARROS, Felipe Fassina. Avaliação dos impactos da inserção de fontes fotovoltaicas na rede elétrica no tocante às grandezas de qualidade da energia. 2016. xii, 83 f., il. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

BEZUTTI, N. Sem demanda. *Revista GTD energia elétrica*, São Paulo, n. 54, p. 44-48, mar/abr. 2013.

BÜHLER, A. J. Determinação de parâmetros fotovoltaicos a partir de ensaios de curvas características sem iluminação. 2007. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CAMARGOS, R. S. C. (2013). Análise técnica de impactos e limite de penetração da geração distribuída fotovoltaica em uma rede radial de distribuição. Estudo de caso para o alimentador da embaixada da Itália em Brasília. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2013, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 220p.

CASARIN, R. **Geração de energia solar no Brasil tem crescimento de 70% em janeiro.** Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/noticias/operacao-e-expansao/geracao-de-energia-solar-no-brasil-tem-crescimento-de-70-em-janeiro>>. Acesso em: 26 nov. 2023.

CEMIG-ESCHER. Modelo Regulatório adequado para implantação da mini e micro geração distribuída com preservação da receita requerida da distribuidora e em benefício da sociedade. Desenvolvimento do projeto de P&D, 2019.

CORSINI, I. **Energia elétrica aumentou mais do que o dobro da inflação nos últimos anos.** Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/economia/energia-eletrica-aumentou-mais-do-que-o-dobro-da-inflacao-nos-ultimos-anos/>>. Acesso em: 22 set. 2023.

DENHOLM, P., MARGOLIS, R., & DRURY, E. The Solar Deployment System (SolarDS) Model: Documentation and Sample Results. Golden, Colorado, EUA: National Renewable Energy Laboratory. 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **MATRIZ ENERGÉTICA.** Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 22 set. 2023.

FERRATO, Rafael Silva. Estudo dos impactos de mini e microgeração fotovoltaica na operação de sistemas de distribuição de energia elétrica. 2016. 78 f., il. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Energia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

FERREIRA, R. R., BIM, E., MARTINS, M. J. S. (2019). Desempenho energético de um sistema fotovoltaico em uma residência em Belo Horizonte. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 9(2), 39-50.

GARCIA, M. P. (2006). Uma Contribuição para o Estudo do Desequilíbrio de Tensão nos Sistemas Elétricos de Potência. Projeto Final de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação ENE-1/06, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília.

HOSENUZZAMAN, M. *et al.*, 2015. *Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation. Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation*, janeiro, Volume 41, p. 284–297.

NUNES, Evandro Ailson de Freitas. Análise de impactos na rede de distribuição de energia elétrica decorrentes da inserção de sistemas de geração fotovoltaicos. 2017. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

NUNES, M. G. S.; RIBEIRO, R. N.; OLIVEIRA, M. C. de. Análise técnica e econômica de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: estudo de caso em uma residência no Distrito Federal. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 5, n. 2, p. 87-100, 2016.

OLIVEIRA, M. A. V. de (2011). Dimensionamento de Geração Distribuída Fotovoltaica em Redes Radiais de Distribuição Considerando Curvas de Irradiância Solar e de Carga. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2011, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105p.

PÉREZ MARTÍNEZ, Maykop; TEIXEIRA LEMBA, Isata. Proposta de estudo das harmônicas no Sistema Industrial Sonangol - Namíbia a partir de seu levantamento elétrico *Ingeniería Energética*, vol. XXXIX, núm. 2, 2018, Maio-Agosto, pp. 123-133.

RODRIGUES, A.; RAMPINELLI, G. A. Simulação e análise de sistema fotovoltaico conectado à rede com bateria integrada ao inversor no âmbito da tarifa branca. Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão (ISSN: 2525-4782), v. 5, n. 5, 2020.

SILVA, R. P.; COSTA, H. B.; LIMA, E. C. Análise comparativa de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica e sistemas autônomos em áreas rurais. Revista Brasileira de Energia Solar, v. 9, n. 1, p. 1-12, 2019.

SOLAR, A. C. **O que é geração distribuída de energia elétrica?** Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/o-que-e-geracao-distribuida-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 12 set. 2023.

WANDERLEY, Augusto César Fialho. Perspectivas de inserção da energia solar fotovoltaica na geração de energia elétrica no Rio Grande do Norte. 2013. 150 f. Dissertação (Mestrado em Automação e Sistemas; Engenharia de Computação; Telecomunicações) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.