



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica

VINÍCIUS JOSÉ DO BOMFIM SILVA

ANÁLISE DE DISTÚRBIOS NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PARA ALOCAÇÃO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Bom Jesus da Lapa–BA
Agosto de 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica

Vinícius José do Bomfim Silva

**ANÁLISE DE DISTÚRBIOS NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
PARA ALOCAÇÃO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Stefânia de Oliveira Silva

Bom Jesus da Lapa-BA
Agosto de 2024

FOLHA DE APROVAÇÃO

VINÍCIUS JOSÉ DO BOMFIM SILVA

ANÁLISE DE DISTÚRBIOS NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PARA ALOCAÇÃO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Trabalho de Conclusão de Curso foi aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, aprovada em sua forma final pelo Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia.

Bom Jesus da Lapa, 20 de Agosto de 2024

Profa. Dra. Stefânia de Oliveira Silva (UFOB)
(Orientadora)

Prof. Dr. Leandro Leysdian Oro Carralero (UFOB)

Prof. Dr. Manoel Messias Silva Junior (UFOB)

FICHA CATALOGRÁFICA

S586

Silva, Vinícius José do Bomfim

Análise de distúrbios nos sistemas de distribuição para alocação de geração fotovoltaica. / Vinícius José do Bomfim Silva. – 2025.

53f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Stefânia de Oliveira Silva

TCC - Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA, 2025.

1. Sistemas de distribuição. 2. Distúrbios elétricos. 3. Rede de distribuição. I. Silva, Stefânia de Oliveira. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA. III. Título.

CDD 621.319

Biblioteca Universitária de Bom Jesus da Lapa – UFOB

Dedico este trabalho a minha mãe, Vivaldina do Bom-fim, que sempre me inspirou a perseguir meus sonhos com paixão e determinação.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido saúde e força para superar todas às adversidades durante a jornada acadêmica.

À minha família, em especial a minha mãe Vivaldina do Bomfim e ao meu pai José Cícero da Silva, que sempre me apoiam diante das adversidades da vida e cujas orações e encorajamento foram fundamentais para meu sucesso.

Agradeço também aos meus amigos e colegas, cujo apoio desempenhou um papel fundamental ao longo desta jornada de crescimento, oferecendo incentivo tanto nos momentos de desânimo quanto nas ocasiões de alegria.

Agradeço minha orientadora à professora Dra. Stefânia de Oliveira Silva, cujo apoio, orientação e ideias tornaram esta jornada uma experiência verdadeiramente inspiradora. Sua dedicação e paciência foram notáveis ao conduzir este projeto. Quero estender meus agradecimentos a todos os professores do curso pela excelência de ensino e vasto conhecimento compartilhado.

Gostaria de expressar minha gratidão à Universidade Federal do Oeste da Bahia pela sua política de assistência estudantil, ao prover os recursos financeiros necessários ao decorrer do curso, além de fornecer a infraestrutura essencial para a realização deste trabalho. Também gostaria de estender meus agradecimentos à equipe de assistência social, aos servidores, técnicos, bem como às pessoas responsáveis pela limpeza e vigilância. Suas contribuições e dedicação tornaram minha jornada acadêmica mais suave e produtiva.

“Diga-me e eu esquecerei, ensina-me e eu poderei lembrar, envolva-me e eu aprenderei.”

(Benjamin Franklin)

Resumo

Diante da grande demanda pelo consumo de energia elétrica provocado pela globalização e pelo crescimento populacional, o acréscimo na necessidade energética da sociedade tornou-se impreterível, levando à busca por fontes de energia renováveis, com a grande ênfase na geração distribuída. O surgimento dos sistemas de geração distribuída de fonte solar é uma forma de diversificar a matriz energética do sistema interligado nacional, aproximando os pontos de geração das cargas. Devido ao crescimento do número de conexões de geração distribuída, há necessidade de analisar o impacto dos distúrbios gerados mediante essas conexões na rede de distribuição. O modelo regulatório prevê que a ligação dos sistemas distribuídos não comprometam a qualidade do fornecimento de energia elétrica aos consumidores nem o nível de desempenho da rede de distribuição. Portanto, o objetivo deste projeto é analisar, por meio do programa de Análise de Redes Elétricas - ANAREDE em um sistema de distribuição da cidade de Barreiras-BA, os distúrbios provocados pela inserção de geração distribuída em sistemas de distribuição sob alto carregamento, nas proximidades do barramento.

Palavras-chave: Distúrbios Elétricos, Geração distribuída, Qualidade de energia elétrica, Rede de distribuição, Sistema de distribuição.

Abstract

Given the high demand for electricity consumption driven by globalization and population growth, the increase in society's energy needs has become imperative, leading to the search for renewable energy sources, with a strong emphasis on distributed generation. The emergence of distributed generation systems from solar sources is a way to diversify the energy matrix of the national interconnected system, bringing generation points closer to the loads. Due to the growing number of distributed generation connections, it is necessary to analyze the impact of the disturbances generated by these connections on the distribution network. The regulatory model stipulates that the connection of distributed systems should not compromise the quality of electricity supply to consumers nor the performance level of the distribution network. Therefore, the objective of this project is to analyze, using the Electrical Network Analysis Program - ANAREDE, in a distribution system in the city of Barreiras-BA, the disturbances caused by the insertion of distributed generation in distribution systems under high loading, near the busbar.

Keywords: Electrical Disturbances, Distributed generation, Electrical power quality, Distribution network.

Lista de Figuras

1	Fluxograma do projeto.	16
2	Distúrbios encontrados no sistema elétrico.	21
3	Crescimento de fontes de Geração ano 2023.	26
4	Geração de fontes energéticas em 2023.	26
5	Modelo Sistema Elétrico de Potência fluxo unidirecional.	27
6	Modelo Sistema Elétrico de Potência fluxo bidirecional.	27
7	Diagrama unifilar do sistema distribuição.	29
8	Diagrama unifilar sistema de distribuição de Barreiras-BA.	33
9	Sistema de distribuição com inserção de geração distribuída.	35
10	Sistema teste operando com carregamento pesado.	36
11	Terceiro incremento de potência no sistema.	39
12	Varição da tensão por incremento de potência no sistema	40
13	Limites de tensão violado.	41
14	Recorte das barras do sistema com carga pesada.	42
15	Sistema com carga pesada.	43
16	Varição da tensão por incremento de potência no sistema.	43
17	Melhora nos níveis de tensão com inserção de Geração Distribuída (GD).	44
18	Limites de tensão violados no ultimo incremento de GD.	45

Lista de Tabelas

1	Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 2.3 kV (380/220)	23
2	Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 2.3 kV (380/220)	23
3	Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 2.3 kV e inferior a 69 kV	23
4	Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV	23
5	Dados dos barramentos principais	30
6	Dados das Linhas	31
7	Dados das barras de carga	32
8	Geração Máxima de Potência Ativa (MW) e Reativa (MVar)	32
9	Dados do sistema sem contingência	34
10	Dados das linhas	34
11	Relação entre Potência Injetada e Tensão em pu	35
12	Dados do sistema com contingência	36
13	Relação entre Potência Injetada e Tensão em pu	37
14	Dados do sistema sem contingência	39
15	Dados do sistema com contingência	42

Lista de quadros

1	Referências bibliográficas consultadas	19
2	Nomenclaturas comuns dos distúrbios elétricos.	21

Lista de abreviaturas, acrônimos e siglas

ANAREDE	Análise de Redes Elétricas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
BEN	Balanco Energético Nacional
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CLP	Controlador Lógico Programável
DE	Distúrbios Elétricos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração Distribuída
GFV	Geração Fotovoltaica
GDFV	Geração Distribuída Fotovoltaica
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
MT	Média Tensão
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
p.u	Por Unidade
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RTDS	<i>Real Time Digital Simulator</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
TL	Tensão de Leitura
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UFPA	Universidade Federal do Pará

Lista de Símbolos

A	Ampere
B_{km}	Elemento da matriz de susceptância entre as barras k e m
G_{km}	Elemento da matriz de condutância entre as barras k e m
Hz	Hertz
MW	Megawatt
MVar	Megavolt-ampère reativo
P	Potência ativa
P_k	Potência ativa (gerada ou consumida) na barra k
PQ	Barra com potências ativa e reativa constantes
PV	Barra com potência ativa e tensão constantes
Q	Potência reativa
Q_k	Potência reativa (gerada ou consumida) na barra k
R	Resistência
V	Volt
V	Barra com tensão constante
V_k	Tensão eficaz na barra k
V_m	Tensão eficaz na barra m
W	Watt
X	Reatância
θ	Barra com ângulo constante
θ_k	Ângulo de tensão da barra k
θ_{km}	Defasagem da tensão entre a barra k e a barra m

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivo	15
1.2.1	Objetivos específicos	15
1.3	Metodologia da Pesquisa	15
1.4	Organização do texto	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1	Qualidade de Energia Elétrica	20
3.2	Fluxo de Potência	23
3.3	Geração Distribuída	25
4	DESENVOLVIMENTO	29
4.1	Sistema Distribuição de Barreiras-BA	29
4.2	Ferramenta computacional	32
5	ESTUDO DE CASO	33
6	RESULTADOS	38
6.1	Simulação com baixo carregamento	38
6.2	Simulação com alto carregamento	41
6.3	Trabalhos Futuros	47
7	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS	51

INTRODUÇÃO

Diante da crescente demanda por energia elétrica nas últimas décadas, surgiu a necessidade de buscar outras fontes de energia que reduzam custos, minimizem impactos ambientais e estimulem o consumo e o desenvolvimento. Nesse contexto, as fontes renováveis desempenham um papel fundamental como parte essencial da matriz energética. Assim, destaca-se a Geração Distribuída (GD), neste novo cenário, realocando a produção de energia para locais próximos aos grandes centros de consumo e demanda. Essa abordagem visa gerar energia elétrica no mesmo local em que a carga é consumida, minimizando significativamente as perdas e os custos associados (MOHAN, 2016).

Segundo Ahmed (2019), o processo de planejamento, operação e expansão do Sistema Elétrico de Potência (SEP), demanda uma necessidade contínua e abrangente de estudos e análises. Esses estudos têm o propósito de avaliar o desempenho atual do sistema e examinar a eficácia de possíveis planos alternativos para a expansão do mesmo. Entre essas análises, o Fluxo de Potência é destacado como uma das principais formas para avaliar a rede elétrica no contexto de planejamento, operação e expansão. Essas análises desempenham um papel significativo ao assegurar um elevado nível de confiabilidade no sistema de energia e garantir o uso mais eficiente dos recursos de investimento.

De acordo com Mohan (2016), devido a adição de sistemas de geração distribuída próximos aos centros de consumo, as concessionárias devem agora autorizar sua conexão à rede e monitorar seu impacto nos alimentadores, seguindo as normas do Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Esse novo modelo de rede desafia as concessionárias tanto em termos operacionais quanto de planejamento, à medida que o fluxo de potência se torna bidirecional. Devido ao previsto aumento expressivo nas conexões de geração distribuída no país, é interessante avaliar os distúrbios e impacto da integração das fontes de energia

diretamente nas unidades consumidoras, avaliando assim, os níveis de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) e assegurar os níveis estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

1.1 Justificativa

Este projeto tem como base a análise dos distúrbios provocados pela alocação de geração distribuída nas barras do sistema de distribuição. A crescente demanda por instalações de fontes de geração distribuída na rede, sem a devida coordenação com a expansão da infraestrutura, apresenta desafios significativos. A magnitude deste estudo destaca-se pela sua relevância no cenário atual da transição energética, em que a crescente alocação de fontes de (GD), requer uma compreensão dos impactos nos sistemas existentes, de forma a assegurar as concessionárias a cumprir os níveis QEE definidos pela ANEEL, para que ocorra um fornecimento de energia confiável, segura e de qualidade.

1.2 Objetivo

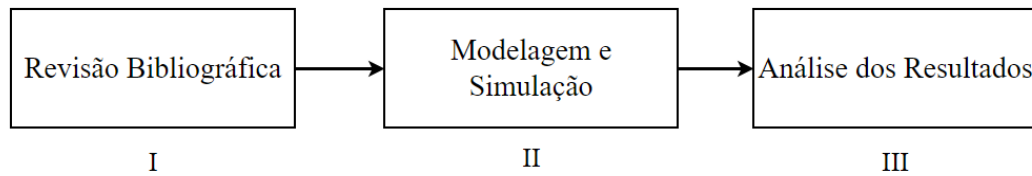
O objetivo deste projeto é analisar os distúrbios no sistema de distribuição de energia elétrica utilizando o programa de análise de redes elétricas - Análise de Redes Elétricas (ANAREDE), para avaliar os impactos da inserção de geração distribuída no sistema de distribuição.

1.2.1 Objetivos específicos

- Modelar e simular o sistema real da cidade de Barreiras-BA no programa de ANAREDE.
- Inserir a geração distribuída na barra de carga do sistema.
- Avaliar os distúrbios perante a inserção de geração distribuída no sistema modelado.
- Verificar os níveis de QEE, diante do sistema modelado.

1.3 Metodologia da Pesquisa

A metodologia da pesquisa deste projeto, baseia-se em revisão bibliográfica e estudo de caso diante de um sistema real de distribuição. Por meio da modelagem e simulação computacional. A estrutura de desenvolvimento segue o fluxograma da Figura 1

Figura 1 – Fluxograma do projeto.

Fonte: Autoria Própria

- I. Na primeira etapa do projeto será feita a escolha de um sistema de distribuição como base nas revisões bibliográficas para realizar o estudo de caso, considerando diferentes tipos de carregamento e potências de geração distribuída em locais específicos.
- II. Na segunda etapa do projeto efetuará a modelagem e simulação no programa de Análise de Redes - ANAREDE como ferramenta principal para analisar o sistema de distribuição em estudo.
- III. Por fim, na terceira etapa, é realizada a análise dos resultados provocados pela alocação de geração distribuída nas barras do sistema.

1.4 Organização do texto

No **Capítulo 2**, é apresentado as referências bibliográficas utilizadas como base para o trabalho.

No **Capítulo 3**, tem-se a fundamentação teórica, abordando alguns conceitos fundamentais sobre Sistema Elétrico de Potência (SEP), (GD), Distúrbios Elétricos (DE), conceituação da (QEE) e fluxo de potência.

No **Capítulo 4**, é demonstrado todo o processo de elaboração, incluindo a modelagem do sistema elétrico escolhido.

No **Capítulo 5**, é demonstrado o processo de simulação, diante da inserção de carregamento no sistema.

No **Capítulo 6**, são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos ao longo do estudo.

No **Capítulo 7**, exposto as considerações finais sobre o trabalho, consolidando as conclusões e destacando pontos relevantes para a pesquisa, com possíveis trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo visa descrever algumas revisões bibliográficas que serviram como parâmetros para o desenvolvimento da modelagem do sistema proposto.

Alves (2010) modelou uma coleção de sistemas de teste de pequenas dimensões, caracterizados por suas topologias específicas e uma abrangente lista de parâmetros elétricos. Incluindo um sistema teste de 9 barras com os padrões elétricos presentes no Sistema Elétrico Brasileiro (SEB). Os cálculos computacionais foram conduzidos por meio de ferramentas computacionais amplamente empregadas no setor elétrico brasileiro como ANAREDE, abordando uma variedade de problemas, tais como fluxo de potência, fluxo de potência ótimo, curto-circuito, estabilidade transitória e estabilidade frente a pequenas perturbações.

Deifelt (2016) analisou a viabilidade técnica de operação do sistema em modo ilhado intencional a partir da geração distribuída, visando garantir a viabilidade da operação no modo ilhado. Utilizou nesse estudo para a análise dos comportamentos dinâmicos e de regime permanente do sistema o programa ANAREDE, para o cálculo dos fluxos de potência e verificação dos parâmetros.

Barata (2017) analisou os efeitos na estabilidade de tensão causados pela incorporação em larga escala de sistemas de geração fotovoltaica Geração Fotovoltaica (GFV) nas redes de distribuição. O modelo utilizado levou em consideração as interações entre um sistema de transmissão de extra alta tensão e seis redes de distribuição de média tensão em funcionamento. O estudo, incorpora os modelos dinâmicos dos transformadores com comutação *detap* sob carga. Foram conduzidas simulações no ANAREDE no domínio do tempo para avaliar diferentes níveis de integração de (GFV) e diversas características de injeção de potência ativa por parte dos sistemas de (GFV).

Andrade et al. (2020) analisaram sistema de distribuição utilizando o programa *OpenDSS*, construindo um modelo de uma rede elétrica de distribuição, levando em consideração diversas configurações de transformadores, cargas e fontes de geração distribuída às quais uma rede elétrica pode ser submetida. Como um caso prático, utiliza dados reais da rede elétrica da Universidade Federal do Pará (UFPA) e incorpora (GD) em vários pontos da rede. Isso é feito para ilustrar o impacto da redução da potência e variação dos níveis de tensão resultantes da integração da geração distribuída (GD) na rede elétrica sob análise.

Diogo et al. (2020) analisaram as variações de tensão de longa duração, considerando curvas de carga e geração distribuída em um sistema de distribuição utilizando simulações por meio do programa *Real Time Digital Simulator* (RTDS). Um sistema baseado em um alimentador real da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), modelado para a realização das simulações computacionais e para analisar o impacto da operação e expansão de geração distribuída.

Negreiros et al. (2022) analisaram os impactos resultantes da alta intermitência dos geradores fotovoltaicos, que estão amplamente conectados à rede elétrica de Média Tensão (MT) e Baixa Tensão (BT). Utilizou um alimentador de distribuição que foi modelado no software *OpenDSS* de acordo com os padrões regulatórios.

Lobo et al. (2022) analisaram os efeitos causados na rede de transmissão devido ao aumento da integração de geradores fotovoltaicos centralizados. Foi conduzida uma análise em uma rede de transmissão de Alta Tensão (AT), em conformidade com os regulamentos vigentes. O estudo foi realizado utilizando o programa ANAREDE e considerou o sistema em regime permanente.

Silva et al. (2022) avaliaram os efeitos da integração de sistemas de geração distribuída fotovoltaica na qualidade da eletricidade, fazendo uso do *software OpenDSS*, em um sistema de distribuição que segue o padrão do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) com 13 barras. As simulações permitiram uma comparação das variáveis elétricas em diversos cenários simulados, permitindo uma análise dos potenciais impactos que a geração fotovoltaica pode ter na rede de distribuição e na qualidade do fornecimento de energia elétrica.

Neste projeto em questão, tem-se como propósito a análise dos distúrbios gerados pela inserção de GD em um sistema teste real da cidade de Barreiras, oeste da Bahia, desenvolvido segundo os padrões SEB. A abordagem visa avaliar os distúrbios resultantes utilizando o programa ANAREDE, mediante a avaliação dos índices de QEE definidos pelo Módulo 8 do PRODIST.

O Quadro 1 apresenta as principais referências bibliográficas utilizadas como base para o desenvolvimento desse trabalho.

Quadro 1 – Referências bibliográficas consultadas

Autor	Ferramenta utilizada	Resultados
Deifelt (2016)	Utilizou o programa ANAREDE.	A presença da (GD) causou uma redução nas tensões das barras.
Barata (2017)	Utilizou o programa ANAREDE.	Quanto maior inserção de sistemas de (GFV) resulta em uma ampliação da margem de estabilidade de tensão.
Andrade et al. (2020)	Utilizou o programa <i>OpenDSS</i> .	A integração de (GD) tem um impacto na rede elétrica, dependendo do nível de penetração da (GD).
Diogo et al. (2020)	Utilizou o programa RTDS.	Alteração no sistema com (GD) que o alimentador modelado é impactado.
Negreiros et al. (2022)	Utilizou o programa <i>OpenDSS</i> .	Elevação das tensões nodais em todas as fases.
Lobo et al. (2022)	Utilizou o programa ANAREDE.	Redução na tensão das barras na condição de não-contingência.
Silva et al. (2022)	Utilizou do programa <i>OpenDSS</i> .	A Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) aprimorou o perfil de tensão até que ocorra o fluxo reverso.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Qualidade de Energia Elétrica

De acordo com Martinho (2009), o conceito de (QEE) engloba uma variedade de termos que abrangem diversos aspectos do sistema elétrico de potência, desde geração, transmissão, distribuição até o consumo final. Isso inclui preocupações relacionadas ao funcionamento de equipamentos elétricos. Em sua essência, o termo é utilizado para descrever qualquer alteração na forma de onda das grandezas elétricas, abrangendo variações na amplitude, frequência, tanto em situações de regime transitório como em regime permanente.

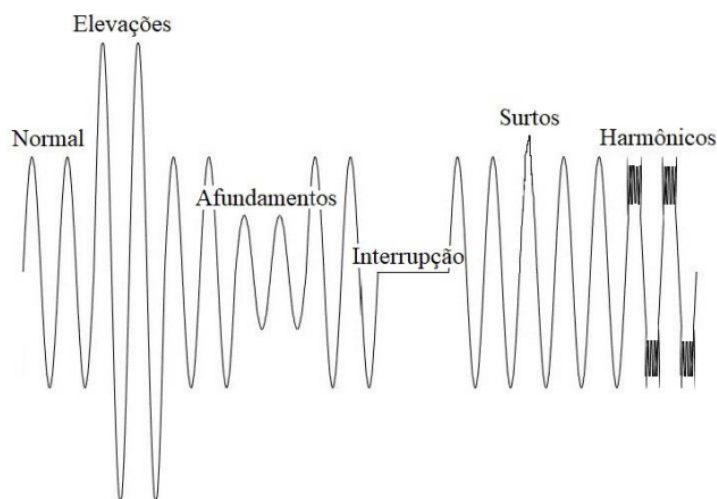
Segundo Pinto (2014), a (QEE) está relacionada à modificação do seu padrão, ou seja, à alteração na forma de onda. No contexto brasileiro, essa forma de onda senoidal é definida com uma frequência de 60 Hz, podendo sofrer distúrbios que resultam em modificações, tanto na amplitude quanto na frequência. Quanto maior for essa alteração, pior será a qualidade da energia. Essas mudanças podem ser causadas por eventos como quedas e surtos de tensão, assim como pela presença de outras frequências além da fundamental. É importante destacar que essas variações podem ocorrer tanto em situações transitórias quanto permanentes, e em qualquer fase do processo de geração, transmissão, distribuição ou consumo de energia elétrica.

Diversos distúrbios contribuem para a deterioração da (QEE). Muitas vezes, esses distúrbios estão relacionados entre si e podem ocorrer ao mesmo tempo. A ocorrência de um evento pode ser desencadeado por outros, tornando a identificação da causa primária que resultou o problema mais difícil.

Martinho (2009) define os problemas relacionados à qualidade de energia em duas

categorias de formas distintas: variação na forma de onda senoidal e alteração na forma de onda. Diante dessa distinção, é possível observar, na Figura 2, as representações gráficas das alterações associadas a esses distúrbios no sistema elétrico.

Figura 2 – Distúrbios encontrados no sistema elétrico.



Fonte: Martinho (2009)

Entre os principais elementos que contribuem para a deterioração da qualidade de um sistema elétrico, destacam-se os seguintes distúrbios de acordo com Martinho (2009) no Quadro 2:

Quadro 2 – Nomenclaturas comuns dos distúrbios elétricos.

Variação na Forma de Onda	Alteração na Forma de Onda
Variação de curta duração	Variação de longa duração
- Afundamento de tensão (<i>SAG</i>)	- Subtensão sustentada
- Elevação de tensão (<i>SWELL</i>)	- Sobretensão sustentada
Surto de tensão	Interrupção sustentada
Harmônica	Redução de fator de potência
Inter-harmônica	Compatibilidade eletromagnética
Cintilação (<i>Flicker</i>)	Sobretensão
Ruído	Subtensão
Variação de frequência	Transitório
Flutuação ou oscilação de frequência	- Impulsivo
Desequilíbrio de tensão	- Oscilatório
	<i>Notching</i>

Ainda de acordo com Martinho (2009), as flutuações de tensão representam um dos distúrbios mais recorrentes na distribuição de energia elétrica. No entanto, apesar de sua ocorrência frequente, essas variações são significativas fontes de preocupação para os consumidores, uma vez que, frequentemente resultam em interrupções operacionais de equipamentos. Essas interrupções, por sua vez, podem desencadear paralisações na

produção ou até mesmo resultar em perda de dados, gerando prejuízos substanciais, no qual tais situações podem afetar os equipamentos elétricos como :

- Desprogramação de microcontroladores, como o Controlador Lógico Programável (CLP);
- Desarme de bobinas de contatos e reles auxiliares e conseqüente desligamento de cargas e equipamentos;
- Variação da velocidade dos motores
- Descalibração de equipamentos médicos eletrônicos; e,
- Falhas de comutação

Martinho (2009), define as variações de tensão de curta duração por nomes específicos, como *Sag*, quando há um afundamento e, *Swell* quando há uma elevação da tensão. Segundo Kagan (2009), o termo *flickers* são oscilações provocadas por cargas variáveis e são percebidas por cintilações na iluminação. Já o termo *Notching* é caracterizado pela presença de pequenos cortes nos semiciclos positivo ou negativo de uma forma de onda de tensão.

A avaliação da qualidade da tensão fornecida ao consumidor por uma empresa de distribuição de energia elétrica envolve vários aspectos, sendo a conformidade com os níveis de tensão em operação contínua o aspecto a ser considerado e definidos pela ANEEL no Brasil.

A ANEEL (2021) estabelece , de acordo com o Módulo 8 da PRODIST, para contratos de fornecimento de energia elétrica com tensões superiores a 2,3 kV junto à distribuidora, as tensões devem estar dentro do intervalo de 95% a 105% da tensão nominal de operação do sistema, e devem coincidir com a tensão em um dos terminais em que ocorra derivação. No caso de consumidores que contratam uma tensão igual ou inferior a 2,3 kV, a tensão fornecida deve ser igual à própria tensão nominal do sistema.

Observa-se, os níveis de tensão nominal de 380/220V, a faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) de acordo com o Módulo 8 do PRODIST descrito na Tabela 1. Convertendo os valores da Tabela 1 em termos de Por Unidade (p.u), adota-se as tensões de 380V e 220V como valores de base, conforme Tabela 3.

Já na Tabela 3 observa-se os níveis de TL permitidos de acordo como o Módulo 8 do PRODIST para uma faixa superior a 2.3 kV e inferior a 69 kV, já a Tabela 4 os níveis de tensão são entre a faixa superior a 69 kV e inferior a 230 kV, os valores são mostrados em p.u.

Tabela 1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 2.3 kV (380/220)

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399)/(202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350)$ ou $(399 < TL \leq 403)$ $(191 \leq TL < 202)$ ou $(231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331$ ou $TL > 403)$ $(TL < 191$ ou $TL > 233)$

Fonte: ANEEL (2021)

Tabela 2 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 2.3 kV (380/220)

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura
Adequada	$(0.92 \leq TL \leq 1.05)$
Precária	$(0.87 \leq TL < 0.92)$ ou $(1.05 < TL \leq 1.06)$
Crítica	$(TL < 0.87$ ou $TL > 1.06)$

Fonte: Autoria Própria

Tabela 3 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 2.3 kV e inferior a 69 kV

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura
Adequada	$(0.93 \leq TL \leq 1.05)$
Precária	$(0.90 \leq TL < 0.93)$
Crítica	$(TL < 0.90$ ou $TL > 1.05)$

Fonte: ANEEL (2021)

Tabela 4 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (p.u.)
Adequada	$(0.95 \leq TL \leq 1.05)$
Precária	$(0.90 \leq TL < 0.95)$ ou $(1.05 < TL \leq 1.07)$
Crítica	$(TL < 0.90$ ou $TL > 1.07)$

Fonte: ANEEL (2021)

3.2 Fluxo de Potência

Monticelli (1993) definiu que o cálculo do fluxo de potência em uma rede de energia consiste na determinação do estado de rede, da distribuição dos fluxos e da determinação de outras variáveis relevantes no sistema. A modelagem dos sistema é estática, em que a rede pode ser descrita por um conjunto de equações e inequações algébricas, sendo representadas mediante as Leis de Kirchhoff e há um conjunto de restrições operacionais

da rede elétrica e seus componentes.

Ainda segundo Monticelli (1993), na formulação mais básica deste problema, em cada nó ou barra da rede elétrica, quatro variáveis estão relacionadas. Duas delas são consideradas como informações fornecidas, enquanto as outras são abordadas como incógnitas no contexto da formulação do equacionamento. Assim, tem:

V_k - magnitude de tensão na barra k ;

Θ_k - ângulo da tensão nodal na barra k ;

P_k - potência ativa na barra k ;

Q_k - potência reativa na barra k ;

Com base nas variáveis nodais que são fornecidas, como dados, e quais são tratadas como incógnitas, pode-se classificar as barras em três tipos distintos:

1. Barra de geração ou barra PV:
 - Constantes de entrada V_k e P_k .
 - Incógnitas calculadas Q_k e Θ_k .
2. Barra de carga ou barra PQ:
 - Constantes de entrada P_k e Q_k .
 - Incógnitas calculadas V_k e Θ_k .
3. Barra de referência (ou Slack):
 - Constantes de entrada V_k e Θ_k .
 - Incógnitas calculadas P_k e Q_k .

A barra de referência estabelece a referência angular para o sistema e, ao mesmo tempo, garante o fechamento do balanço de potência no sistema elétrico.

De acordo com Monticelli (1993), o conjunto de equações do problema de fluxo de carga consiste em duas equações para cada barra. Cada uma delas expressa o princípio de que a potência ativa e reativa injetada em uma barra é igual à soma das potências correspondentes que fluem para fora da barra por meio do sistema elétrico de potência. Logo, são representadas como:

$$P_k = V_k \sum_m V_m (G_{km} \cos(\Theta_k - \Theta_m) + B_{km} \sin(\Theta_k - \Theta_m)), \quad \forall k \quad (1)$$

$$Q_k = V_k \sum_m V_m (G_{km} \sin(\Theta_k - \Theta_m) - B_{km} \cos(\Theta_k - \Theta_m)), \quad \forall k \quad (2)$$

sendo que :

- P_k é a injeção de potência ativa na barra k ;
- Q_k é a injeção de potência reativa na barra k ;
- V_k é a tensão eficaz na barra k ;
- V_m é a tensão eficaz na barra m ;
- G_{km} é o elemento da matriz de condutância entre as barras k e m ;
- B_{km} é o elemento da matriz de susceptância entre as barras k e m ;
- θ_{km} é a defasagem da tensão entre a barra k e a barra m .

Conforme Mohan (2016) explica, para realizar o cálculo do fluxo de potência é necessário conhecer a matriz de admitância do sistema (Y), a qual é derivada dos parâmetros das linhas e contém os valores da condutância (G) e susceptância (B) do sistema, em que $Y = G + jB$. Assim, em relação a cada barra do sistema, as variáveis desconhecidas são tratadas como incógnitas a serem determinadas. A resolução do problema do fluxo de potência envolve métodos matemáticos, necessitando de abordagens numéricas iterativas para solução. O método de Newton-Raphson é amplamente adotado devido à sua eficiência na obtenção dos parâmetros.

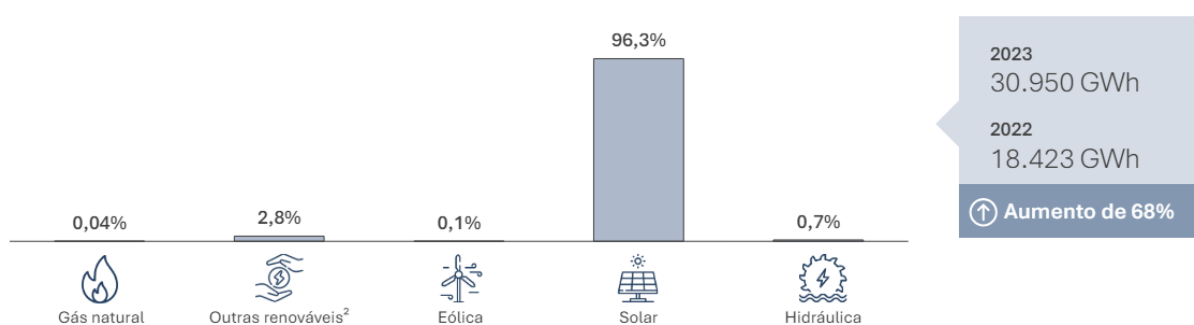
3.3 Geração Distribuída

Nos últimos anos, tem-se notado um impulso global para atender à demanda por energia elétrica por meio de projetos que utilizam fontes de energia renovável. Esse cenário tem sido impulsionado por motivações primordiais, como a crescente consciência ambiental e a viabilidade de geração de eletricidade em proximidade aos centros de consumo, o que resulta em uma redução significativa nos custos de transmissão.

As fontes de energia renovável que vêm sendo amplamente exploradas são, a solar, a eólica e a biomassa. Devido à abundância dessas fontes em todo o mundo, várias unidades de geração têm sido implantadas no interior das áreas urbanas ou em suas proximidades, operando tipicamente em conexão com os sistemas de distribuição de média e baixa tensão. Na literatura especializada, essas unidades de geração são comumente referidas como (GD).

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), revela avanços significativos na construção de projetos de (GD), com ênfase especial na energia solar fotovoltaica. O balanço energético de 2023, conforme o relatório da BEN, indica um crescimento notável de quase 68% na micro e minigeração distribuída em comparação com 2022. A Figura 3 mostra as configurações de capacidade das fontes de geração, com a energia solar liderando o aumento com 96,3%. De acordo com EPE (2023), a energia solar continua sendo a principal fonte de aumento na micro e minigeração distribuída.

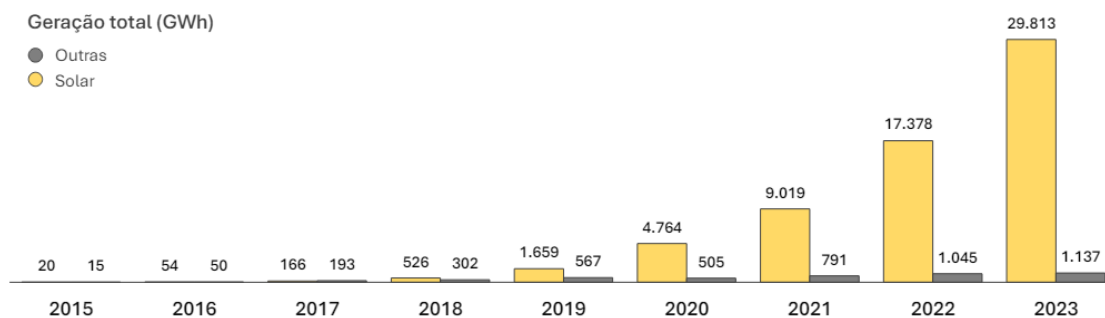
Figura 3 – Crescimento de fontes de Geração ano 2023.



Fonte: EPE (2023)

Segundo o BEN de 2024, que se baseia nos dados de 2023 de instalação, observa-se um desenvolvimento contínuo ao longo do tempo. A evolução da Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) mostra um crescimento constante da geração solar fotovoltaica, superando outras fontes de energia. No ano de 2023, a micro e minigeração distribuída no Brasil, fundamentada na geração solar fotovoltaica, alcançou 26.366 MW de potência instalada e 29.813 GWh de geração, segundo os dados do Balanço Energético Nacional. Pode-se observar na Figura 4 as estimativas de crescimento das fontes de geração solar em comparação com outras fontes de energia.

Figura 4 – Geração de fontes energéticas em 2023.



Fonte: EPE (2023)

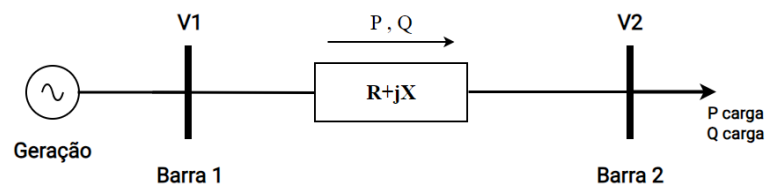
Nos anos vindouros, prevê-se que a contribuição de potência elétrica proveniente

de (GD) continue a expandir-se. Portanto, torna-se imperativo conduzir análises, estudos e investigações aprofundadas a fim de avaliar os potenciais impactos nos sistemas de distribuição de energia elétrica devido ao notável aumento de sistemas fotovoltaicos interconectados à rede (ANEEL, 2021).

A ANEEL (2021) estabeleceu as normas e procedimentos que devem ser aplicados ao setor de distribuição para agregação de sistemas de geração. Nesse sentido, a Agência elaborou o PRODIST, documentos que apresentam a regulamentação e padronização das atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Segundo Mohan (2016), o sistema elétrico em vigor foi concebido com base no tradicional modelo de fluxo unidirecional de potência, e, conseqüentemente, todas as normas, regulamentações e avaliações foram desenvolvidas considerando uma configuração específica, conforme Figura 5. Essa nova estrutura gera efeitos no sistema, que podem manifestar-se de maneira vantajosa ou desvantajosa. Isso pode resultar, por exemplo, em modificações no fluxo de potência, na variação de tensão, nas perdas, nos níveis de distorção harmônica e entre outros fatores que podem causar distúrbios no sistema de distribuição.

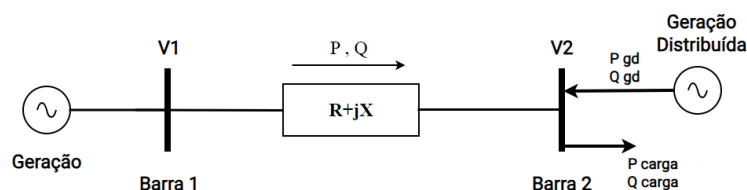
Figura 5 – Modelo Sistema Elétrico de Potência fluxo unidirecional.



Fonte: Autoria Própria

Observa-se na Figura 5, um modelo do SEP, cujo sistema é composto por duas barras infinitas e o sentido do fluxo de potência se dá na direção da carga. Já na Figura 6, tem o mesmo modelo com adição da geração distribuída, no qual o sentido do fluxo de potência torna-se bidirecional.

Figura 6 – Modelo Sistema Elétrico de Potência fluxo bidirecional.



Fonte: Autoria Própria

Os ganhos provenientes da implementação de fontes de (GD) nas proximidades dos centros de consumo se refletem na melhoria da confiabilidade da energia local, ao mesmo tempo em que satisfazem as necessidades dos consumidores próximos.

Pinto (2014) destacou várias vantagens na GD, no qual uma delas está relacionada à adoção de fontes renováveis como a principal fonte de geração de energia, o que ajuda a reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO_2). Além disso, a localização próxima aos centros de consumo permite que a GD melhore a confiabilidade do fornecimento de energia local, atendendo às necessidades dos consumidores próximos.

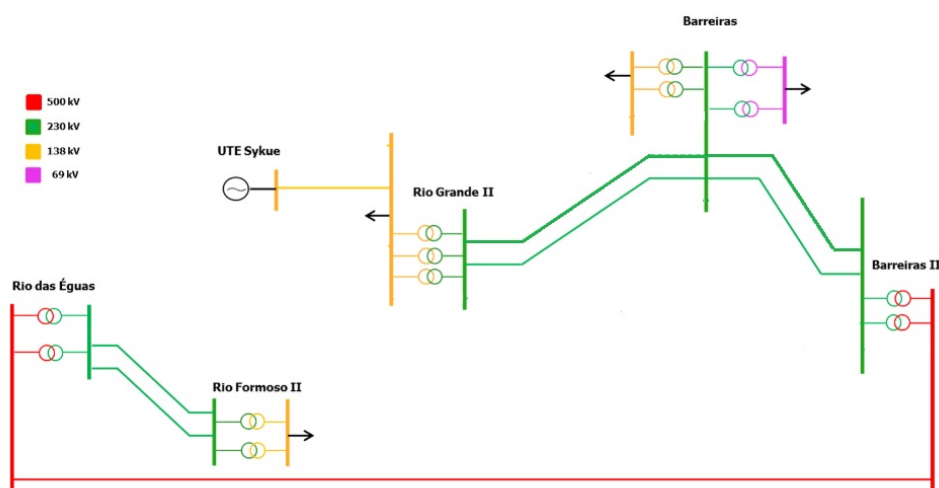
De acordo com Vargas (2018), a GD tem o potencial de reduzir as perdas na distribuição de energia e melhorar o perfil de tensão dos alimentadores, dependendo de fatores como sua localização, capacidade e modo de operação. Em áreas onde o aumento da demanda de energia supera a capacidade de reforço da rede elétrica, a integração da GD pode aliviar a carga nos alimentadores, adiando a necessidade de investimentos adicionais por parte do operador da rede. No entanto, à medida que os pontos de GD são incorporados à rede, surge a potencial inversão do sentido do fluxo de potência, o que pode acarretar desafios para o sistema elétrico e concessionárias. Isso inclui distúrbios no sistema elétrico como os já supracitados, mudanças no fluxo de potência, variações no perfil de tensão na rede, níveis de perdas distintos, considerando que o sistema de distribuição não foi inicialmente concebido para operar sob essa bidirecionalidade.

DESENVOLVIMENTO

4.1 Sistema Distribuição de Barreiras-BA

Para a modelagem do Sistema Elétrico de Potência - SEP, o modelo adotado para utilizar no estudo de caso foi o sistema de distribuição da cidade de Barreiras-BA, onde os dados de rede foram fornecidos pela EPE (2023). O modelo do sistema na Figura 7, trata de um sistema que possui barras principais de interconexão das subestações de distribuição e fornecimento de carga.

Figura 7 – Diagrama unifilar do sistema distribuição.



Fonte: EPE (2023)

O sistema de alimentação das subestações de Barreiras consiste em troncos de alimentação principal no barramento de (500 kV) da SE Rio das Éguas, que alimenta

a SE Barreiras I (500 kV) e Barreiras II (230 kV). A SE Barreiras II se conecta à SE Barreiras I (138/69 kV) e à SE Rio Grande II (138 kV). O fluxo de potência resulta em um escoamento de energia para a alimentação do sistema de distribuição da cidade de Barreiras-BA.

De acordo com os dados EPE (2023), a demanda de consumo é de aproximadamente 492,5 MW e 70,86 MVar em regime de carga pesada. As cargas são distribuídas internamente dispostas nas respectivas barras de carga do sistema de distribuição, abrangendo quatro barras de carga e resultando em uma demanda no período de carga leve de aproximadamente 376,2 MW e 73,13 MVar.

A infraestrutura elétrica consiste em circuitos de interligação das subestações com conexões entre elas por meio de linhas de transmissão de 500/230/138/69 kV, compreendendo um conjunto de linhas de transmissão para distribuição no nível de 13,8 kV. Destaca-se a presença de redundância no sistema, uma vez que, em cada barra, pelo menos dois circuitos estão interconectados. Utilizam-se exclusivamente transformadores elevadores para as barras de geração, com ajuste de *tap* nos sistemas principais de interconexão. Não são incorporados elementos de derivação para o controle de tensão, sendo essa tarefa atribuída exclusivamente aos geradores, por meio da variação da tensão de excitação das máquinas.

Os dados do sistema de distribuição de Barreiras-BA está apresentado na Tabela 5, com os valores de referencia adotados:

Tabela 5 – Dados dos barramentos principais

Número	Tensão (p.u.)	Tensão (kV)	Ângulo (graus)
860	1,04	500	0,7
587	1,03	500	0
846	1,03	500	-0,75
855	1,02	500	-1,46
286	1,01	230	-3,41
59421	1,01	230	-2,51
39050	1,01	230	-2,5
11388	1,01	230	-6,32
11286	1,01	230	-2,53
11287	0,98	230	-4,18
387	1,02	230	-2,67
18510	0,99	138	-5,75
11188	1	138	-10,15
186	1	138	-6,53
686	1,01	69	-5,98
18508	0,98	13,8	-1,54

Fonte: Autoria Própria

Os dados referente as linhas de transmissão do sistema teste se encontram-se na Tabela 6, com os respectivos valores de resistência (R), reatância (X) e susceptância (S) das linhas de transmissão.

Tabela 6 – Dados das Linhas

De	Para	R	X	B
387	587	0,00	4,00	0,00
387	11287	0,80	6,70	0,03
587	860	0,00	-0,58	0,00
686	286	0,00	12,81	0,00
686	286	0,00	13,00	0,00
846	11286	0,00	2,85	0,00
846	11286	0,00	2,85	0,00
855	846	0,00	-0,58	0,00
860	855	0,13	1,84	532,80
11286	39050	1,89	13,74	70,46
11286	59421	2,07	9,89	18,13
11287	24	0,00	25,00	0,00
11287	286	2,19	10,32	19,30
11287	286	2,19	10,32	19,30
11287	18510	0,00	10,00	0,00
11287	18510	0,00	10,00	0,00
11287	18510	0,00	10,00	0,00
11388	387	0,84	6,71	27,41
11388	387	0,84	6,71	27,41
11388	11188	0,00	7,00	0,00
11388	11188	0,00	7,00	0,00
18510	24	0,00	25,00	0,00
18510	18508	0,00	25,00	0,00
39050	22	0,00	25,00	0,00
59421	23	0,00	25,00	0,00
286	186	0,00	9,28	0,00
286	186	0,00	9,28	0,00
286	11286	0,39	1,94	3,66
286	11286	0,13	1,12	4,25
387	587	0,00	4,00	0,00

Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 7, encontram-se os dados de carga, disposto em 4 barras do tipo PQ, com uma potência ativa totalizando 492.5 MW e reativa de 70.86 MVar consumida pelo sistema de distribuição da cidade de Barreiras-BA. E na Tabela 8, encontram-se os dados de geração de potencia ativa e reativa do sistema.

Tabela 7 – Dados das barras de carga

Barra	Nome	Tensão (kV)	Carga (MW)	Carga (MVar)
686	BARREI-BA069	69	70,70	-2,27
11188	RFORM2-BA138	138	193,70	24,05
18510	RGRAN2-BA138	138	109,90	18,57
186	BARREI-BA138	138	118,20	30,51
Total	-	-	492,5	70,86

Fonte: Autoria Própria

Tabela 8 – Geração Máxima de Potência Ativa (MW) e Reativa (MVar)

Barra	Nome	Geração (MW)	Geração (MVar)
587	REGUA-BA500	467,78	333,20
18508	DSYKUE-UTE01	28,50	0
Total		496,28	333,20

Fonte: Autoria Própria

4.2 Ferramenta computacional

O programa utilizado para análise do sistema de distribuição foi o Programa de Análise de Redes ANAREDE na versão acadêmica V11.07, um programa computacional desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), que é muito utilizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e pelas concessionárias, o qual possibilita a realização de estudos em operação e planejamento de sistemas elétricos de potência. O CEPEL disponibiliza para os usuários junto com o ANAREDE um manual, onde podem ser encontradas informações sobre o programa e suas funções disponível em ANAREDE (2023). As seguintes aplicações compõem o ANAREDE :

- Fluxo de Potência, utilizado para determinação as margens de operação do sistema;
- Análise de Contingências, utilizado na avaliação dos impactos e comportamentos do sistema em resposta a ausência ou presença elementos no sistema.
- Análise de Sensibilidade de tensão e fluxo, tem como função o cálculo de fatores da margem de sensibilidade tensão e no comportamento do sentido dos fluxos.
- Equivalente de Redes, que tem como finalidade a determinação de um modelo reduzido de fluxo de potência do sistema.
- Fluxo de potência continuado, utiliza-se para análise de fluxo de potência em sistemas elétricos após mudanças ou contingências no sistema.

Ao rodar o fluxo de potência, analisou-se as variáveis do sistema em que as barras operavam sem contingência e com carregamento baixo, consumindo uma potência mínima total de 492,5 MW ativa e 70,86 MVar de reativa de acordo com o caso base na Tabela 7.

Tabela 9 – Dados do sistema sem contingência

Nome	Tensão(pu)	Tensão(kV)	Ger ativa (MW)	Ger reativa (MVar)	Carga (MW)	Carga (MVar)
BARREI-BA138	1	138	0	0	118,2	30,51
BARREI-BA230	1,01	230	0	39,75	0	0
OREGUA-BA230	1,02	230	0	0	0	0
REGUA-BA500	1,03	500	380,12	328,21	0	0
BARREI-BA069	1,01	69	0	0	52,04	-2,27
BARREI-BA500	1,03	500	0	0	0	0
BARREI1CAP500	1,02	500	0	0	0	0
REBAR1CAP500	1,04	500	0	0	0	0
RFORM2-BA138	1	138	0	0	96,08	24,05
BARRE2-BA230	1,01	230	0	0	0	0
RGRAND-BA230	0,98	230	0	0	0	0
RFORM2-BA230	1,01	230	0	0	0	0
DSYKUE-UTE01	0,98	13,8	28,5	0	0	0
RGRAN2-BA138	0,99	138	0	0	109,9	18,57
Total	-	-	408,62	367,96	376,22	70,86

Fonte: Autoria Própria

Observa-se na Tabela 10, os dados das linhas de transmissão que interligam os barramentos de distribuição da cidade de Barreiras-BA. A tabela apresenta informações sobre resistência, reatância, susceptância e a capacidade de escoamento de carga das linhas.

Tabela 10 – Dados das linhas

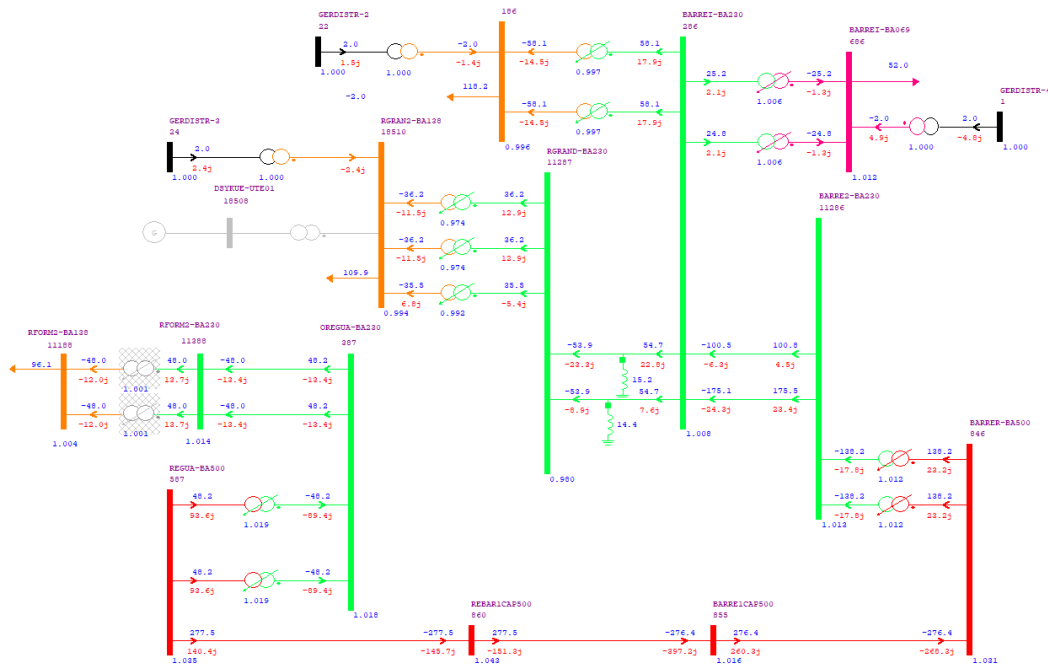
Nome Barra DE	Nome Barra PARA	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (Mvar)	Capacidade Normal
OREGUA-BA230	REGUA-BA500	0	4	0	300
OREGUA-BA230	RGRAND-BA230	0,8	6,7	0,03	500
REGUA-BA500	REBAR1CAP500	0	-0,58	0	1734
BARREI-BA069	BARREI-BA230	0	12,81	0	100
BARREI-BA069	BARREI-BA230	0	13	0	100
BARREI-BA500	BARRE2-BA230	0	2,85	0	300
BARREI-BA500	BARRE2-BA230	0	2,85	0	300
BARREI1CAP500	BARREI1CAP500	0	-0,58	0	1734
REBAR1CAP500	BARREI1CAP500	0,13	1,84	532,8	3710
BARRE2-BA230	DIANO2-TO230	1,89	13,74	70,46	558
BARRE2-BA230	TABOCA-BA230	2,07	9,89	18,13	251
RGRAND-BA230	GERDISTR-3	0	25	0	100
RGRAND-BA230	BARREI-BA230	2,19	10,32	19,3	233
RGRAND-BA230	BARREI-BA230	2,19	10,32	19,3	233
RGRAND-BA230	RGRAN2-BA138	0	10	0	100
RGRAND-BA230	RGRAN2-BA138	0	10	0	100
RGRAND-BA230	RGRAN2-BA138	0	10	0	100
RFORM2-BA230	OREGUA-BA230	0,84	6,71	27,41	558
RFORM2-BA230	OREGUA-BA230	0,84	6,71	27,41	558
RFORM2-BA230	RFORM2-BA138	0	7	0	200
RFORM2-BA230	RFORM2-BA138	0	7	0	200
RGRAN2-BA138	GERDISTR-3	0	25	0	100
RGRAN2-BA138	DSYKUE-UTE01	0	25	0	40
DIANO2-TO230	GERDISTR-1	0	25	0	100
TABOCA-BA230	GERDISTR-2	0	25	0	100
BARREI-BA230	BARREI-BA138	0	9,28	0	100
BARREI-BA230	BARREI-BA138	0	9,28	0	100
BARREI-BA230	BARRE2-BA230	0,39	1,94	3,66	251
BARREI-BA230	BARRE2-BA230	0,13	1,12	4,25	573
OREGUA-BA230	REGUA-BA500	0	4	0	300

Fonte: Autoria Própria

Ao inserir três fontes de geração distribuída no sistema, nos barramentos de distribuição BARREI-69/138 e RGRAN2-138, conectando cada uma em uma barra de geração no nível de tensão de 13,8 kV, que simula uma grande quantidade de residências e grupos

de geração GD para análise de como o sistema se comporta com baixa demanda de carga, mas com uma alta injeção de potência pelo sistema de geração distribuída GD, pode observar essa inserção na Figura 9.

Figura 9 – Sistema de distribuição com inserção de geração distribuída.



Fonte: Autoria Própria

Ao rodar o Fluxo de Potência, foi obtido os valores de tensões em cada barra do sistema, mediante a inserção de geração distribuída gradativamente incrementando com uma potência ativa de 55 MW em cada barra de GD até um total de 220 MW. Como observado na Tabela 11, é possível ver os valores de tensão nas barras para cada inserção de potência.

Tabela 11 – Relação entre Potência Injetada e Tensão em pu

Potência Injetada	0(MW)	165(MW)	330(MW)	495(MW)	660(MW)
Nome barra	1-Tensão pu	2-Tensão pu	3-Tensão pu	4-Tensão pu	5-Tensão pu
BARREI-BA138	0,995	1,000	0,993	0,975	0,940
BARREI-BA230	1,008	1,013	1,010	1,000	0,977
OREGUA-BA230	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018
REGUA-BA500	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035
BARREI-BA069	1,015	1,014	1,006	0,985	0,944
BARREI-BA500	1,031	1,034	1,035	1,033	1,028
REBAR1CAP500	1,016	1,019	1,019	1,014	1,004
RFORM2-BA138	1,004	1,004	1,004	1,004	1,004
BARREI-BA230	1,013	1,016	1,014	1,005	0,988
RGRAND-BA230	0,978	0,989	0,989	0,975	0,943
RFORM2-BA230	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014
RGRAN2-BA138	0,991	1,002	0,998	0,979	0,938

Fonte: Autoria Própria

Após o fluxo de potência, foi analisado o sistema mais sobrecarregado com uma demanda maior de carga nas barras, elevando o sistema com índice de carregamento pesado de acordo com os dados da EPE (2023), com isso o sistema opera quase no limite

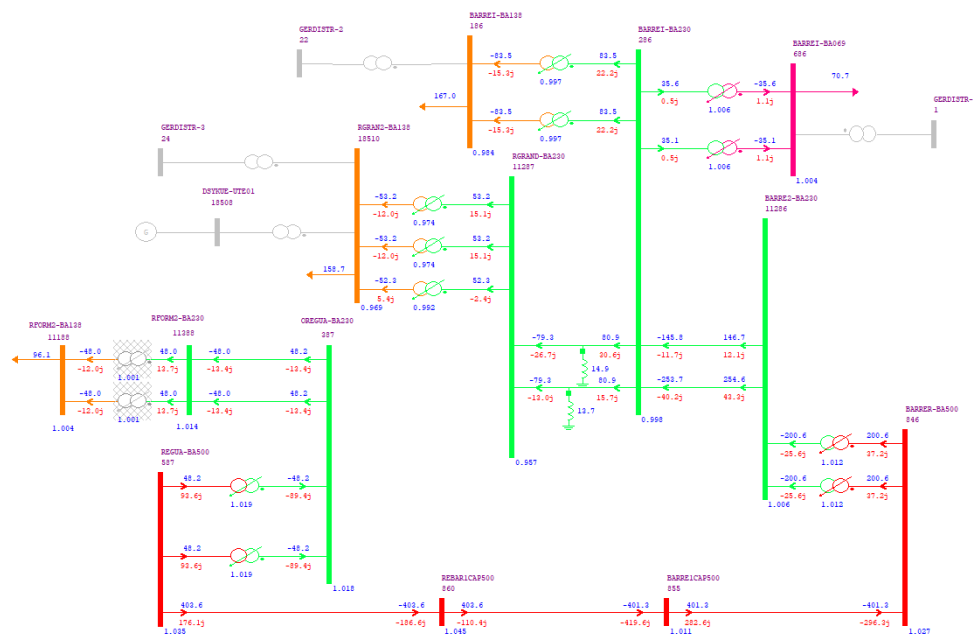
de demanda. Diante disso foi analisado como o sistema se comporta de acordo com inserção de geração distribuída.

Tabela 12 – Dados do sistema com contingência

Nome	Tensão(pu)	Tensão(kV)	Gera ativa (MW)	Gera reativa (MVar)	Carga (MW)	Carga (MVar)
BARREI-BA138	1	138	-	-	167	30,51
BARREI-BA230	1,01	230	-	45,14	-	-
OREGUA-BA230	1,02	230	-	-	-	-
REGUA-BA500	1,03	500	467,78	333,2	-	-
BARREI-BA069	1,01	69	-	-	70,7	-2,27
BARREI-BA500	1,03	500	-	-	-	-
BARREI-CAP500	1,02	500	-	-	-	-
REBARI-CAP500	1,04	500	-	-	-	-
RFORM2-BA138	1	138	-	-	96,08	24,05
BARREI-BA230	1,01	230	-	-	-	-
RGRAND-BA230	0,98	230	-	-	-	-
RFORM2-BA230	1,01	230	-	27,6	-	-
DSYKUE-UTE01	0,98	13,8	28,5	-	-	-
RGRAN2-BA138	0,99	138	-	-	158,7	18,57
DIANO2-TO230	1,01	230	-	-	-	-
TABOCA-BA230	1,01	230	-	-	-	-
Total	-	-	496,28	405,94	492,5	70,86

Fonte: Autoria Própria

Figura 10 – Sistema teste operando com carregamento pesado.



Fonte: Autoria Própria

Após incremento de potência no sistema de geração distribuída do sistema de Barreiras-BA, observá-se o sistema operando com carregamento pesado, segundo os dados fornecidos de carga pelo EPE (2023). Os dados estão na Tabela 13, na qual uma potência de 55 MW foi incrementada em cada unidade de geração distribuída conectada aos barramentos de distribuição.

Tabela 13 – Relação entre Potência Injetada e Tensão em pu

Potência Injetada	0(MW)	55(MW)	110(MW)	165(MW)	220(MW)
Nome barra	1-Tensão pu	2-Tensão pu	3-Tensão pu	4-Tensão pu	5-Tensão pu
BARREI-BA138	0,984	0,995	0,991	0,976	0,944
BARREI-BA230	0,998	1,008	1,008	1,000	0,981
OREGUA-BA230	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018
REGUA-BA500	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035
BARREI-BA069	1,004	1,010	1,004	0,986	0,948
BARRER-BA500	1,027	1,032	1,033	1,032	1,028
BARRE1CAP500	1,011	1,016	1,017	1,014	1,006
REBAR1CAP500	1,045	1,043	1,043	1,046	1,050
RFORM2-BA138	1,004	1,004	1,004	1,004	1,004
BARRE2-BA230	1,006	1,013	1,013	1,006	0,992
RGRAND-BA230	0,957	0,979	0,982	0,972	0,944
RFORM2-BA230	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014
RGRAN2-BA138	0,969	0,992	0,991	0,976	0,940
DIANO2-TO230	1,009	1,009	1,009	1,009	1,009
TABOCA-BA230	1,011	1,011	1,011	1,011	1,011

Fonte: Autoria Própria

Com a inserção, o sistema atingiu um patamar de 220 MW por gerador. Esse aumento foi realizado considerando as restrições do sistema.

RESULTADOS

Este capítulo tem como propósito apresentar os resultados das simulações realizadas no ANAREDE diante do sistema de distribuição de Barreiras-Ba. Resultados, estes, que foram obtidos com a função de avaliar como o sistema está disposto a distúrbios mediante a inserção de geração distribuída.

6.1 Simulação com baixo carregamento

Ao analisar o sistema sem nenhuma fonte de geração distribuída, o sistema de distribuição da cidade de Barreiras-Ba encontrava em pleno funcionamento sem contingência respeitando os limites de tensão definido pelo Módulo 8 do PRODIST pré definidos na simulação com carga leve. Com base na execução do fluxo de potência, foi obtido os dados de cada barra do sistema analisado, e diante disso pode se observar os índices.

Perante aos dados obtidos do sistema distribuição sem contingência, é possível observar que o sistema opera dentro dos limites de tensão estabelecidos, conforme Tabela 14. Este resultado confirma a estabilidade e normalidade do sistema nessas condições específicas.

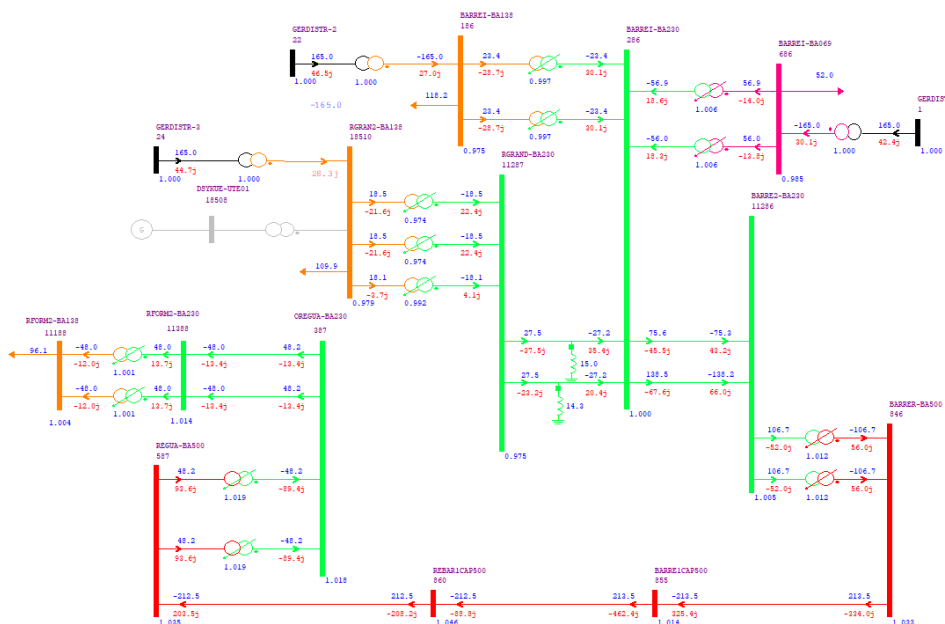
Tabela 14 – Dados do sistema sem contingência

Nome	Tensão (pu)	Tensão (kV)
BARREI-BA138	1,00	138
BARREI-BA230	1,01	230
OREGUA-BA230	1,02	230
REGUA-BA500	1,03	500
BARREI-BA069	1,01	69
BARRER-BA500	1,03	500
BARREICAP500	1,02	500
REBAR1CAP500	1,04	500
RFORM2-BA138	1,00	138
BARRE2-BA230	1,01	230
RGRAND-BA230	0,98	230
RFORM2-BA230	1,01	230
RGRAN2-BA138	0,99	138
DIANO2-TO230	1,01	230
TABOCA-BA230	1,01	230

Fonte: Autoria Própria

Após a realização da simulação do sistema, foi inserido três sistemas de geração distribuída em barras adjacentes para avaliar o comportamento do sistema diante do aumento da injeção de potência e os distúrbios resultantes dessa inserção. O objetivo foi analisar a resposta do sistema à crescente carga e avaliar sua estabilidade operacional sob diferentes condições de geração distribuída. Os dados da execução do fluxo de potência para essa simulação mediante a cada inserção de potência está disposto na Figura 11.

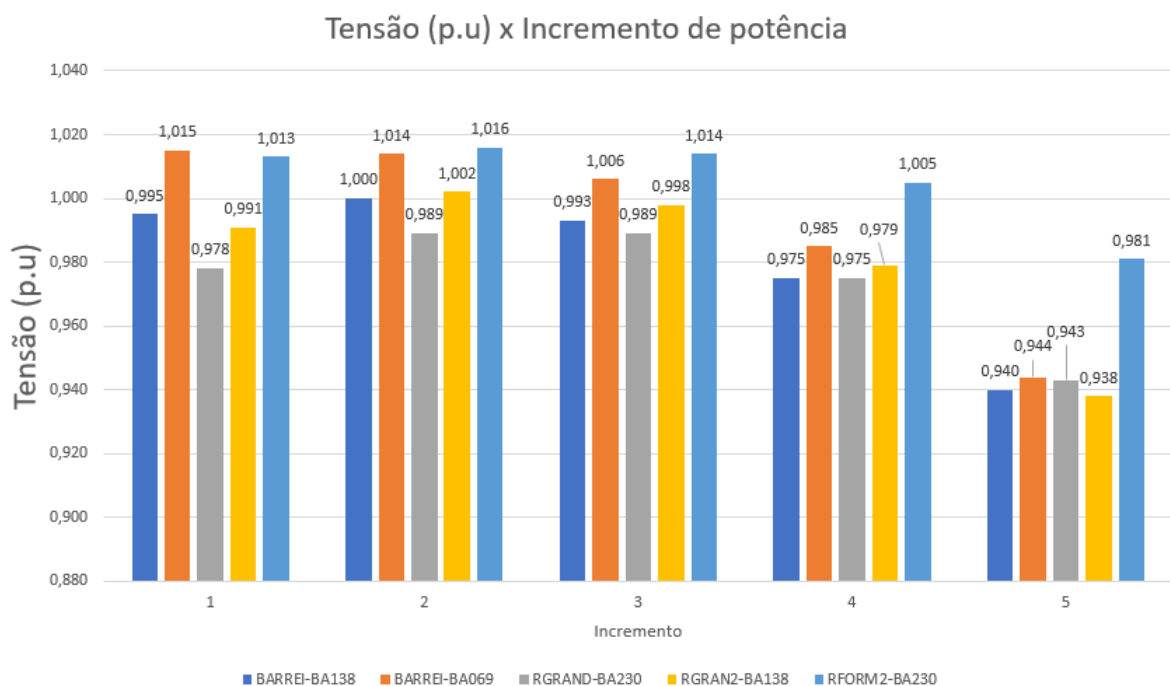
Figura 11 – Terceiro incremento de potência no sistema.



Fonte: Autoria Própria

No gráfico da Figura 12 é possível visualizar as variações de tensão nas barras de carga do sistema. Observa-se que, conforme ocorre um aumento gradativo na potência injetada pelo sistema de geração distribuída, as variações de tensão são significativas. Essa injeção progressiva de potência contribui para melhorar os índices de tensão no sistema, elevando-os para patamares mais favoráveis dentro dos limites pré estabelecidos na faixa de (0.95 a 1.05 p.u) de acordo com Módulo 8 do PRODIST . Esse comportamento é notório até o terceiro incremento de potência, que foi de 165 MW por geração distribuída, podemos observa na Figura 11 os dados de tensão nas barras.

Figura 12 – Variação da tensão por incremento de potência no sistema .

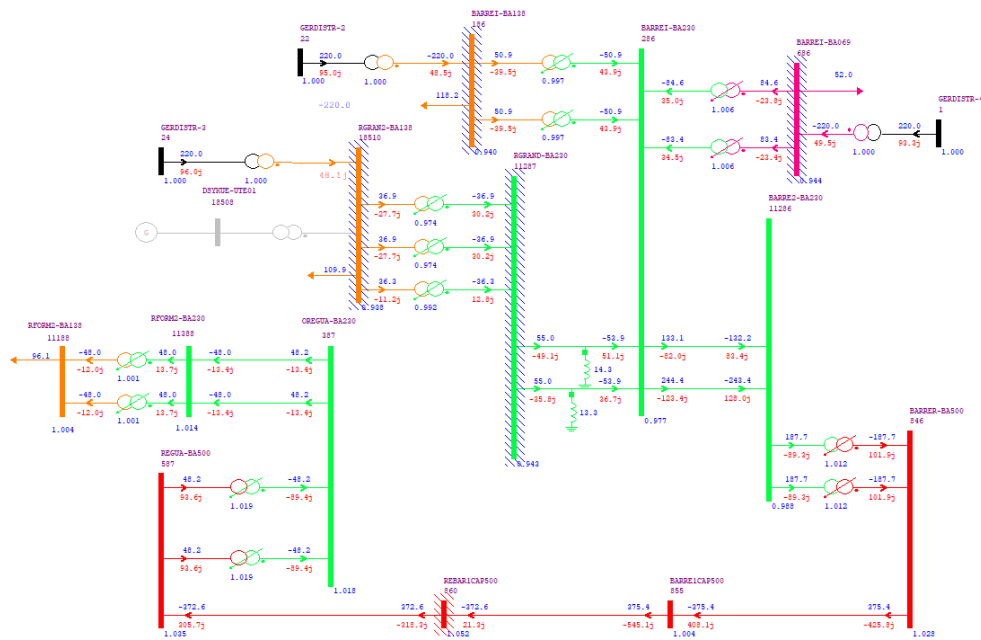


Fonte: Autoria Própria

No quarto incremento de carga provocado pelo sistema de geração distribuída, notamos que as tensões nas barras de carga do sistema começaram a apresentar queda na tensão. Esse padrão se intensificou no quinto incremento, afetando principalmente as barras que estão mais distantes das fontes de geração. Nesse estágio, observou-se um distúrbio significativo caracterizado por um afundamento de tensão, ultrapassando os limites inferiores definidos do Módulo do PRODIST de (0,95 p.u). Esse fenômeno indica que o sistema pode estar enfrentando desafios em manter os níveis de tensão dentro dos limites aceitáveis, podendo resultar em impactos na estabilidade operacional.

Podemos observar na execução do ANAREDE, conforme ilustrado na Figura 13, notamos que os índices inferiores de tensão foram violados, conforme indicado pelas barras hachuradas em azul. Esse cenário revelou que a elevada injeção de potência pode resultar em distúrbios na qualidade da energia no sistema, levando a uma situação em que o sistema não consegue manter os limites de tensão, pós ultrapassando os limites de geração reativa da barra de referência e elementos de controle.

Figura 13 – Limites de tensão violado.



Fonte: Autoria Própria

Essa observação sugere a necessidade de avaliações mais aprofundadas sobre a capacidade do sistema de lidar com aumentos substanciais de potência e destaca a importância de implementar medidas para mitigar tais distúrbios.

6.2 Simulação com alto carregamento

Na segunda fase da análise do sistema, o sistema de distribuição de Barreiras-BA foi submetido a uma contingência em suas barras de carga, elevando o consumo de potência com base no dados da EPE (2023), para carga pesada. Nessa condição, foi adicionado um acréscimo de potência as barras de carga, buscando operar próximo ao limite de geração do sistema. Em seguida, o fluxo de potência foi executado para analisar o desempenho do sistema nessas condições críticas.

É importante ressaltar que essa simulação foi realizada sem a presença de geração distribuída. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 15, proporcionando análise sobre o comportamento do sistema quando operando próximo ao limite de geração,

considerando a mencionada contingência nas barras de carga.

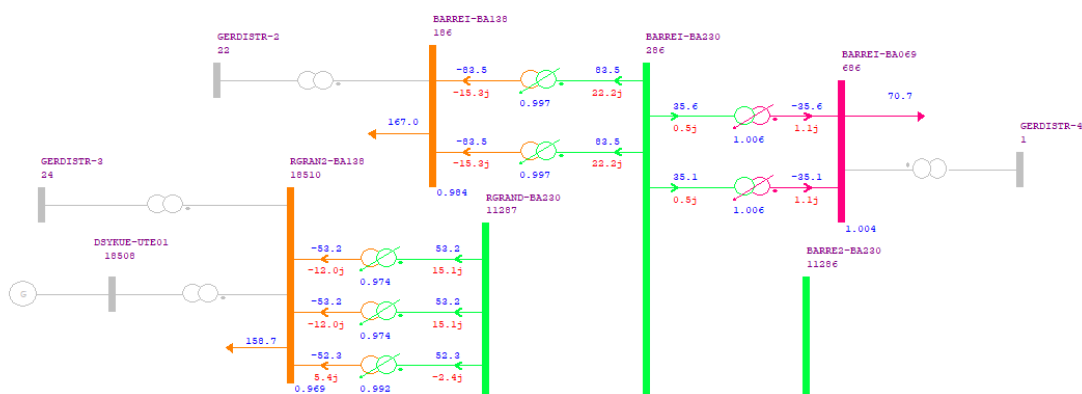
Tabela 15 – Dados do sistema com contingência

Nome	Tensão (pu)	Tensão (kV)
BARREI-BA138	0,984	138
BARREI-BA230	0,998	230
OREGUA-BA230	1,018	230
REGUA-BA500	1,035	500
BARREI-BA069	1,004	69
BARRER-BA500	1,027	500
BARRE1CAP500	1,011	500
REBAR1CAP500	1,045	500
RFORM2-BA138	1,004	138
BARRE2-BA230	1,006	230
RGRAND-BA230	0,957	230
RFORM2-BA230	1,014	230
RGRAN2-BA138	0,969	138
DIANO2-TO230	1,009	230
TABOCA-BA230	1,011	230

Fonte: Autoria Própria

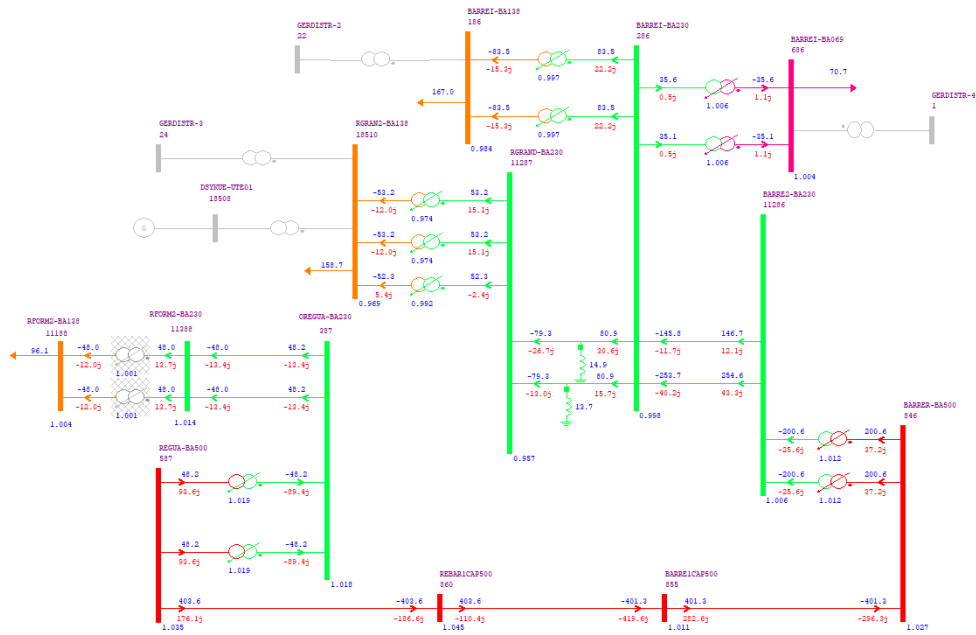
Ao examinar os resultados da operação de fluxo de potência do sistema teste durante uma contingência, foi possível identificar alterações nas tensões das barras. Notou-se que as barras localizadas nas extremidades dos pontos de geração do sistema são as que experimentam um colapso de tensão mais rápido, como observamos na Tabela 15 e como também de forma visual na Figura 15, a barra RGRAND-BA230 de carga já se encontra perto do limite de contingência, nos limites pré estabelecidos podendo ocorrer afundamento de tensão, violando os limites de qualidade de energia definido pelo Módulo 8 do PRODIST.

Figura 14 – Recorte das barras do sistema com carga pesada.



Fonte: Autoria Própria

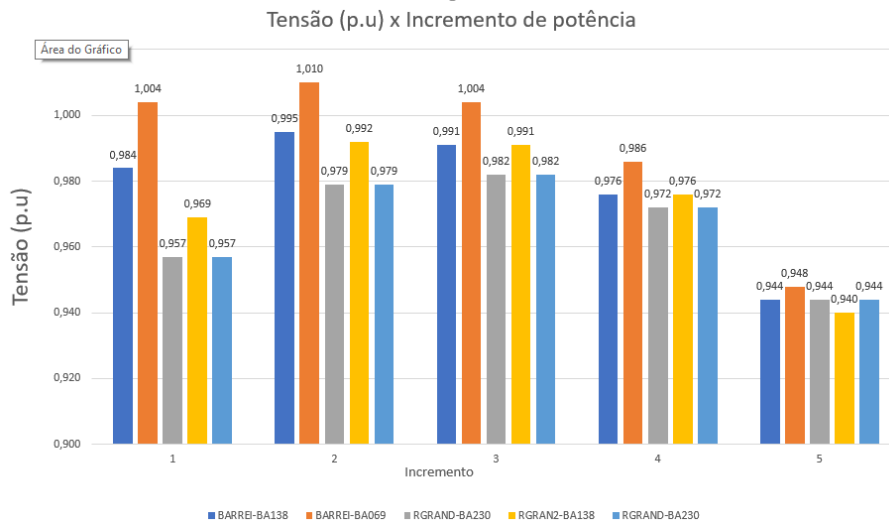
Figura 15 – Sistema com carga pesada.



Fonte: Autoria Própria

Diante do sistema funcionando em contingência com o aumento de carga como descrito anteriormente, foi realizado a simulação contendo as fontes de gerações distribuída acoplada ao sistema, diante disso foi realizado o incremento de carga diante das duas fontes de geração distribuída, foi inserido uma potência de 55 MW em 4 incrementos para cada vez foi realizado o fluxo de potência e obtivemos os dados das barras como esta disposto na tabela 13, e no gráfico presente na Figura 16, podemos observar como o sistema se comportou.

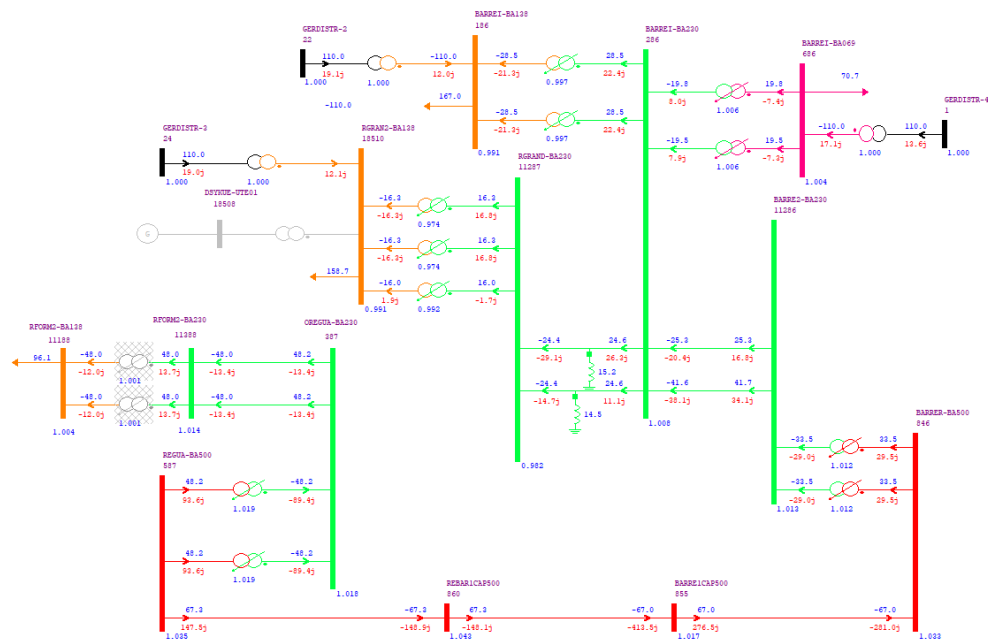
Figura 16 – Variação da tensão por incremento de potência no sistema.



Fonte: Autoria Própria

Ao analisarmos os dados obtidos na simulação do sistema utilizando a metodologia do ANAREDE de acordo com o gráfico 16 e de forma gráfica por meio do fluxo na rede Figura 17, notamos o comportamento do sistema diante de contingências, com a gradual inserção de geração distribuída. Ficou evidente que a incorporação dessas fontes de geração contribuiu para a melhoria do nível de tensão, especialmente nos primeiros incrementos de potência injetados pela geração distribuída.

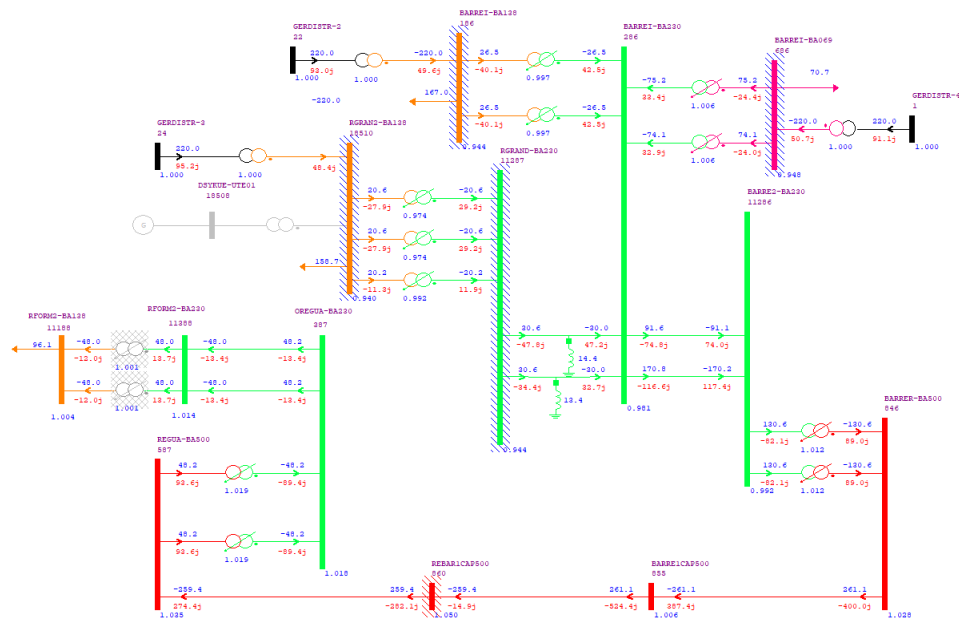
Figura 17 – Melhora nos níveis de tensão com inserção de GD.



Fonte: Autoria Própria

Podemos observar que, no último incremento de geração distribuída (GD), o sistema apresentou variações no nível de tensão, conforme ilustrado na Figura 18, devido ao aumento da injeção de potência pelo sistema conectado à rede, diante da capacidade dos barramentos suportar essa injeção. É importante destacar que o nível de tensão do sistema pode variar. Contudo, a presença da geração distribuída demonstrou ser eficaz em manter a estabilidade do sistema dentro de certas condições.

Figura 18 – Limites de tensão violados no ultimo incremento de GD.



Fonte: Autoria Própria

Até o terceiro aumento de potência nas barras do sistema, o nível de tensão permaneceu dentro dos parâmetros estabelecidos pelo Módulo 8, situando-se entre 0,95 e 1,05 pu. É importante ressaltar que, em relação à tensão do sistema, esse nível pode variar, mas a presença da geração distribuída demonstrou sua eficácia em manter a estabilidade do sistema até certas condições, quando aumentamos o nível de injeção de potência o sistema voltou a situação de contingência apresentando distúrbios, mediante afundamento de tensão na barras do sistema em análise.

Devido ao limite existente na geração reativa para mitigar variações de tensão no sistema teste conforme a Tabela 8, o sistema enfrenta desafios no controle dessas variações nos barramentos. Assim, se o aumento não planejado na injeção de potência no sistema for significativo, o sistema pode entrar em colapso, acarretando prejuízos e não cumprindo os limites de QEE estabelecidos no Módulo 8 pela PRODIST. Portanto, é crucial que o sistema seja operado de maneira cuidadosa e planejada, evitando aumentos substanciais e não previstos de injeção de potência, para garantir a estabilidade e a conformidade com os padrões de qualidade de energia.

De acordo com Glover, Sarma e Overbye (2012), a injeção de potência por GDs pode elevar a tensão nas barras próximas. Esse fenômeno ocorre porque o aumento da geração local pode superar a demanda local, resultando em um excesso de potência reativa disponível. Esse excesso pode levar a uma elevação da tensão nas barras. De outra forma segundo Kundur (2007), barramentos sobrecarregados podem afetar a estabilidade do sistema. Se a carga exceder a capacidade de um barramento, pode ocorrer um des-

balanceamento de carga que pode levar a flutuações na tensão e até mesmo a uma falha generalizada do sistema.

Essas observações sugerem a necessidade de avaliações mais aprofundadas sobre a capacidade do sistema de lidar com aumentos substanciais de potência e destaca a importância de implementar medidas para mitigar tais distúrbios.

6.3 Trabalhos Futuros

Para ampliar e aprofundar a análise realizada neste estudo, podem ser desenvolvidos outros trabalhos. Algumas sugestões de abordagens para pesquisas futuras incluem:

- Analisar os reforços de rede necessários para a integração de um sistema de distribuição.
- Revisão do sistema de proteção e controle após a incorporação da geração distribuída (GD).
- Dimensionar dispositivos que amenizem os distúrbios provocados por inserção de geração.

CONCLUSÃO

No cenário de crescente demanda por energia elétrica, destaca-se a importância das fontes renováveis, com ênfase na (GD), como elementos essenciais na composição da matriz energética. A (GD) realoca a produção de energia próxima aos centros de consumo, minimizando perdas e custos principalmente. O método de Fluxo de Potência destaca-se como ferramenta vital para avaliar o sistema elétrico, mediante a análise das variáveis que compõem o sistema, garantindo confiabilidade e eficiência. Com a integração crescente de (GD), as concessionárias enfrentam desafios operacionais e de planejamento devido ao fluxo bidirecional de potência e crescente inserção de potência pelos sistemas. Este projeto teve como finalidade analisar os distúrbios causados pela alocação de (GD) no sistema de distribuição, utilizando o programa ANAREDE. A avaliação é crucial para garantir a confiabilidade e qualidade do fornecimento de eletricidade diante do aumento previsto na conexão de (GD) no país, cumprindo os padrões de QEE definidos pela ANEEL.

Diante dos resultados obtidos por meio das simulações no ANAREDE, especialmente nos casos analisados com diferentes níveis de carregamento no sistema perante a inserção de geração distribuída, as conclusões derivadas da análise dos distúrbios nesse cenário específico foram consistentes. A presença de sistemas de geração distribuída na rede de distribuição demonstrou ter impactos tanto positivos quanto negativos, dependendo da quantidade de potência injetada e no contexto de cada tipo de rede. É crucial destacar que esses resultados foram coerentes ao respeitar os limites de capacidade do sistema em que foram inseridos.

O estudo revelou-se útil, evidenciando a importância da análise de sistemas de distribuição para a inserção de geração. Uma análise criteriosa se faz necessária, especialmente diante do aumento da demanda por instalação de (GD) no sistema elétrico

Brasileiro. O crescente carregamento do sistema pode levar à ultrapassagem dos limites de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) estabelecidos pelo PRODIST, resultando em danos a equipamentos situados na rede e possíveis penalidades para as concessionárias que não garantir a operação dentro dos limites.

Referências Bibliográficas

AHMED, H. *Computer methods in power system analysis*. 1. ed. Nova York, EUA: John Wiley & Sons Inc, 2019.

ALVES, W. F. Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) UFF, Niterói-RJ, 2010.

ANAREDE, P. d. A. d. R. Manual do Usuário . *Rio de Janeiro: DSE, 2023a. Disponível em:< ANAREDE. pdf (<cepel.br/)>*, v. 11.07, 2023.

ANDRADE, V. B. et al. Modelagem de um sistema de distribuição real desbalanceado e análise do impacto da geração distribuída utilizando o software openss. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, p. 1–11, 2020. DOI: 10.48011/sbse.v1i1.2208.

ANEEL. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. 1. ed. Brasília-DF: Revisão, 2021.

BARATA, H. A. Impacto de redes de distribuição com massiva conexão de geradores fotovoltaicos na estabilidade de tensão de longo-prazo em sistemas de potência. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) UFPA, Bélem - PA, 2017.

DEIFELT, S. V. Análise da viabilidade técnica da operação de sistemas com geração distribuída no modo ilhado intencional. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) UFSM, Santa Maria-RS, 2016.

DIOGO, V. M. et al. Análise de variações de tensão de longa duração em sistemas de distribuição: uma abordagem considerando curvas de carga e geração distribuída. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, p. 1–6, 2020. DOI: 10.48011/sbse.v1i1.2381.

EPE, E. D. P. E. Balanço Energético Nacional 2022: Ano base 2021. *Rio de Janeiro: EPE, 2022a. Disponível em:< BEN2022. pdf (epe. gov. br)>*, v. 16, 2023.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. Power system analysis. *Power System Analysis and Design*, 2012.

KAGAN, N. Estimativa de indicadores de qualidade da energia elétrica. 1. ed. São Paulo - SP: Editora Blucher, 2009.

KUNDUR, P. Power system stability. *Power system stability and control*, CRC Press New York, v. 10, p. 7–1, 2007.

LOBO, F. X. et al. Avaliação das variações de tensão provenientes do aumento da inserção fotovoltaica na rede de transmissão: Estudo de caso usina Coremas-PB. Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS, p. 1–10, 2022. DOI:.

MARTINHO, E. Distúrbios da energia elétrica. 1. ed. São Paulo - SP: Saraiva Educação SA, 2009.

MOHAN, N. Sistemas elétricos de potência–curso introdutório. 1. ed. Rio de Janeiro - RJ: Travessa do Ouvidor, 2016.

MONTICELLI, A. Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. 2^a edição. 1. ed. São Paulo - SP: Editora Edgard Blucher, 1993.

NEGREIROS, G. F. de et al. Impactos na regulação de tensão decorrentes de geradores fotovoltaicos conectados a rede elétrica de média tensão e baixa tensão. Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS, p. 1–10, 2022. DOI:.

PINTO, M. O. Energia elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados. 1. ed. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 2014.

SILVA, L. H. N. da et al. Análise do impacto da inserção de geração distribuída fotovoltaica na qualidade da energia elétrica utilizando o software opendss. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, p. 1–11, 2022. DOI: 10.20906/sbse.v2i1.3132.

VARGAS, M. C. Análise dos impactos das faltas na proteção de sobrecorrente em redes de distribuição com elevada penetração de geração distribuída fotovoltaica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) UFES, Vitória - ES, 2018.

