

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CEDRYKE DO PRADO PREVATTO

ANÁLISE DE FLUXO DE POTÊNCIA EM MICRORREDES DE ENERGIAS
ELÉTRICA UTILIZANDO MÉTODO NÃO-ITERATIVO

Curitiba

2023

CEDRYKE DO PRADO PREVATTO

ANÁLISE DE FLUXO DE POTÊNCIA EM MICRORREDES DE ENERGIAS
ELÉTRICA UTILIZANDO MÉTODO NÃO-ITERATIVO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Área de Sistemas de Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Odilon Luís Tortelli

Curitiba

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Prevatto, Cedryke do Prado

Análise de fluxo de potência em microrredes de energias elétrica utilizando método não-iterativo. / Cedryke do Prado Prevatto. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Odilon Luís Tortelli

1. Energia elétrica – Sistemas de distribuição. 2. Redes elétricas. 3. Fluxo de potência. I. Tortelli, Odilon Luís. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **CEDRYKE DO PRADO PREVATTO** intitulada: **Análise de Fluxo de Potência em Microrredes de Energias Elétrica utilizando Método Não-iterativo**, sob orientação do Prof. Dr. ODILON LUIS TORTELLI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 31 de Julho de 2023.

Assinatura Eletrônica
02/08/2023 17:52:35.0
ODILON LUIS TORTELLI
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
02/08/2023 10:09:03.0
NASTASHA SALAME DA SILVA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
02/08/2023 10:21:48.0
JULIANA ALMANSA MALAGOLI
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
01/08/2023 20:06:31.0
CLODOMIRO UNSIHUAY-VILA
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Expresso minha gratidão ao Professor Doutor Odilon Luis Tortelli, meu orientador, pela sua recepção amigável desde o nosso primeiro encontro. Valorizo a oportunidade que me proporcionou de contribuir para este projeto. Agradeço sinceramente por sua paciência e compreensão durante os momentos desafiadores e complexos.

À minha noiva Rafaela, reconheço o apoio incondicional que me deu a este projeto, mesmo antes de eu concebê-lo. Agradeço também pelo suporte emocional que me ofereceu nos momentos de necessidade. Tudo teve início graças a você, e cada realização positiva é dedicada a você.

Aos meus amigos e família, que iluminaram esta jornada com sua companhia. O valor disso para mim é imensurável, e posso afirmar que sem vocês, talvez não teria conseguido enfrentar este projeto de forma equilibrada e saudável.

Aos educadores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, minha gratidão pelo compartilhamento de conhecimento, pelas ideias, pelas críticas construtivas e pelas sugestões. Agradeço por contribuírem para a minha formação acadêmica.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“A felicidade só é verdadeira quando compartilhada. ”

Henry David Thorea

RESUMO

Nesta dissertação apresenta-se uma abordagem metodológica para o cálculo do fluxo de potência em microrredes de energia elétrica em corrente contínua. Esta metodologia considera duas técnicas distintas: uma baseada no método de Newton-Raphson e outra em um inovador método não-iterativo. O método não-iterativo representa uma alternativa para a determinação das tensões nodais em sistemas de corrente contínua. Este método não iterativo se baseia na simplificação de Taylor e na extração de raízes de equações quadráticas. Ambas as abordagens são validadas por meio de simulações e testes com microrredes de diferentes dimensões e configurações operativas, exibindo resultados promissores e uma discrepância mínima entre as duas abordagens. A partir de um estudo abrangente sobre microrredes em corrente contínua, a presente dissertação também prospecta futuros desenvolvimentos em microrredes de energia elétrica em corrente contínua. Com sua metodologia inovadora, esta pesquisa abre portas para investigações e aplicações futuras voltadas a estudos de apoio a operação e planejamento de microrredes em corrente contínua, incluindo análise da estabilidade de tensão e a avaliação da confiabilidade do sistema.

Palavras-chave: Sistemas de distribuição em corrente contínua, microrredes de energia elétrica, fluxo de potência, método não-iterativo.

ABSTRACT

This dissertation presents a methodological approach for the calculation of power flow in direct current electrical microgrids. This methodology considers two distinct techniques: one based on the Newton-Raphson method and another on an innovative non-iterative method. The non-iterative method represents an alternative for determining nodal voltages in direct current systems. This non-iterative method is based on Taylor series simplification and the extraction of roots from quadratic equations. Both approaches are validated through simulations and tests with microgrids of different sizes and operational configurations, displaying promising results and minimal discrepancy between the two approaches. In addition to a comprehensive study on direct current microgrids, this dissertation also outlines future developments in direct current electrical microgrids. With its innovative methodology, this research opens doors for future investigations and applications aimed at supporting the operation and planning of direct current microgrids, including voltage stability analysis and system reliability assessment.

Keywords: Direct current distribution systems, electrical microgrids, power flow, non-iterative method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Transição de MR AC para MR CC.....	15
FIGURA 2 - Matriz energética ONS	20
FIGURA 3 - Microrrede em corrente contínua.....	24
FIGURA 4 - Configuração barramento único.....	25
FIGURA 5 - Configuração radial.....	26
FIGURA 6 - Configuração radial em paralelo.....	27
FIGURA 7 - Configuração anel.....	28
FIGURA 8 - Configuração malha.....	29
FIGURA 9 - Balanço de Corrente na Barra k	32
FIGURA 10 - Sistema para dedução do algoritmo	40
FIGURA 11 - Sistema teste de 5 barras.....	49
FIGURA 12 - Dados de barra Caso 1.....	50
FIGURA 13 - Dados de linha Caso 1	51
FIGURA 14 - Dados de barra Caso 2.....	52
FIGURA 15 - Microrrede de corrente contínua 33 barras - Radial	57
FIGURA 16 - Tensões de barra (Geração distribuída 70%) Cenário 1	58
FIGURA 17 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 1	58
FIGURA 18 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 1 ...	59
FIGURA 19 - Tensões de barra (Geração distribuída 20%) Cenário 2	60
FIGURA 20 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 2	60
FIGURA 21 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 2 ...	61
FIGURA 22 - Tensões de barra (Geração distribuída 100%) Cenário 3	62
FIGURA 23 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 3	62
FIGURA 24 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 3 ...	63
FIGURA 25 - Microrrede de corrente contínua 33 barras - Anel	63
FIGURA 26 - Tensões de barra (Geração distribuída 70%) Cenário 1	64
FIGURA 27 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 1	65
FIGURA 28 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 1 ...	65
FIGURA 29 - Tensões de barra (Geração distribuída 20%) Cenário 2	66
FIGURA 30 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 2	66
FIGURA 31 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 2 ...	67
FIGURA 32 - Tensões de barra (Geração distribuída 100%) Cenário 3	67
FIGURA 33 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 3	68
FIGURA 34 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 3 ...	68
FIGURA 35 - Microrrede de corrente contínua 33 barras - Malha.....	69
FIGURA 36 - Tensões de barra (Geração distribuída 70%) Cenário 1	69
FIGURA 37 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 1	70
FIGURA 38 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 1 ...	70
FIGURA 39 - Tensões de barra (Geração distribuída 20%) Cenário 2	71
FIGURA 40 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 2	71
FIGURA 41 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 2 ...	72
FIGURA 42 - Tensões de barra (Geração distribuída 100%) Cenário 3	72
FIGURA 43 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 3	73
FIGURA 44 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 3 ...	73

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Comparação entre as microrredes de corrente contínua e corrente alternada	19
QUADRO 2 - Comparação entre topologias	30
QUADRO 3 - Dados de barra do sistema teste 5 barras	49
QUADRO 4 - Dados de linha do sistema teste 5 barras	49
QUADRO 5 - Resultado de tensão do caso 1	50
QUADRO 6 - Resultado dos fluxos de potência do caso 1	50
QUADRO 7 - Resultados comparativos de tensão Caso 1	51
QUADRO 8 - Resultados comparativos de fluxo de potência	52
QUADRO 9 - Resultados comparativos de tensão Caso 2	53
QUADRO 10 - Resultados comparativos de fluxo de potência Caso 2	53
QUADRO 11 - NR x MNI Tensão nas Barras Caso 1	54
QUADRO 12 - MNI x NR Diferença e erro percentual de tensão Caso 1	55
QUADRO 13 - NR x MNI Tensão nas Barras Caso 2	55
QUADRO 14 - MNI x NR Diferença e erro percentual de tensão Caso 2	56
QUADRO 15 - Valores de geração em 70%	57
QUADRO 16 - Valores de geração em 20%	59
QUADRO 17 - Valores de geração em 100%	61
QUADRO 18 - Resultados: Simulação 1 – Radial	74
QUADRO 19 - Resultados: Simulação 2 – Anel	74
QUADRO 20 - Resultados: Simulação 3 – Malha	75

LISTA DE SIGLAS

BT	Baixa tensão
BTCC	Baixa tensão em corrente contínua
CA	Corrente alternada
CAAT	Corrente alternada em alta tensão
CC	Corrente contínua
CCAT	Corrente contínua em alta tensão
FER	Fontes de energia renovável
FV	Fotovoltaico
GE	Geradores eólicos
MR	Microrrede
MT	Média tensão
MTCC	Média tensão em corrente contínua
SAEB	Sistema de armazenamento de energia por bateria
SF	Sistemas fotovoltaicos
VE	Veículos elétricos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.1.1	História do uso da corrente contínua	12
1.1.2	Sistemas CCAT v.s. CAAT	13
1.1.3	Microrredes de energia elétrica em corrente contínua	14
1.1.4	Vantagens e desvantagens das microrredes em corrente continua	16
1.2	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	19
1.3	OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	21
1.3.1	OBJETIVO GERAL	21
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2	FUNDAMENTAÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	MICRORREDES	23
2.1.1	Modelo de Microrrede CC	23
2.2	TOPOLOGIAS DAS MRS EM CORRENTE CONTÍNUA	24
2.2.1	Barramento único	24
2.2.2	Radial	25
2.2.3	Anel	28
2.2.4	Malha	29
2.3	COMPARAÇÃO ENTRE AS TOPOLOGIAS	30
2.4	FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE CORRENTE CONTÍNUA	30
2.5	PROBLEMA DO FLUXO DE POTÊNCIA EM CORRENTE CONTÍNUA	31
2.5.1	Formulação do problema de fluxo de potência em redes cc	32
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 2	36
3	METODOLOGIA	37
3.1	SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FLUXO DE POTENCIA PELO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA SISTEMAS EM CORRENTE CONTÍNUA	37
3.2	MÉTODO NÃO-ITERATIVO	39
3.2.1	Formulação do método não-iterativo	40
3.3	ALGORITMO DE CÁLCULO DE FLUXO DE POTÊNCIA EM CORRENTE CONTÍNUA	42
3.3.1	Dados de entrada	42
3.3.2	Dados de saída	44

3.3.3	Resultados do algoritmo de newton-raphson.....	44
3.3.4	Resultados do algoritmo do método não-iterativo.....	44
3.4	ETAPA DE PROCESSAMENTO	45
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 3	46
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	48
4.1	VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA	48
4.1.1	CASO 1: SISTEMA COM 5 BARRAS – METÓDO NEWTON-RAPHSON..	48
4.1.2	CASO 2: SISTEMA COM 5 BARRAS – METÓDO NEWTON-RAPHSON..	52
4.2	ALGORITMO DE NEWTON-RAPHSON X MÉTODO NÃO-ITERATIVO.....	53
4.2.1	CASO 1: COMPARAÇÃO NEWTON-RAPHSON X MÉTODO NÃO-ITERATIVO	54
4.2.2	CASO 2: COMPARAÇÃO NEWTON-RAPHSON X MÉTODO NÃO-ITERATIVO	55
4.3	SIMULAÇÃO 1: SISTEMA 33 BARRAS RADIAL – MICRORREDE EM CORRENTE CONTÍNUA.....	56
4.3.1	CENÁRIO 1: Geração distribuída à 70%	57
4.3.2	CENÁRIO 2: Geração distribuída à 20%	59
4.3.3	CENÁRIO 3: Geração distribuída a 100% e Carga 70% acima	61
4.4	SIMULAÇÃO 2: SISTEMA 33 BARRAS ANEL – MICRORREDE EM CORRENTE CONTÍNUA.....	63
4.4.1	CENÁRIO 1: Geração distribuída à 70%	64
4.4.2	CENÁRIO 2: Geração Distribuída à 20%.....	65
4.4.3	CENÁRIO 3: Geração distribuída a 100% e Carga 70% acima	67
4.5	SIMULAÇÃO 3: SISTEMA 33 BARRAS MALHA – MICRORREDE EM CORRENTE CONTÍNUA.....	68
4.5.1	CENÁRIO 1: Geração distribuída à 70%	69
4.5.2	CENÁRIO 2: Geração Distribuída em 20%.....	70
4.5.3	CENÁRIO 3: Geração distribuída a 100% e Carga 70% acima	72
4.6	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	73
4.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS QUANTO AOS RESULTADOS	75
5	CONCLUSÃO	76
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	77
	REFERÊNCIAS.....	78

APÊNDICE 1 – MICRORREDE CC 33 BARRAS – RADIAL – DADOS DE BARRA

80

APÊNDICE 2 – MICRORREDE CC 33 BARRAS – RADIAL – DADOS DE LINHA.81

APÊNDICE 3 – MICRORREDE CC 33 BARRAS – ANEL – DADOS DE BARRA...82

APÊNDICE 4 – MICRORREDE CC 33 BARRAS – ANEL – DADOS DE LINHA.....83

APÊNDICE 5 – MICRORREDE CC 33 BARRAS – MALHA – DADOS DE BARRA84

APÊNDICE 6 – MICRORREDE CC 33 BARRAS – MALHA – DADOS DE LINHA .85

1 INTRODUÇÃO

Nesta primeira seção, são abordados os elementos iniciais do trabalho. Assim, apresenta-se uma breve contextualização sobre redes e microrredes de distribuição em corrente contínua. Também se apresenta a justificativa da pesquisa e os objetivos da dissertação. Por fim, é feita uma breve descrição da organização do trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

1.1.1 História do uso da corrente contínua

A história da transmissão em Corrente Contínua (CC) teve início em 1897, quando Thomas Edison conseguiu implementar o fornecimento e consumo de eletricidade em baixa tensão CC. Naquela época, os padrões tecnológicos para a indústria de energia elétrica estavam em desenvolvimento e havia uma competição acirrada entre a transmissão em corrente contínua e a transmissão em Corrente Alternada (CA) por meio de transformadores, desenvolvida por George Westinghouse (KIM, Chan-Ki et al., 2009).

Inicialmente, a transmissão em corrente alternada era preferida devido a sua superioridade em geração, confiabilidade, transformação e tensão de transmissão, tornando-se a principal tecnologia da indústria elétrica. No entanto, a transmissão em corrente contínua ganhou reconhecimento com o desenvolvimento da válvula de arco de mercúrio na década de 1930. A transmissão de energia em Corrente Contínua de Alta Tensão (CCAT) começou a ser utilizada comercialmente em Gotland, Suécia, em 1954, através de uma conexão submarina por cabo (KIM, Chan-Ki et al., 2009).

As características únicas da transmissão CCAT tornaram a tecnologia viável para aplicações especiais. O surgimento da válvula tiristor nos anos 1970 impulsionou ainda mais as aplicações da CCAT, melhorando sua confiabilidade e reduzindo os custos de implementação. O desenvolvimento de chaves comutadas forçadas de alta potência na década de 1990 ampliou ainda mais as aplicações da CCAT. Atualmente, a tecnologia CCAT está bem estabelecida e trabalha em conjunto com a transmissão CA baseada em FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission*), oferecendo modos complexos e versáteis de transmissão de energia elétrica (KIM, Chan-Ki et al., 2009).

1.1.2 Sistemas CCAT v.s. CAAT

Sistemas em Corrente Alternada de Alta Tensão (CAAT) são amplamente utilizadas para a transmissão de energia em distâncias curtas a médias. No entanto, seu uso pode se tornar inviável em longas distâncias devido a vários desafios, como a alta corrente de carga capacitiva dos cabos, altas perdas de energia, a falta de operação assíncrona, dificuldades no controle do fluxo de energia e a necessidade de compensação de potência reativa (MUNIAPPAN, M. A, 2021).

Já a transmissão CCAT exige menos cabos ou condutores, permitindo uma melhor utilização da capacidade total de transmissão das linhas até seus limites térmicos. Isso resulta em uma redução na área transversal necessária para os cabos de corrente contínua e, por consequência, uma diminuição no custo da transmissão (ALASSIA, A. et al., 2019). Como resultado dessas limitações da transmissão CAAT, o uso de sistemas CCAT tem se tornado cada vez mais comum. A transmissão CCAT tornou-se uma opção mais econômica para a transferência de grandes quantidades de energia em longas distâncias (MUNIAPPAN, M. A, 2021).

A proteção de uma linha de transmissão de CCAT é difícil em comparação com a proteção de uma linha de transmissão CAAT, devido à sua baixa impedância e ausência de cruzamento zero da corrente contínua. Dispositivos eletrônicos de potência têm capacidade limitada de sobrecarga, e relés convencionais não são adequados para a proteção de linhas CCAT. A proteção de uma linha de transmissão CCAT baseada em conversor de fonte de corrente é menos rigorosa do que uma linha CCAT baseada em conversor de fonte de tensão. No caso de uma linha CCAT baseada em conversor de fonte de tensão, é essencial ter uma proteção de alta velocidade devido ao seu tempo de subida rápido e alta corrente de falta em regime permanente. Além disso, é muito difícil identificar a linha com falha em redes multiterminais (MUNIAPPAN, M. A, 2021).

1.1.3 Microrredes de energia elétrica em corrente contínua

As microrredes em CC têm se tornado um campo de pesquisa de grande destaque nos últimos anos, desafiando a tradicional dominância das microrredes em CA em aplicações de Baixa Tensão (BT) e Média Tensão (MT). Essa mudança tem sido impulsionada principalmente pela crescente integração de Fontes de Energia Renovável (FER) e Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (SAEB), que fornecem predominantemente energia CC para atender à demanda elétrica, e pelo aumento do uso de dispositivos eletrônicos e cargas alimentadas por corrente contínua pelos consumidores finais (FOTOPOULOU, M. et al., 2021).

Nas Microrredes Elétricas (MR), assim como em todos os setores da tecnologia moderna e suas aplicações, a prioridade é a busca pela sustentabilidade, com foco na redução da pegada de energia. De fato, de acordo com as metas estabelecidas pela União Europeia (UE) para o ano de 2020, espera-se uma redução de pelo menos 55% nas emissões de gases de efeito estufa até 2030 (EUROPEAN COMMISSION, 2020).

Para que tais objetivos sejam alcançados, é necessária a redução na produção de energia baseada em combustíveis fósseis. Como alternativa, as Fontes de Energia Renovável têm se mostrado uma solução de importância vital, com impacto ambiental mínimo. Sistemas Fotovoltaicos (SF), Geradores Eólicos (GE), instalações de biomassa e geotérmica têm sido introduzidos no mercado ao longo das últimas décadas, melhorando a matriz energética que supre a demanda por eletricidade (ENERGIEWENDE, A., 2019).

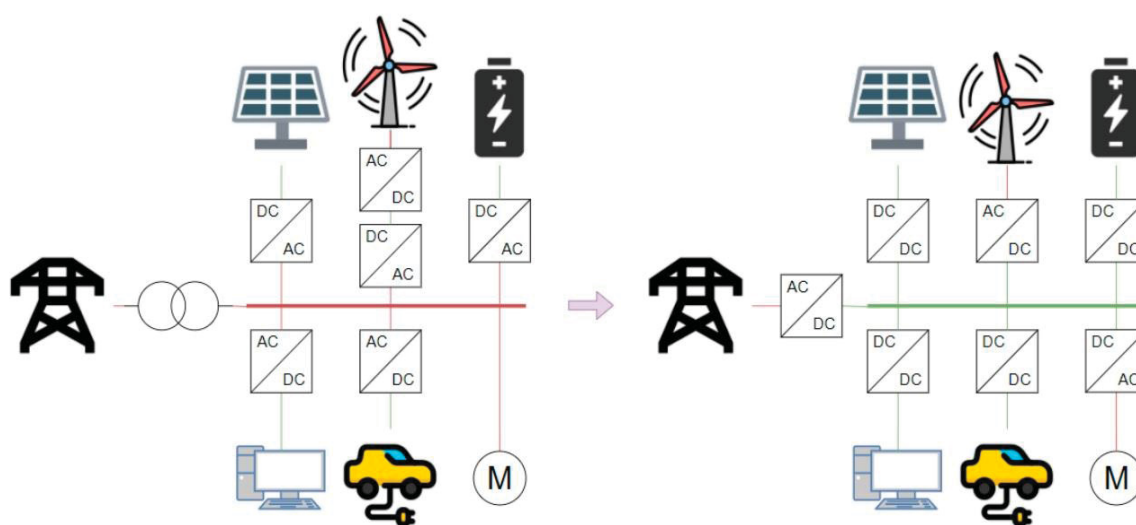
No entanto, uma das principais desvantagens de muitas FER é a sua produção intermitente devido às fontes que utilizam. A fim de assegurar que a produção atenda à curva de demanda, o emprego de Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) é considerado uma solução eficaz (AL SHAQSI; SOPIAN; AL-HINAI, 2020).

A tecnologia mais comum e amplamente utilizada em Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) são os Sistemas de Armazenamento de Energia por Bateria (SAEB), que oferecem vantagens como alta controlabilidade, resposta rápida e independência geográfica (YANG et al., 2018).

Entretanto, a crescente integração de FER e SAE na matriz energética atual não apenas resulta no aumento do fornecimento de energia mais limpa, mas também na proliferação crescente de sistemas de corrente contínua, ou seja, unidades de geração e armazenamento de energia em CC. De fato, algumas das FER e SAE mais amplamente utilizadas, como sistemas Fotovoltaicos (FV) e sistemas de armazenamento de energia por bateria, geram originalmente energia em CC (seja como fontes de corrente ou tensão), que é então convertida em energia em CA por meio de conversores eletrônicos de potência CC/CA para ser inserida na rede de distribuição em CA. Além disso, o mesmo fenômeno é observado no lado da demanda de energia. Mais especificamente, cargas em CC, como Veículos Elétricos (VE), sistemas de iluminação por diodo emissor de luz (LED), motores em CC, *data centers* e outros dispositivos com bateria, têm adentrado o mercado seguindo uma curva ascendente (FOTOPOULOU, M. et al., 2021).

Como pode-se observar na FIGURA 1, esses dispositivos também incorporam conversores especiais que convertem energia de corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC) para operar. Deste modo, é importante ter em mente que a maioria dos equipamentos eletrônicos e dispositivos funciona com energia em CC. Considerando esses fatos, fica evidente que a distribuição convencional de energia em corrente alternada (CA) precisa se adaptar às novas evoluções, enquanto a distribuição inovadora de energia em corrente contínua (CC) desafia sua posição predominante.

FIGURA 1 - Transição de MR AC para MR CC



Fonte: Fotopoulou, M. et al. (2021).

Contudo, os desafios modernos para a integração eficiente das FER nos níveis de baixa e média tensão têm colocado a energia em corrente contínua (CC) em destaque. As Microrredes (MRs) de Baixa Tensão em Corrente Contínua (BTCC) e de Média Tensão em Corrente Contínua (MTCC) constituem um campo de pesquisa e desenvolvimento atual, encontrando aplicações em diversas áreas. No entanto, ainda existem obstáculos que as MRs de CC precisam superar para serem amplamente adotadas, sendo o mais significativo a ausência de um quadro de padrões adequado (ELSAYED; MOHAMED; MOHAMMED, 2015).

1.1.4 Vantagens e desvantagens das microrredes em corrente contínua

As vantagens das infraestruturas das microrredes em corrente contínua, quando comparadas às suas contrapartes em corrente alternada, são as seguintes:

- **Integração mais fácil de FER e SAE e redução no consumo de energia primária:** Uma vantagem das infraestruturas de MR em corrente contínua, em comparação com as CA, é a facilidade de integração de FER e SAE, bem como a redução no consumo de energia primária. Uma grande proporção de FER e SAE produz energia em corrente contínua, que pode ser mais eficientemente utilizada em uma MG em corrente contínua do que em uma MR em corrente alternada. Exemplos disso incluem sistemas fotovoltaicos, sistemas de armazenamento de energia por bateria e sistemas de células a combustível. Em uma MR em corrente contínua, não é necessário converter essa energia de CC para CA. Em vez disso, são utilizados conversores CC/CC, que são mais eficientes e compactos, resultando na redução do consumo de energia primária (PLOUMPIDOU, E., 2017).
- **Integração mais eficiente de cargas em corrente contínua (CC):** Distribuir energia em corrente contínua diretamente para cargas em CC (por exemplo, de dispositivos eletrônicos populares para veículos elétricos) em vez de convertê-la CA para CC pode resultar em economia de energia e redução de custos para o consumidor. Ao evitar a conversão CA/CC, as perdas são reduzidas, o que se reflete em custos de energia mais baixos. Essa abordagem pode levar a economias substanciais, especialmente quando se trata de cargas

em CC, como veículos elétricos, iluminação de LED, *data centers* e equipamentos eletrônicos (PLOUMPIDOU, E., 2017).

- **Melhoria fácil da qualidade de energia e controle da MR:** Nas MRs de corrente contínua, não há ocorrência de oscilações harmônicas ou desequilíbrios de fase, que são comuns nas MRs de corrente alternada e comprometem a qualidade de energia. Em vez disso, os sistemas de CC fornecem uma "barreira de proteção" que impede a propagação de distúrbios de uma rede para outra, aprimorando a robustez das MRs (RTE, 2020). Além disso, como as MRs de CC operam apenas com potência ativa, não há necessidade de controle de potência reativa, em contraste com as MRs de CA (ULLAH, S. et al., 2020).
- **Não é necessária sincronização:** Em sistemas de corrente contínua, não há a necessidade de sincronizar as FER conectadas à rede com a rede principal de corrente alternada. Isso pode reduzir a complexidade operacional do sistema (KUMAR, ZARE E GHOSH, 2017). Por outro lado, nas MRs de corrente alternada, é preciso regular a frequência para mantê-la constantemente igual a 50 ou 60 Hz, o que pode causar problemas de estabilidade.
- **Sem efeito pelicular:** Em sistemas de corrente contínua, não ocorre o efeito pelicular. Isso permite que a corrente flua por todo o cabo de distribuição, não apenas nas bordas externas. Como resultado, a distribuição em CC reduz as perdas e possibilita o uso de cabos menores para a mesma corrente (KUMAR, ZARE E GHOSH, 2017).

Entretanto, as tecnologias de corrente contínua não recebem a mesma quantidade de pesquisa que suas contrapartes de corrente alternada. Isso se deve ao fato de que todo o conceito de produção, transmissão e distribuição de energia elétrica foi construído com base na tecnologia de corrente alternada, que proporcionou os meios para avançar e desenvolver equipamentos mais eficientes, confiáveis e econômicos. Como resultado, a implementação de soluções em corrente contínua apresenta certas limitações, tais como:

- **Ausência de padrões específicos:** Para que um sistema como a MR de corrente contínua seja amplamente adotado, é necessário estabelecer parâmetros específicos, como os níveis de tensão. Devido ao fato de as

aplicações de CC não serem tão comuns quanto as aplicações de corrente alternada, há uma carência geral de valores padronizados em relação ao seu funcionamento. Essa questão precisa ser abordada para que as MRs de CC possam entrar no mercado mundial de forma mais abrangente (CHANDRA, SINGH E PANT, 2020).

- **Problemas de proteção:** No caso da energia em corrente contínua, surgem questões de proteção que não estão apenas relacionadas à falta de padrões, mas também à natureza específica da corrente contínua. Em particular, interromper um circuito CC em funcionamento é considerado mais desafiador em comparação com sua contraparte em corrente alternada, uma vez que não há o cruzamento natural do zero da corrente para minimizar o efeito de arco elétrico. São realizados grandes esforços de pesquisa para desenvolver dispositivos de proteção capazes de interromper com segurança tensões CC da ordem de quilovolts, a baixo custo, a fim de viabilizar o desenvolvimento de infraestruturas de rede (RTE, 2020; ULLAH, S. et al., 2020).
- **Falta de especialização:** As redes existentes são, em sua maioria, baseadas em corrente alternada. A tecnologia CA é comprovada e consolidada, enquanto a tecnologia CC ainda está em processo de estabelecimento. Isso significa que há poucos especialistas, desenvolvedores de redes e operadores de sistemas que possuem um amplo conhecimento sobre as MRs de corrente contínua (FOTOPOULOU, M. et al., 2021).
- **Custo de construção:** O custo global envolvido na construção de MRs de corrente alternada é menor em comparação com o custo correspondente para as MRs de corrente contínua. Isso ocorre porque o desenvolvimento de tecnologias de CC, como conversores de energia especializados, terminais, etc., é mais recente, e a inovação está integrada ao custo geral (FOTOPOULOU, M. et al., 2021).

O QUADRO 1 apresenta uma breve comparação entre as MRs de corrente contínua e corrente alternada. No geral, a implementação das MRs de CC desempenha um papel fundamental na promoção da sustentabilidade, eficiência e mitigação das mudanças climáticas causadas pela atividade humana. No entanto, para sua incorporação adequada à rede de CA tradicional e sua penetração no mercado global, são necessárias pesquisas adicionais para o desenvolvimento

adequado do projeto, interfaces, topologias e controle (FOTOPOULOU, M. et al., 2021).

QUADRO 1 -Comparação entre as microrredes de corrente contínua e corrente alternada

	MR de CC	MR de CA
Integração de FER e SAE	Eficaz	Não eficaz
Redução no consumo de energia primária	Sim	Não
Integração de cargas de CC	Eficaz	Não eficaz
Qualidade de energia e controle da MR	Fácil	Complicado
Sincronização	Não requerida	Requerida
Regulação de frequência	Sem frequência	Constante, igual a 50 ou 60 Hz
Efeito pelicular	Não	Sim
Padrões	Insuficientes	Suficientes
Proteção	Subdesenvolvida, custosa	Totalmente desenvolvida, não custosa
Especialização	Baixa	Alta
Custo de construção	Alto	Baixo

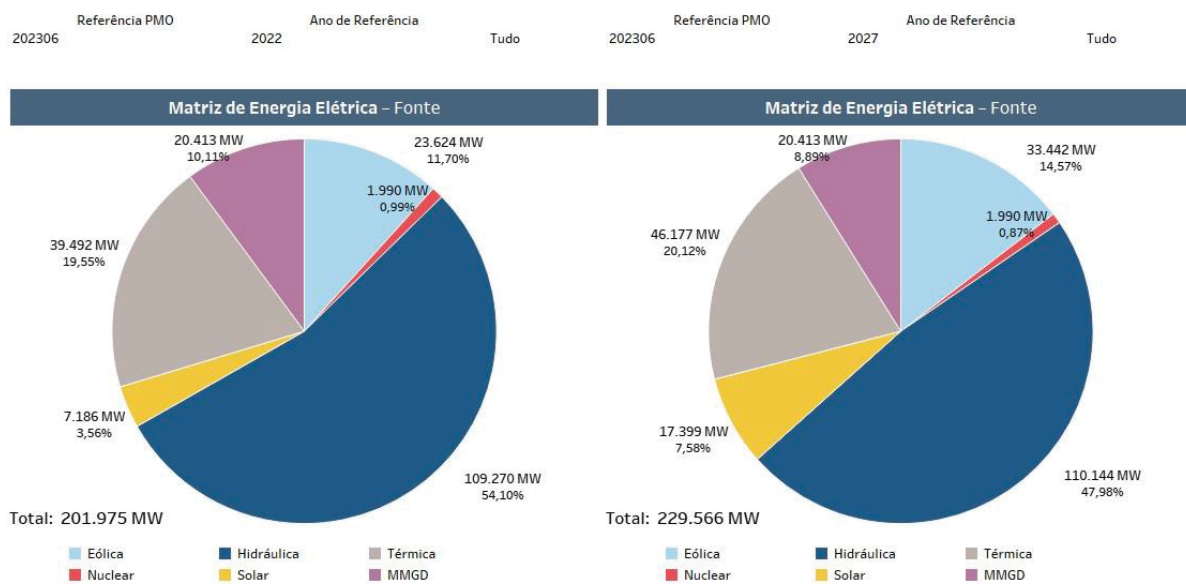
Fonte: Ploumpidou, E. (2017); Ullah, S. et al. (2020).

1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

As microrredes em corrente contínua estão despertando um interesse crescente devido às suas vantagens específicas e à crescente integração de fontes de energia renovável e sistemas de armazenamento de energia em corrente contínua. Com avanços contínuos em pesquisas, desenvolvimento tecnológico e estabelecimento de padrões adequados, é possível superar os desafios existentes e promover uma adoção mais ampla das microrredes em corrente contínua.

A FIGURA 2, apresenta uma estimativa dos dados da capacidade instalada no Sistema Interligado Nacional nos anos de 2022 e 2027.

FIGURA 2 - Matriz energética ONS



Fonte: ONS (2023).

Como visto na FIGURA 2, as fontes de energias renováveis (Eólica, MMGD, Solar) em 2022 eram responsáveis por aproximadamente 25% de toda geração de energia, que correspondia há aproximadamente 53.000 MW. Para o ano de 2027 a projeção é que as fontes de energias renováveis sejam responsáveis por aproximadamente 31% de toda geração de energia do Brasil, que corresponderá há aproximadamente 73.000 MW.

A crescente integração de fontes de energia renovável e sistemas de armazenamento de energia em corrente contínua tem impulsionado a necessidade de desenvolver ferramentas de cálculo avançadas para microrredes em corrente contínua. Com a diversidade e intermitência das fontes renováveis, bem como as flutuações na demanda de energia, é essencial projetar e dimensionar microrredes de forma eficiente, garantindo a estabilidade do sistema e otimizando o uso das fontes disponíveis.

Além disso, a padronização adequada dessas ferramentas de cálculo é fundamental para promover a adoção generalizada das microrredes em corrente contínua, permitindo uma transição energética mais sustentável e confiável. Através de pesquisas contínuas e desenvolvimentos tecnológicos, essas ferramentas de cálculo podem auxiliar na análise de fluxo de potência, gerenciamento de energia, seleção de dispositivos de conversão, otimização de controle e tomada de decisões

estratégicas, impulsionando ainda mais o avanço e a eficiência das microrredes em corrente contínua no futuro.

1.3 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Nesta seção, encontra-se os objetivos desta dissertação.

1.3.1 OBJETIVO GERAL

O propósito central desta dissertação é conduzir uma investigação sobre o cálculo do fluxo de potência em microrredes de energia elétrica em corrente contínua, utilizando um método não-iterativo em contraste com a abordagem do método de Newton-Raphson.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar uma revisão bibliográfica para obter o estado da arte dos sistemas elétricos de potência em corrente contínua, com foco em microrredes;
- b) Desenvolver um algoritmo utilizando a plataforma Octave, capaz de calcular o fluxo de potência utilizando o método de Newton-Raphson e um método não-iterativo;
- c) Aplicar os algoritmos desenvolvidos em sistemas teste que simulam microrredes;
- d) Comparar os resultados e possíveis erros entre os algoritmos desenvolvidos.

Esses objetivos visam contribuir para o avanço do conhecimento sobre microrredes em corrente contínua, fornecendo uma compreensão aprofundada do estado atual da área, desenvolvendo ferramentas computacionais práticas e identificando soluções para desafios específicos enfrentados por esses sistemas.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

INTRODUÇÃO: Este capítulo inicia o trabalho com uma contextualização sobre o uso da corrente contínua ao longo da história, destacando os sistemas de Corrente Contínua de Alta Tensão em comparação com os sistemas de Corrente Alternada de Alta Tensão. Também são abordadas as microrredes em corrente contínua, analisando

suas vantagens e desvantagens. A justificativa da pesquisa é apresentada, seguida pelos objetivos gerais e específicos do trabalho. Por fim, é descrita a estrutura geral do trabalho.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: Neste capítulo, é feita uma a revisão das microrredes em corrente contínua, abordando diferentes configurações, como barramento único, radial, anel e malha. Também é feita uma comparação entre essas topologias, avaliando suas características e aplicabilidades. Além disso, são discutidos o fluxo de potência em sistemas de corrente contínua e o problema associado a esse fluxo.

METODOLOGIA: A metodologia utilizada neste trabalho é apresentada neste capítulo. São detalhados os procedimentos para a resolução do problema de fluxo de potência por meio do método de Newton-Raphson para sistemas em corrente contínua. Um método não-iterativo também é formulado e descrito. Em seguida, é apresentado o algoritmo de cálculo do fluxo de potência em corrente contínua, incluindo os dados de entrada, os resultados obtidos pelo algoritmo de Newton-Raphson e os resultados do método não-iterativo. Por fim, é explicada a etapa de processamento dos resultados.

SIMULAÇÕES E RESULTADOS: Neste capítulo, são realizadas simulações para validar a metodologia proposta. São apresentados dois casos de sistemas com 5 barras, comparando os resultados obtidos pelo algoritmo de Newton-Raphson com os do método não-iterativo. Além disso, são realizadas simulações em microrredes em corrente contínua com 33 barras, considerando diferentes cenários de geração distribuída e carga. Os resultados dessas simulações são analisados e discutidos.

CONCLUSÃO: As conclusões do trabalho são apresentadas neste capítulo. São feitas considerações sobre os resultados obtidos, destacando as contribuições da pesquisa. Também são sugeridos possíveis trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS: Nesta seção, são listadas todas as obras consultadas durante a elaboração da dissertação, seguindo as normas de referência bibliográfica adotadas pela instituição acadêmica.

2 FUNDAMENTAÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste segundo capítulo desta dissertação, é apresentada uma revisão sobre microrredes e microrredes em corrente contínua, onde exploram-se as diferentes topologias de microrredes em corrente contínua, bem como a formulação do problema de fluxo de potência para essas redes.

2.1 MICRORREDES

Microrrede é um sistema energético localizado que integra diversas fontes de geração de energia, armazenamento e cargas em uma única entidade operacional. Essas microrredes podem operar de forma independente ou em conjunto com a rede elétrica principal, permitindo uma maior flexibilidade e resiliência no fornecimento de energia (SOUZA JR et al., 2019).

Uma microrrede pode ser composta por fontes de energia renovável, como painéis solares e turbinas eólicas, bem como por fontes convencionais de energia, como geradores a diesel. Além disso, ela pode incluir sistemas de armazenamento de energia, como baterias, para armazenar o excesso de energia gerada para uso posterior. As microrredes também são capazes de fornecer energia a cargas críticas durante falhas na rede elétrica principal, garantindo maior confiabilidade e continuidade do fornecimento (SOUZA JR. et al., 2019).

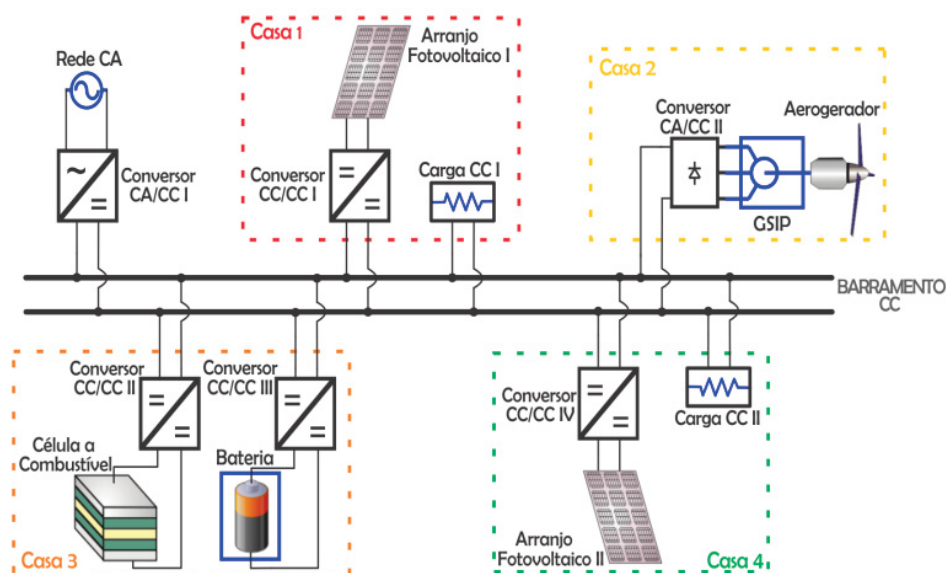
Esses sistemas são frequentemente utilizados em áreas remotas, comunidades isoladas, instalações industriais e comerciais, e até mesmo em áreas urbanas, como parte de iniciativas para melhorar a eficiência energética, reduzir emissões de carbono e aumentar a resiliência do sistema de energia como um todo (SOUZA JR et al., 2019).

2.1.1 Modelo de Microrrede CC

Com base na situação atual do setor energético e nas principais tecnologias de microgeração e armazenamento de energia, podemos observar na FIGURA 3 um modelo de microrrede de corrente contínua. Esse modelo tem a capacidade de operar

de forma autônoma ou conectada à rede tradicional por meio de um conversor bidirecional CA/CC (KASSAR, 2018).

FIGURA 3 - Microrrede em corrente contínua



Fonte: KASSAR (2018)

2.2 TOPOLOGIAS DAS MRS EM CORRENTE CONTÍNUA

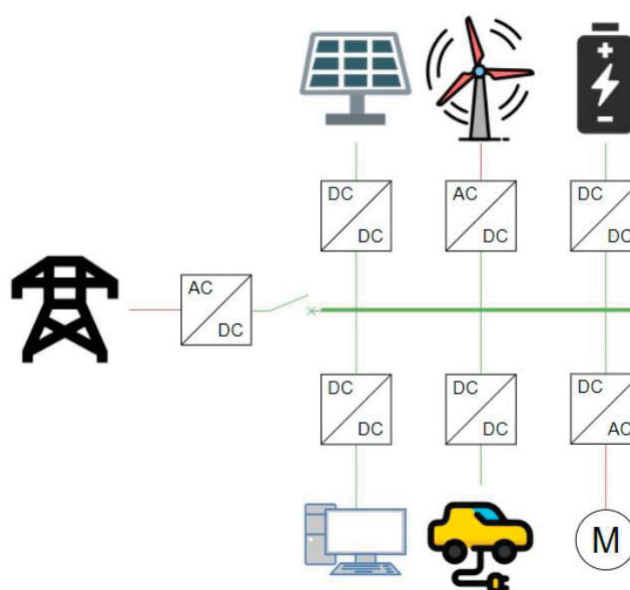
No que se refere às topologias de uma microrrede em corrente contínua, podem ser identificados quatro tipos principais: Barramento único, radial, em anel e em malha (FOTOPOULOU, M. et al., 2021).

2.2.1 Barramento único

A configuração de barramento único é caracterizada por possuir apenas um barramento que conecta os componentes do sistema, como cargas, unidades de geração, unidades de armazenamento e a interface com a rede de distribuição de corrente alternada. Sua principal vantagem é a simplicidade, baixo custo e baixa necessidade de manutenção. No entanto, quando se trata de flexibilidade no gerenciamento de falhas, a configuração de barramento único apresenta opções muito limitadas. Esse tipo de configuração é encontrado em diversos estudos, onde

microrredes em corrente contínua de barramento único são usadas como redes de teste para a implementação de esquemas de controle de MRs-CC, demonstrando a capacidade de integração simples de fontes renováveis de energia (FRE) e operação eficiente (HATAHET, MAREI E MOKHTAR 2021; LIU, ZHAO E ZOU 2020). Como observado na FIGURA 4.

FIGURA 4 - Configuração barramento único



Fonte: Fotopoulou, M. et al. (2021).

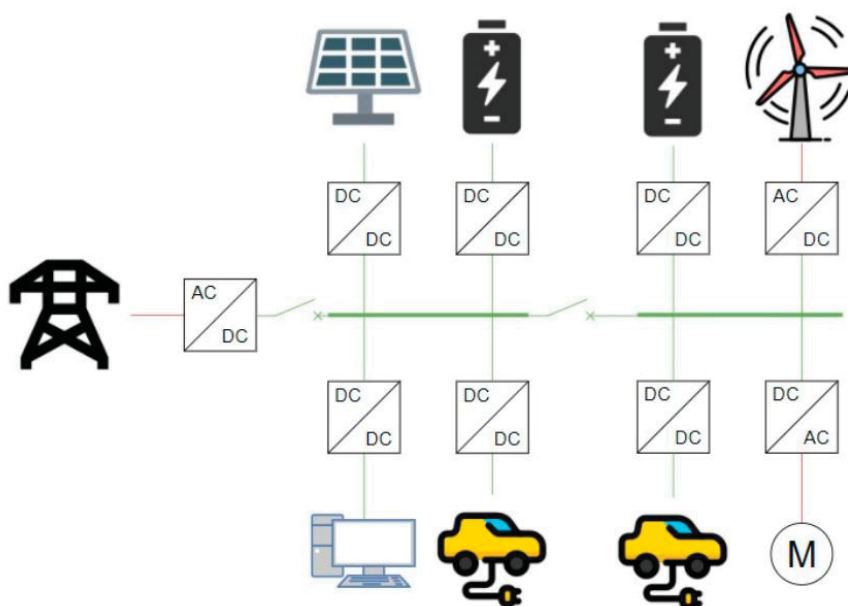
2.2.2 Radial

O conceito geral de uma configuração radial envolve vários barramentos de corrente contínua conectados entre si sem formar *loops*, tendo apenas uma única forma de conexão entre a interface da MR e cada componente da MR. A configuração radial é dividida em duas principais subcategorias, ou seja, uma configuração em série e uma configuração em paralelo (KUMAR, ZARE, GHOSH, 2017).

De acordo com a FIGURA 5, observa-se que existem dois (ou mais) barramentos de corrente contínua, cada um dos quais serve diretamente uma combinação de cargas, unidades de geração, unidades de armazenamento e unidades de fornecimento. O primeiro barramento de corrente contínua está diretamente conectado à interface entre a MR-CC e a rede principal. No entanto, o segundo barramento de corrente contínua está conectado apenas ao primeiro

barramento de corrente contínua por meio de um cabo de energia de corrente contínua, com dispositivos de comutação e proteção apropriados. Dessa forma, se ocorrer uma falha na rede de corrente contínua, a parte com falha pode ser isolada, permitindo que o restante da rede opere normalmente (FOTOPOULOU, M. et al., 2021).

FIGURA 5 - Configuração radial

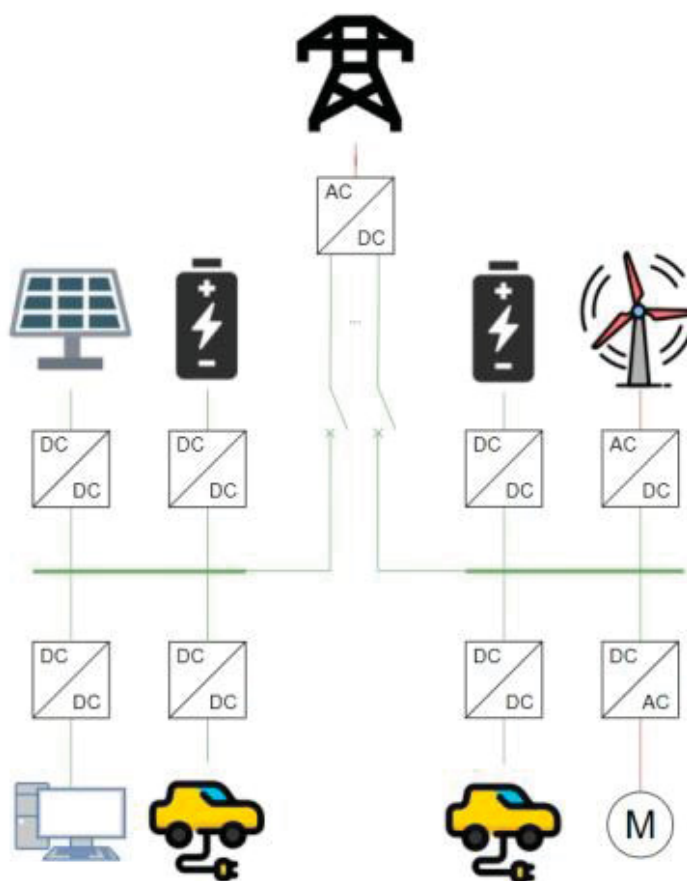


Fonte: Fotopoulou, M. et al. (2021).

Entretanto, a topologia radial em paralelo é apresentada na FIGURA 6. Nesse caso, os barramentos de corrente contínua não estão conectados entre si. Em vez disso, ambos estão conectados, por meio de cabos de energia, ao conversor de eletrônica de potência que faz a interface entre a MR-CC e a rede principal de corrente alternada. Dessa forma, se ocorrer uma falha em um dos barramentos da MR-CC, o outro barramento da rede permanecerá conectado à rede principal, mantendo a capacidade de operação segura e normal. Por esse motivo, essa solução é considerada mais confiável do que a configuração em série. A configuração em paralelo também pode ser expandida para um número maior de barramentos, dependendo dos requisitos do sistema. Quando se trata de configurações em paralelo com mais de dois barramentos de corrente contínua, uma vantagem em relação à configuração em série é a capacidade de compartilhar energia entre os barramentos, mesmo no caso de uma falha que isole um ou mais barramentos de corrente contínua.

Essa característica destaca a capacidade de compartilhamento de energia da configuração em paralelo (FOTOPOULOU, M. et al., 2021).

FIGURA 6 - Configuração radial em paralelo



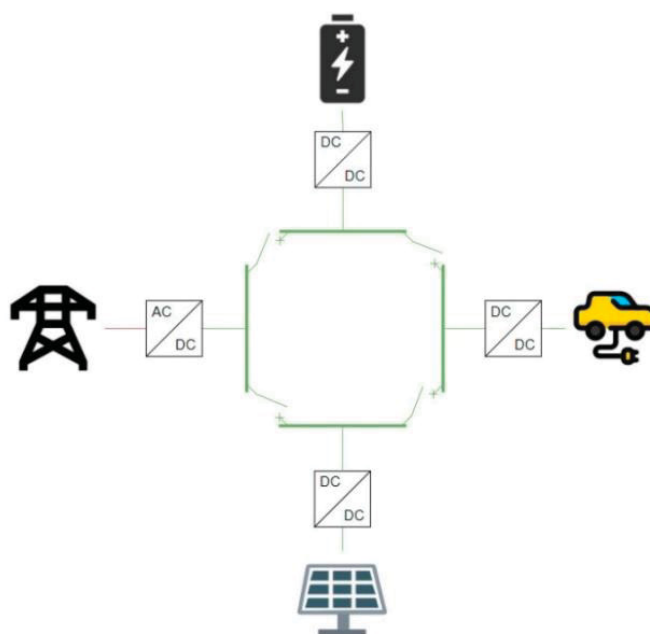
Fonte: Fotopoulou, M. et al. (2021).

No geral, a configuração radial representa uma solução simples e econômica, com baixas exigências de manutenção, porém com opções limitadas de flexibilidade e gerenciamento de falhas. Ela tem sido amplamente estudada em várias aplicações de microrredes em corrente contínua desde edifícios inteligentes individuais até nível de distrito, principalmente devido à sua simplicidade (FOTOPOULOU, M. et al., 2021).

2.2.3 Anel

Apesar das vantagens da distribuição radial, existem certas limitações que representam desafios em termos de flexibilidade e gerenciamento de falhas. Para superar essas limitações, foi introduzida uma topologia mais complexa conhecida como configuração em anel. A ideia principal da configuração em anel é ilustrada na FIGURA 7. Nessa solução proposta, todas as cargas, unidades de geração e armazenamento são interconectadas ao longo de um único anel. Para garantir a segurança, são colocados interruptores de proteção antes e depois da integração de cada barramento. Isso significa que cada componente possui duas possíveis formas de conexão com a interface entre a microrrede de corrente contínua e a rede principal, através da linha do lado esquerdo e da linha do lado direito. A configuração em anel oferece flexibilidade à MR-CC, pois em caso de falha, os interruptores correspondentes a isolam, permitindo que todas as unidades continuem funcionando normalmente, exceto a unidade com defeito (ULLAH, S. et al. 2020).

FIGURA 7 - Configuração anel

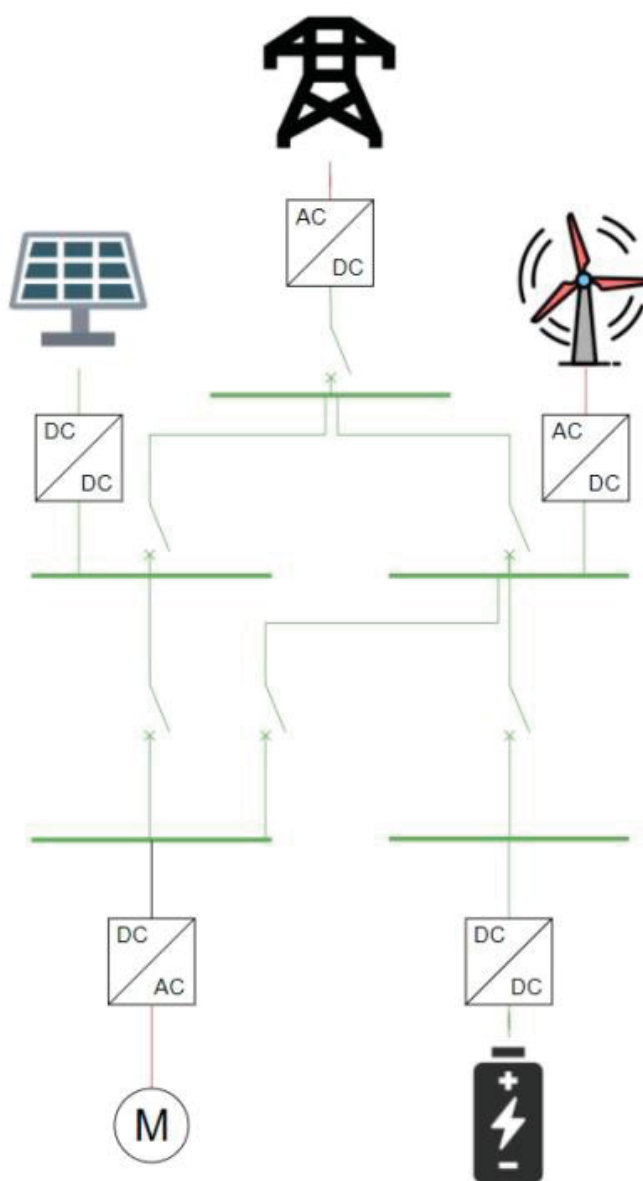


Fonte: Fotopoulou, M. et al. (2021).

2.2.4 Malha

As configurações radial e anel podem ser combinadas em uma configuração em malha, conforme apresentado na FIGURA 8. A configuração em malha constitui uma topologia complexa que possui em parte a simplicidade da configuração radial e em parte a flexibilidade da configuração em anel (FOTOPOULOU, M. et al., 2021).

FIGURA 8 - Configuração malha



Fonte: Fotopoulou, M. et al. (2021).

2.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS TOPOLOGIAS

O QUADRO 2 resume todas as características descritas, juntamente com a classificação de cada topologia. Pode-se afirmar que a flexibilidade de uma topologia, em termos de gerenciamento de falhas e obtenção de fornecimento de energia, é inversamente proporcional à sua simplicidade e eficiência de custo, como seria de se esperar. Portanto, a seleção da topologia durante a fase de projeto de uma MR em corrente contínua deve ser feita levando em consideração suas necessidades e os recursos de desenvolvimento disponíveis.

QUADRO 2 - Comparação entre topologias

Características	Barramento único	Radial	Anel	Malha
Custo	Muito baixo	Baixo	Médio	Médio
Simplicidade	Muito alta	Alta	Média	Média
Requisitos de Manutenção	Muito baixos	Baixos	Médios	Médios
Capacidade de Gerenciamento de Falhas	Muito baixa	Baixa	Média	Média
Fácil Integração de FER Remotos	Não	Sim	Sim	Sim
Capacidade de Fornecimento Contínuo da Rede Elétrica	Não	Não	Não	Não
Reconfiguração	Não	Não	Sim	Sim
Campo Principal de Aplicação	Edifícios, Pequenos Distritos	Distritos com FER	Distritos com FER	Distritos com FER

Fonte: O Autor (2023).

2.4 FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE CORRENTE CONTÍNUA

Geralmente, um sistema de corrente contínua de potência é composto por consumidores de energia (cargas), uma rede elétrica que interconecta os elementos do sistema e por fontes de geração de energia (geradores) (ANDRADE e HERNÁNDEZ, 2018).

Os geradores podem ser vistos tanto como uma fonte de tensão constante quanto como uma fonte de potência constante, as cargas, por sua vez, são geralmente consideradas como consumidores de potência constante e os alimentadores da rede são modelados simplesmente como resistências em série, as quais compõem a matriz

de condutância da rede elétrica (ANDRADE e HERNÁNDEZ, 2018; GARCÉS e MONTOYA, 2019).

2.5 PROBLEMA DO FLUXO DE POTÊNCIA EM CORRENTE CONTÍNUA

O cálculo do fluxo de potência é um problema que envolve a determinação das tensões em cada barra do sistema e a análise do fluxo de potência em cada ramo, bem como as perdas correspondentes na rede (ANDRADE e HERNÁNDEZ, 2018).

Para realizar esses cálculos, é necessário utilizar dados de entrada, como informações sobre potência gerada, potência demandada e parâmetros da rede elétrica, como a resistência de cada ramo do sistema (ANDRADE e HERNÁNDEZ, 2018).

A solução desse problema requer a consideração do balanço geral de energia do sistema, garantindo que a potência gerada seja igual à potência consumida, levando em conta tanto a demanda de potência pelas cargas quanto as perdas de energia na rede elétrica (ANDRADE e HERNÁNDEZ, 2018).

Com base nessas informações, chega-se à conclusão de que a solução do problema de fluxo de potência deve seguir o balanço global de potência do sistema, conforme apresentado na Equação (1).

$$\sum_{k=1}^n P_{Gk} = \sum_{k=1}^n P_{Dk} + \sum_{m=1}^{n_l} P_{Lm} \quad (1)$$

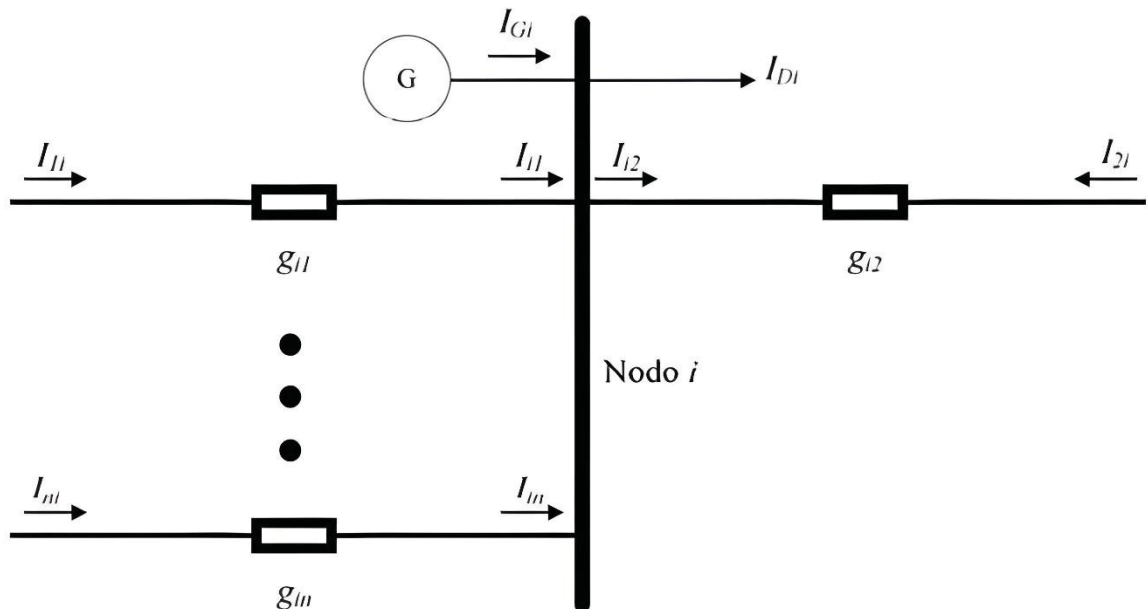
Onde:

- P_{Gk} = Potência gerada na barra k
- P_{Dk} = Potência demandada na barra k
- P_{Lm} = Potência perdida na rede
- n = número de barras do sistema
- n_l = número de ramos do sistema

2.5.1 Formulação do problema de fluxo de potência em redes cc

A formulação do problema ocorre a partir das equações de balanço de potência de barra. A dedução do problema pode ser realizada através da aplicação direta da lei das correntes de Kirchhoff, conforme descrito por Andrade e Hernández (2018). Consideremos uma barra específica k em um sistema elétrico de corrente contínua, onde estão conectados elementos de geração e demanda de potência, bem como linhas de energia. Cada um desses elementos injeta uma corrente específica nesse nó, conforme ilustrado na FIGURA 9.

FIGURA 9 - Balanço de Corrente na Barra k



Fonte: Andrade e Hernández (2018).

Ao aplicar a lei das correntes de Kirchhoff, obtemos a Equação (2).

$$\sum_{m=1}^{n_l} I_{km} + I_{Dk} = I_{Gk} \quad (2)$$

Onde:

- I_{km} = Injeção de corrente das linhas
- I_{Dk} = Corrente demandada pelas cargas
- I_{Gk} = Corrente injetada pela geração

A expressão da Equação (2) pode ser reescrita em termos de tensões e condutâncias, substituindo a corrente pelas relações descritas nas Equações (3) e (4).

$$I = \frac{V}{R} \quad (3)$$

$$g_{km} = \frac{1}{r_{km}} \quad (4)$$

Dessa forma chegamos à Equação (5).

$$\sum_{m=1}^{n_l} I_{km} = \sum_{m=1}^{n_l} g_{km}(V_k - V_m) = I_k \quad (5)$$

É possível expressar a Equação (5) em termos da matriz de condutância nodal:

$$I_k = G_{kk}V_k + \sum_{m=1, m \neq k}^{n_l} G_{km}V_m \quad (6)$$

Sendo que:

$$G_{kk} = \sum_{m=1}^{n_l} g_{km} \quad (7)$$

$$G_{km} = -g_{km} \quad (8)$$

Ao multiplicar a Equação (2) por V_k , obtemos o balanço de potência nodal do sistema. Em outras palavras, o equilíbrio de potência em qualquer barra k do sistema elétrico pode ser descrito pela Equação (9):

$$P_{Gk} - P_{Dk} - \sum_{m \in k} P_{km} = 0 \quad (9)$$

Onde:

$$k \in \mathbb{N}, 1 \leq k \leq n$$

Sendo que:

- P_{Gk} = Potência gerada na barra k
- P_{Dk} = Potência demandada na barra k
- P_{km} = Fluxo de potência da barra k à barra m
- $m \in k$ = Universo de barras conectadas diretamente à barra k

A potência líquida injetada na barra k é a soma algébrica dos fluxos incidentes, conforme expresso na Equação (10):

$$P_k = \sum_{m \in k} P_{km} \quad (10)$$

Podemos substituir a Equação (10) na Equação (9), resultando em:

$$P_{Gk} - P_{Dk} - P_k = 0 \quad (11)$$

De acordo com a definição do problema de fluxo de potência, obtemos:

$$P_{esp k} - P_k = 0 \quad (12)$$

Considerando que:

$$P_{esp k} = P_{Gk} - P_{Dk} \quad (13)$$

Já a potência injetada em cada nó, em termos de correntes e tensões, pode ser escrita como:

$$P_k = V_k I_k = V_k \sum_{m \in k} V_m G_{km} \quad (14)$$

Dessa forma, chegamos à equação de balanço de potência nodal (15), que expressa o problema de fluxo de potência em sistemas de corrente contínua:

$$F_{Pk} = P_{Gk} - P_{Dk} - V_k \sum_{m \in k} V_m G_{km} = 0 \quad (15)$$

A geração e a carga são definidas em cada barra do sistema, tornando as tensões de barra as incógnitas do problema. No entanto, devido às perdas presentes no sistema, não é possível estabelecer o balanço de potência em todas as barras. Por essa razão, é necessário que pelo menos uma barra de geração não tenha sua potência especificada, fazendo com que sua equação não seja incluída no conjunto total de equações a serem resolvidas. Essa barra é conhecida como "barra de referência" (ou *slack node*).

Uma vez que o problema é solucionado, é possível calcular o fluxo de potência em cada ramo do sistema usando a Equação (16).

$$P_{km} = g_{km} V_k (V_k - V_m) \quad (16)$$

Da mesma forma, a Equação (17) pode ser aplicada para calcular o fluxo da barra m para a barra k.

$$P_{mk} = g_{km} V_m (V_m - V_k) \quad (17)$$

A geração na barra de referência pode ser calculada usando a Equação (18).

$$P_{Gs} = P_{Ds} + V_s \sum_{m \in S} V_m G_{sm} \quad (18)$$

Finalmente, as perdas de transmissão em cada ramo podem ser calculadas somando o fluxo da barra k para a barra m com o fluxo da barra m para a barra k, resultando nas perdas totais do sistema, conforme a Equação (19).

$$P_L = \sum_{n_l} (P_{km} + P_{mk}) \quad (19)$$

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 2

No presente capítulo, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente sobre as topologias das microrredes em corrente contínua e o fluxo de potência em sistemas de corrente contínua. As diferentes topologias, como o barramento único, radial, anel e malha, foram apresentadas e discutidas em termos de suas características e aplicabilidades. Cada topologia possui vantagens e desvantagens específicas, o que ressalta a importância de selecionar a topologia adequada para cada contexto de aplicação.

Além disso, foi abordado o fluxo de potência em sistemas de corrente contínua, enfatizando-se o problema associado a esse fluxo. A formulação do problema de fluxo de potência em redes CC permitiu uma compreensão mais clara dos desafios e das soluções para o cálculo eficiente e preciso do fluxo de potência nesses sistemas. A utilização do método de Newton-Raphson foi apresentada como uma abordagem convencional para a solução desse problema, mas também foi proposto um método não-iterativo, que pode oferecer vantagens em termos de eficiência computacional e convergência.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia relacionada ao desenvolvimento dos algoritmos para análise de sistemas CC considerados neste trabalho. O primeiro algoritmo é capaz de calcular o fluxo de potência em redes de corrente contínua utilizando o método de Newton-Raphson. Esse algoritmo recebe os dados das barras e das linhas do sistema como entrada. Após resolver o problema de fluxo de potência, o algoritmo retorna os valores de tensão em cada barra do sistema, as injeções de potência em cada barra, os fluxos de potência nas linhas e as perdas do sistema.

Além disso, é elaborado um segundo algoritmo que realiza o cálculo das tensões em cada barra do sistema utilizando apenas uma iteração, diferentemente do método iterativo de Newton-Raphson. Os resultados obtidos por ambos os algoritmos são comparados e avaliados.

Para garantir o funcionamento adequado dos algoritmos, são realizados testes utilizando casos conhecidos, incluindo situações de aumento e redução de carga, bem como análises de contingência.

Essas etapas de desenvolvimento e testes visam verificar a eficiência e a confiabilidade dos algoritmos em diferentes cenários de sistemas elétricos.

3.1 SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FLUXO DE POTENCIA PELO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA SISTEMAS EM CORRENTE CONTÍNUA

O problema de fluxo de potência envolve a resolução de um sistema não linear composto por n equações (Equação 15). Para encontrar uma solução para esse sistema, pode-se utilizar um método iterativo, como o método de Newton-Raphson.

O método de Newton-Raphson é baseado na expansão em série de Taylor da equação original, considerando apenas os termos de primeira ordem. Supõe-se que todas as variáveis envolvidas estão próximas de uma solução e, a partir dessa suposição, obtém-se uma expressão iterativa para encontrar as soluções do sistema.

Portanto, o método de Newton-Raphson é utilizado para resolver o problema de fluxo de potência, buscando encontrar as soluções para as equações não lineares do sistema.

A dedução completa pode ser encontrada no artigo de Andrade e Hernández (2018). A partir dessas considerações, obtém-se a expressão a seguir:

$$F_{Pk} = \frac{\partial F_{Pk}}{\partial P_{Gk}} \Delta P_{Gk} + \frac{\partial F_{Pk}}{\partial P_{Dk}} \Delta P_{Dk} + \sum_{m \in k} \frac{\partial F_{Pk}}{\partial V_m} \Delta V_m + \sum_{m \in k} \frac{\partial F_{Pk}}{\partial G_{km}} \Delta G_{km} \quad (20)$$

Como há variáveis que são especificadas, podemos simplificar a equação anterior para obter:

$$F_{Pk} = \frac{\partial F_{Pk}}{\partial V_m} \Delta V_m \quad (21)$$

Assim, na iteração i do método de Newton utilizado para resolver o problema de fluxo de potência em corrente contínua, temos:

$$-[\Delta P]^{(i)} = \left[\frac{\partial F_P}{\partial V} \right]^{(i)} [\Delta V]^{(i)} \quad (22)$$

Considerando que a carga e a geração são constantes, é possível expressar as derivadas parciais de F_P em função das derivadas parciais da injeção de potência líquida. Obtemos:

$$\frac{\partial F_{Pk}}{\partial V} = \frac{\partial P_{Gk}}{\partial V} - \frac{\partial P_{Dk}}{\partial V} - \frac{\partial P_k}{\partial V} = -\frac{\partial P_k}{\partial V} \quad (23)$$

Então, a Equação (22) se converte em:

$$[\Delta P]^{(i)} = \left[\frac{\partial P}{\partial V} \right]^{(i)} [\Delta V]^{(i)} \quad (24)$$

De forma geral, cada elemento dessa matriz de derivadas parciais é calculado utilizando as seguintes expressões:

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_k} = 2V_k G_{kk} + \sum_{m \in k} V_m G_{km} \quad (25)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k G_{km} \quad (26)$$

Podemos calcular o valor do vetor independente, através da Equação (27).

$$\Delta P_k^{(i)} = P_{Gk} - P_{Dk} - P_k^{(i)} \quad (27)$$

Sendo que:

$$P_k^{(i)} = V_k^{(i)} \sum_{m \in k} V_m^{(i)} G_{km} \quad (28)$$

Uma vez que a Equação (24) é resolvida, os valores de tensão são atualizados utilizando a seguinte expressão:

$$V_k^{(i+1)} = V_k^{(i)} + \Delta V_k^{(i)} \quad (29)$$

O procedimento mencionado começa com uma configuração plana de tensões, isto é, as tensões são consideradas inicialmente com magnitude de 1pu e ângulo de 0 grau, em todos os nós de carga e é repetido até que a solução seja alcançada, ou seja, até que o seguinte critério de convergência seja satisfeito.

$$\text{Max} \left| \Delta P_k^{(i)} \right| \leq \text{tol}_P \quad (30)$$

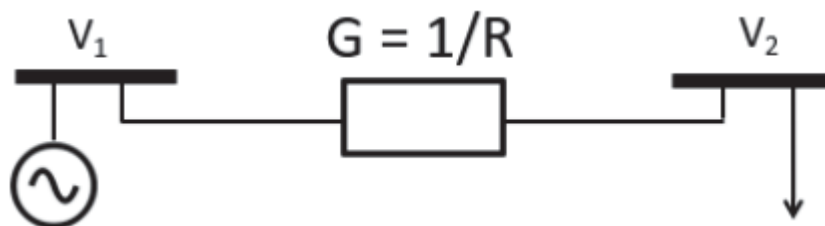
3.2 MÉTODO NÃO-ITERATIVO

Esse método não-iterativo baseia-se em uma formulação matemática que permite encontrar diretamente as duas raízes da equação de fluxo de potência em corrente contínua. Ao invés de realizar iterações sucessivas para obter uma solução aproximada, o algoritmo encontra diretamente os valores das tensões nos diferentes pontos do sistema elétrico.

3.2.1 Formulação do método não-iterativo

O desenvolvimento desse método não-iterativo requer uma formulação matemática adequada, levando em consideração as equações que descrevem o fluxo de potência em corrente contínua. Portanto, para exemplificar a aplicação, utiliza-se o circuito indicado na FIGURA 10 (AMBRÓSIO, 2018).

FIGURA 10 - Sistema para dedução do algoritmo



Fonte: AMBRÓSIO (2018)

Considerando a abordagem proposta neste trabalho, em que o barramento 1 é considerado um barramento de referência com uma tensão estabelecida V_1 , a única variável de estado a ser determinada é a magnitude da tensão do barramento 2 (V_2).

Assumindo que a tensão V_1 é controlada e tratada como uma entrada conhecida, é possível aplicar a lei de Kirchhoff, para obter V_2 , como pode-se ver na Equação (31):

$$V_2 = V_1 - IR \quad (31)$$

Além disso, é conhecido que a corrente de carga, que flui pela linha, é determinada pela razão entre P_2 e V_2 , conforme demonstrado na Equação (32):

$$I = \frac{P_2}{V_2} \quad (32)$$

Ao substituir a Equação (31) na Equação (32) e invertendo a resistência, obtemos a Equação (33):

$$V_2 = V_1 - \frac{P_2}{V_2} G^{-1} \quad (33)$$

Por fim, multiplica-se ambos os lados da Equação (33) por V_2 , resultando na Equação (34):

$$V_2^2 + (-V_1)V_2 + P_2G^{-1} = 0 \quad (34)$$

Dessa forma, a solução, ou seja, a determinação da variável de estado V_2 , é encontrada aplicando a fórmula de Bhaskara à Equação (34), resultando na Equação (35):

$$V_2 = \frac{V_1 + (V_1^2 - 4P_2G^{-1})^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (35)$$

A solução pode ser generalizada para sistemas com n barras, utilizando a expansão matricial das variáveis de estado e parâmetros do sistema. Isso pode ser expresso na Equação (36), em que todos os vetores e matrizes possuem dimensão igual ao número de barras sem controle de tensão (barras PQ).

$$[V] = \frac{[V_{ref}] + \left([V_{ref}]^2 - 4G^{-1}[P] \right)^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (36)$$

Sendo que:

- $[V]$ = Vetor de variáveis de estado, associado à magnitude das tensões nodais;
- $[V_{ref}]$ = vetor associado à magnitude de tensão das barras de tensão controlada, definido em (37);
- $[P]$ = Vetor de injeções de potência ativa;
- G = Matriz de condutância da rede elétrica.

O vetor $[V_{ref}]$, que representa as magnitudes de tensão nas barras de referência, é definido como:

$$[V_{ref}] = [G']^{-1}[G''] [V_A] \quad (37)$$

Onde:

- G' e G'' = Submatrizes tipo condutância;
- $[V_A]$ = Vetor das magnitudes de tensão das barras de tensão controlada.

3.3 ALGORITMO DE CÁLCULO DE FLUXO DE POTÊNCIA EM CORRENTE CONTÍNUA

O algoritmo, desenvolvido na plataforma Octave, pode ser dividido em três etapas: entrada de dados, saída de dados e processamento. Cada uma dessas etapas será descrita a seguir.

3.3.1 Dados de entrada

Os dados de entrada são separados em dados de barras do sistema e dados de linhas. Cada uma dessas partes será organizada em um arquivo no formato .m, com uma estrutura própria que contém informações e colunas específicas.

3.3.1.1 Dados de barra

Cada barra apresentará os seguintes valores: número da barra, tipo de barra, potência gerada, potência demandada, tensão associada à barra. Cada uma dessas informações será explicada em detalhes a seguir.

3.3.1.2 Tipo de barra

Para definir uma barra como tensão constante, é necessário atribuir o tipo 1, assim como na barra de referência. Nessas barras, o valor de tensão será fixado como o valor especificado na coluna de tensão (V_{esp}).

Para definir uma barra como uma barra de potência constante, o tipo deve ser definido como 2. Nessas barras, as colunas de geração e demanda de potência serão consideradas ao longo do algoritmo. A coluna de tensão (V_{esp}) determinará o valor inicial estimado para essa barra nos métodos iterativos. Se o valor for nulo, será considerado como 1 pu.

3.3.1.3 Potência gerada (PG)

Para barras de potência ou barras de tensão constante, a coluna de potência gerada (em pu) é utilizada para definir o valor correspondente.

3.3.1.4 Potência demandada (PD)

Na coluna de demanda, são inseridos os valores de carga para barras de potência ou barras de tensão constante. Os valores devem ser fornecidos em pu.

3.3.1.5 Tensão associada a barra (V_{esp})

A coluna correspondente à tensão associada a barra determinará o valor da tensão constante, em pu, para todas as barras de tensão no sistema. Além disso, essa coluna será utilizada para definir o valor inicial nos métodos iterativos para barras de potência.

3.3.1.6 Dados de linha

Para cada linha, haverá duas colunas indicando os pontos de conexão desse ramo e uma coluna indicando a resistência da linha.

3.3.1.7 Colunas “De” e “Para”

Essas duas colunas indicam as barras às quais a linha está conectada. O algoritmo reconhece que uma linha de 'k' para 'm' é equivalente a uma linha de 'm' para 'k', logo, não importa qual das duas barras será definida como "De" ou "Para".

Dois ramos diferentes conectados entre as mesmas duas barras se comportarão como duas linhas em paralelo.

3.3.1.8 Resistencia da linha (R_{pu})

Esta coluna indica a resistência do ramo, em pu.

3.3.2 Dados de saída

Os resultados são divididos entre resultados do algoritmo de Newton-Raphson e os resultados do algoritmo do método não-iterativo, tendo um arquivo .txt para cada um dos casos.

3.3.3 Resultados do algoritmo de newton-raphson

Os resultados do algoritmo de Newton-Raphson contêm as informações sobre quantas iterações foram necessárias para convergir o método, o valor de tensão em cada barra do sistema, as perdas totais do sistema e, por fim, os fluxos de potência nas linhas, tanto o fluxo direto quanto o fluxo reverso.

Todos os valores retornados pelo algoritmo estão em pu.

Os resultados são salvos em um arquivo chamado ResultadosNR.txt.

3.3.4 Resultados do algoritmo do método não-iterativo

Os resultados do algoritmo do método não-iterativo contêm as informações sobre o resultado das duas raízes extraídas pelo método, as tensões em cada barra do sistema, a diferença entre as tensões achadas no algoritmo de Newton-Raphson e no algoritmo do método não-iterativo e o erro percentual dessa diferença.

Todos os valores retornados pelo algoritmo estão em pu.

Os resultados são salvos em um arquivo chamado ResultadosMA.txt.

3.4 ETAPA DE PROCESSAMENTO

Essa etapa é responsável por conectar os dados de entrada aos dados de saída, contendo a implementação do algoritmo para cálculo de fluxo de potência. O algoritmo extrai as informações dos dados de entrada e as manipula para gerar os dados de saída desejados.

Os arquivos que compõem os algoritmos são:

- Dadosdebarra.m;
- Dadosdelinha.m;
- MetodoNR.m;
- Metodonaointerativo.m

Todos os arquivos deverão estar na mesma pasta, para o funcionamento dos algoritmos.

Dadosdebarra.m

Esse arquivo é responsável por transformar em matriz todos os dados sobre as barras do sistema.

Dadosdelinhas.m

Esse arquivo é responsável por transformar em matriz todos os dados sobre as linhas do sistema.

MetodoNR.m

Este arquivo contém a implementação do algoritmo de cálculo de fluxo de potência utilizando o método de Newton-Raphson. O objetivo desse algoritmo é determinar as tensões em todas as barras do sistema. Ele é capaz de lidar com todos os tipos de barras existentes no sistema, como barras de potência constante ou tensão

constante, inclusive permitindo um sistema com os dois tipos de barras simultaneamente.

O algoritmo começa criando os vetores de diferenças de tensão e de potência, e também inicializa o contador de iterações. Após construir o vetor de diferenças de potência, verifica-se se o valor inicial fornecido já é a solução. Caso seja, a execução dessa etapa é encerrada. Caso contrário, o processo iterativo é iniciado.

A cada iteração, a matriz jacobiana e o vetor de diferença de potência são atualizados, com o objetivo de determinar o novo vetor de tensões das barras. As iterações continuam até que o critério de convergência seja alcançado. Nesse momento, as iterações são interrompidas e a solução é armazenada no vetor de tensões das barras.

Com o vetor de tensões das barras é calculado o fluxo de potência direto e reverso dos ramos, a diferença entre esses dois fluxos resulta nas perdas totais do sistema.

Metodonaointerativo.m

Este arquivo contém a implementação do algoritmo de cálculo de fluxo de potência utilizando o método não-iterativo, esse método utiliza a fórmula de Bhaskara para calcular as raízes do problema quadrático. Cada raiz obtida representa uma possível solução para o sistema de equações e corresponde a uma combinação de valores para as magnitudes das tensões nas barras.

Após obter as raízes, é verificada sua viabilidade. Isso envolve verificar se as tensões calculadas são positivas e se as restrições de potência são respeitadas. Caso uma raiz não atenda a essas condições, ela é descartada como uma solução inviável.

Com as tensões não descartadas, há uma comparação das tensões de barra do método de Newton-Raphson e o método não-iterativo, e por fim é feita uma comparação percentual dessa diferença.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 3

Neste capítulo, foi apresentada a metodologia adotada para a solução do problema de fluxo de potência em corrente contínua. Inicialmente, foi utilizado o método de Newton-Raphson, que é uma abordagem amplamente utilizada para

resolver esse problema. Através do método de Newton-Raphson, é possível obter uma solução iterativa e convergir para o estado de equilíbrio do sistema.

Além disso, uma alternativa ao método de Newton-Raphson foi proposta, visando melhorar a eficiência computacional e a convergência do cálculo de fluxo de potência em CC. Esse método não-iterativo foi formulado com base em considerações específicas para sistemas de corrente contínua, oferecendo uma abordagem promissora para a solução desse problema.

Foi apresentado um algoritmo detalhado para o cálculo do fluxo de potência em corrente contínua, incluindo os dados de entrada necessários, como os dados das barras e das linhas do sistema.

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta. Para uma melhor organização e compreensão, o capítulo é dividido em duas subseções.

A primeira subseção é dedicada à apresentação dos resultados relacionados ao Capítulo 3, a fim de consolidar as informações e análises apresentadas anteriormente. Nesta subseção, são apresentados os resultados específicos que foram obtidos com base na metodologia proposta, destacando as principais conclusões e insights decorrentes desses resultados.

Na segunda subseção deste capítulo, são apresentados os resultados relacionados à avaliação das tensões nas barras de sistemas de distribuição. Esses resultados foram obtidos por meio da aplicação da metodologia proposta em diferentes cenários operacionais. São discutidos os efeitos das variações nas condições de operação, considerando diferentes demandas, configurações de rede e características específicas dos sistemas de distribuição.

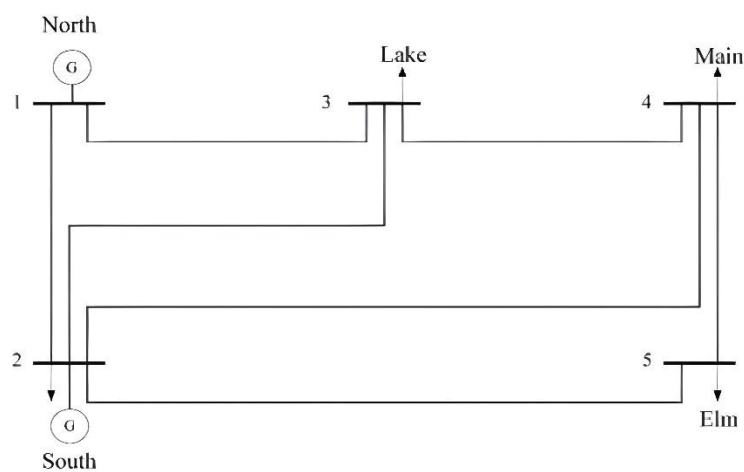
4.1 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Conforme mencionado anteriormente, os resultados são apresentados neste momento com o objetivo de comprovar a validade da metodologia proposta neste trabalho.

4.1.1 CASO 1: SISTEMA COM 5 BARRAS – METÓDO NEWTON-RAPHSON

O sistema de teste utilizado neste estudo foi o caso proposto por Andrade e Hernández (2018), cuja topologia é ilustrada na FIGURA 11. Os dados das barras, já convertidos para valores em pu, estão apresentados no QUADRO 3, enquanto os dados das linhas podem ser encontrados no QUADRO 4.

FIGURA 11 - Sistema teste de 5 barras



Fonte: Andrade e Hernández (2018).

QUADRO 3 - Dados de barra do sistema teste 5 barras

Barra	PG (pu)	PD (pu)	Vesp (pu)
1	-	0	1
2	5,4	2,2	-
3	0	2,45	-
4	0	3	-
5	0	3	-

Fonte: Andrade e Hernández (2018)

QUADRO 4 - Dados de linha do sistema teste 5 barras

Barra "De"	Barra "Para"	R (pu)
1	2	0,006875
1	3	0,00625
2	3	0,0096875
2	4	0,01125
2	5	0,0078125
3	4	0,00625
4	5	0,0084375

Fonte: Andrade e Hernández (2018).

O sistema de teste foi utilizado para verificar o funcionamento do algoritmo com base no método de Newton-Raphson. A fim de comparação, os resultados do caso de estudo 1, proposto pelos autores, foram considerados como referência. Os valores de

tensão correspondentes a esses resultados estão apresentados no QUADRO 5, enquanto os fluxos de potência podem ser encontrados no QUADRO 6.

QUADRO 5 - Resultado de tensão do caso 1

Barra	Tensão (pu)
1	1
2	0,986182
3	0,978368
4	0,967347
5	0,964509

Fonte: Andrade e Hernández (2018).

QUADRO 6 - Resultado dos fluxos de potência do caso 1

De	Para	Fluxo direto (pu)	Fluxo reverso (pu)
1	2	2,0099305	-1,982162
1	3	3,461050	-3,386182
2	3	0,795385	-0,789083
2	4	1,651050	-1,619517
2	5	2,735728	-2,675607
3	4	1,725265	-1,705830
4	5	0,325347	-0,324393

Fonte: Andrade e Hernández (2018)

Para o teste de funcionamento do algoritmo de Newton-Raphson, foram configurados conforme a FIGURA 12 (dados de barra do sistema) e FIGURA 13 (dados de linha do sistema). Nota-se nos dados de barra que a primeira barra é do tipo 1, ou seja, será a barra de referência do sistema.

FIGURA 12 - Dados de barra Caso 1

```

% |Barra|Tipo|Vesp (pu) |PGk (pu) |PDk (pu) |
barradata5 = [ 1 1 1 0 0 ;
               2 2 1 5.40 2.20 ;
               3 2 1 0 2.45 ;
               4 2 1 0 3.00 ;
               5 2 1 0 3.00 ];

```

Fonte: O Autor (2023).

FIGURA 13 - Dados de linha Caso 1

```

%          | De   | Para | R          |
%          | Barra| Barra| pu         |
linhadata5 = [1     2     0.0068750
              1     3     0.0062500
              2     3     0.0096875
              2     4     0.0112500
              2     5     0.0078125
              3     4     0.0062500
              4     5     0.0084375 ];

```

Fonte: O Autor (2023).

Após a realização dos testes, os resultados das tensões das barras, fluxo de potência direta e fluxo de potência reversa foram analisados. Os resultados obtidos para as tensões estão apresentados no QUADRO 7, juntamente com os valores teóricos.

QUADRO 7 - Resultados comparativos de tensão Caso 1

Barra	Simulado (pu)	Referência (pu)
1	1	1
2	0,986181727	0,986182
3	0,978368477	0,978368
4	0,967347188	0,967347
5	0,964509421	0,964509

Fonte: O Autor (2023).

Os resultados de tensão obtidos com o algoritmo concordam com os resultados do artigo, considerando a precisão adotada. O QUADRO 8 apresenta os resultados dos fluxos de potência.

Pode-se verificar que, para a precisão adotada, os resultados de fluxo de potência obtidos com o algoritmo concordam com os resultados do artigo.

QUADRO 8 - Resultados comparativos de fluxo de potência

De	Para	Fluxo Direto (pu)		Fluxo Reverso (pu)	
		Simulado	Referência	Simulado	Referência
1	2	2,00993582	2,009935	-1,98216191	-1,982162
1	3	3,46105009	3,46105	-3,38618217	-3,386182
2	3	0,79538461	0,795385	-0,78908299	-0,789083
2	4	1,65104960	1,65105	-1,61951706	-1,619517
2	5	2,73572770	2,735728	-2,67560729	-2,675607
3	4	1,72526516	1,725265	-1,70583006	-1,70583
4	5	0,32534712	0,325347	-0,32439270	-0,324393

Fonte: O Autor (2023).

4.1.2 CASO 2: SISTEMA COM 5 BARRAS – METÓDO NEWTON-RAPHSON

Para o teste do Caso 2, será utilizado os resultados do caso de estudo 3, proposto pelos autores do artigo, como referência. A diferença do caso de estudo 1 para o caso de estudo 3, é que o barramento 2 agora terá tensão controlada a 0,99 pu. Neste teste os dados de barra foram configurados conforme FIGURA 14.

FIGURA 14 - Dados de barra Caso 2

```

%          |Barra|Tipo|Vesp (pu) |PGk (pu) |PDk (pu) |
barradata5 = [ 1  1  1  0  0  ;
                2  1  0.99  5.40  2.20  ;
                3  2  1  0  2.45  ;
                4  2  1  0  3.00  ;
                5  2  1  0  3.00  ;];

```

Fonte: O Autor (2023).

Todos os outros dados foram mantidos, para a realização do teste.

Após a realização dos testes, os resultados das tensões das barras, fluxo de potência direta e fluxo de potência reversa foram analisados. Os resultados obtidos para as tensões estão apresentados no QUADRO 9, juntamente com os valores teóricos.

Os resultados de tensão obtidos com o algoritmo concordam com os resultados do artigo, considerando a precisão adotada.

QUADRO 9 - Resultados comparativos de tensão Caso 2

Barra	Simulado (pu)	Referência (pu)
1	1	1
2	0,99	0,99
3	0,980431743	0,980432
4	0,970308536	0,970308
5	0,967960671	0,967961

Fonte: O Autor (2023).

O QUADRO 10 apresenta os resultados dos fluxos de potência.

QUADRO 10 - Resultados comparativos de fluxo de potência Caso 2

De	Para	Fluxo Direto (pu)		Fluxo Reverso (pu)	
		Simulado	Referência	Simulado	Referência
1	2	1,454545	1,454545	-1,440000	-1,439999
1	3	3,130921	3,130921	-3,069654	-3,069454
2	3	0,977814	0,977814	-0,968364	-0,988364
2	4	1,732849	1,732849	-1,698382	-1,698382
2	5	2,792824	2,792824	-2,730650	-2,730650
3	4	1,588018	1,588018	-1,571621	-1,571621
4	5	0,270003	0,270003	-0,269350	-0,269350

Fonte: O Autor (2023).

Observa-se que houve uma pequena discrepância entre os fluxos de potência reversa simulados e de referência para as barras 2 e 3. No entanto, ao aplicar manualmente a Equação (17) aos valores de tensão das barras 3 e 2, chegamos ao resultado de -0,968364 (pu), que é exatamente o valor encontrado pelo algoritmo.

4.2 ALGORITMO DE NEWTON-RAPHSON X MÉTODO NÃO-ITERATIVO

O método de Newton-Raphson é um método iterativo amplamente utilizado para resolver problemas de fluxo de potência. Ele se baseia na linearização do sistema de equações não-lineares por meio de uma série de Taylor e utiliza iterações sucessivas para encontrar a solução. Embora seja eficaz na maioria dos casos, o método de Newton-Raphson pode exigir um número considerável de iterações para convergir, especialmente em sistemas de grande porte.

Por outro lado, o método não-iterativo proposto neste trabalho utiliza uma abordagem diferente para calcular o fluxo de potência. Em vez de iterar para encontrar uma solução, o método não-iterativo se baseia na extração das raízes de um problema de segundo grau. Essa abordagem elimina a necessidade de iterações, o que pode resultar em um tempo de cálculo significativamente menor.

Os resultados obtidos com o método não-iterativo foram comparados com os resultados do método de Newton-Raphson.

4.2.1 CASO 1: COMPARAÇÃO NEWTON-RAPHSON X MÉTODO NÃO-ITERATIVO

Utilizando os mesmos parâmetros nos dados de entrada apresentados no Caso 1 deste trabalho, foi realizado os testes com o algoritmo do método não-iterativo, afim de comparar com os resultados do algoritmo de Newton-Raphson. Como podemos ver o QUADRO 11.

QUADRO 11 - NR x MNI Tensão nas Barras Caso 1

Barra	Newton-Raphson V (pu)	Método não-iterativo V (pu)
1	1	1
2	0,986182	0,986691
3	0,978368	0,978670
4	0,967347	0,967512
5	0,964509	0,964651

Fonte: O Autor (2023).

Fez-se a diferença entre os resultados das tensões dos métodos de Newton-Raphson e o método não-iterativo, assim como erro percentual do método não-iterativo.

O QUADRO 12 apresenta os resultados explicado no parágrafo anterior.

QUADRO 12 - MNI x NR Diferença e erro percentual de tensão Caso 1

Barra	Diferença entre MNI e NR (pu)	Erro percentual (%)
1	0	0
2	-0,000510	0,051687
3	-0,000302	0,030847
4	-0,000165	0,017012
5	-0,000141	0,014663

Fonte: O Autor (2023).

4.2.2 CASO 2: COMPARAÇÃO NEWTON-RAPHSON X MÉTODO NÃO-ITERATIVO

Foram realizados testes utilizando os mesmos parâmetros dos dados de entrada apresentados no Caso 2 deste trabalho, utilizando o algoritmo do método não-iterativo. Os resultados foram comparados com os resultados do algoritmo de Newton-Raphson, conforme apresentado no QUADRO 13.

QUADRO 13 - NR x MNI Tensão nas Barras Caso 2

Barra	Newton-Raphson V (pu)	Método não-iterativo V (pu)
1	1,00	1,00
2	0,99	0,99
3	0,980432	0,980510
4	0,970309	0,970283
5	0,967961	0,967922

Fonte: O Autor (2023).

A seguir, é apresentada a comparação entre os resultados das tensões obtidas pelos métodos de Newton-Raphson e o método não-iterativo, juntamente com o cálculo do erro percentual do método não-iterativo. Os resultados são apresentados no QUADRO 14.

QUADRO 14 - MNI x NR Diferença e erro percentual de tensão Caso 2

Barra	Diferença entre MNI e NR (pu)	Erro percentual (%)
1	0	0
2	0	0
3	-0,000078	0,007964
4	0,000026	-0,002638
5	0,000039	-0,004005

Fonte: O Autor (2023).

Ambos os algoritmos de Newton-Raphson e o método não-iterativo passaram por rigorosos testes de validação e demonstraram resultados consistentes.

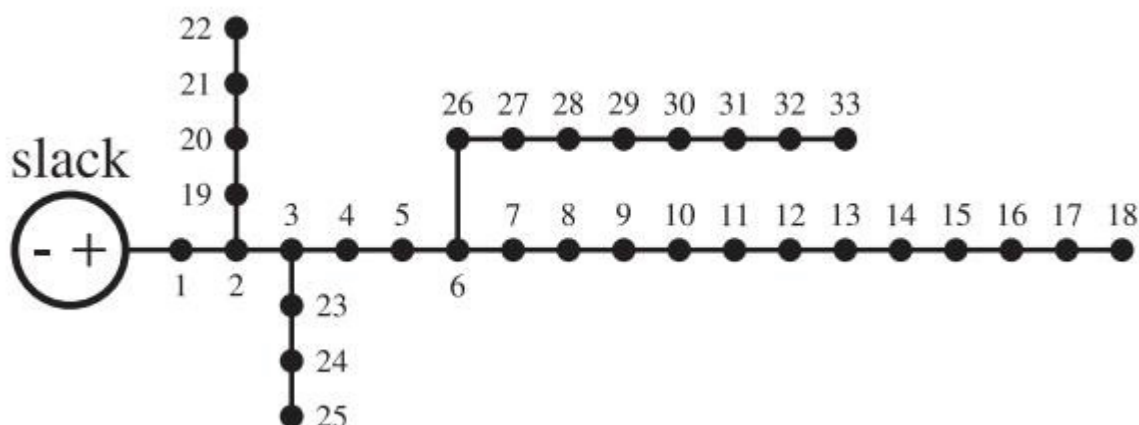
Portanto, ambos os métodos serão utilizados para realizar simulações em diferentes topologias e estados de um sistema. Essa abordagem permitirá uma análise abrangente do comportamento do sistema elétrico, considerando diferentes cenários operacionais e condições de carga. Dessa forma, será possível obter uma visão mais ampla e confiável do fluxo de potência e tomar decisões embasadas na operação e planejamento do sistema.

A utilização de ambos os métodos também permitirá uma comparação mais aprofundada de seus desempenhos em diferentes situações, contribuindo para a evolução contínua da pesquisa e desenvolvimento na área de fluxo de potência.

4.3 SIMULAÇÃO 1: SISTEMA 33 BARRAS RADIAL – MICRORREDE EM CORRENTE CONTÍNUA

Nesta simulação, foi analisado um sistema elaborado por Montoya, O.D., Gil-González, W., & Garces, A. (2020) e modificado pelo autor, cuja topologia é radial, como pode ser visto na FIGURA 15. Seus dados de barra serão apresentados no Apêndice 1, e os dados de linha se encontram no Apêndice 2.

FIGURA 15 - Microrrede de corrente contínua 33 barras - Radial



Fonte: Montoya, Gil-González, Garces (2020).

4.3.1 CENÁRIO 1: Geração distribuída à 70%

Nesse sistema a barra número 1, será considerada como barra de referência, logo, terá tensão constante de 1 pu.

Neste primeiro teste, as barras 3, 6, 9, 11, 13, 18, e 32 atuam como geração distribuída, ajudando a barra de referência a gerar energia para o sistema.

Estas barras geradoras estão produzindo 70% de sua capacidade, já que o teste em questão está sendo simulado como um dia de sol com nuvens e com incidência razoável de ventos, conforme o QUADRO 15.

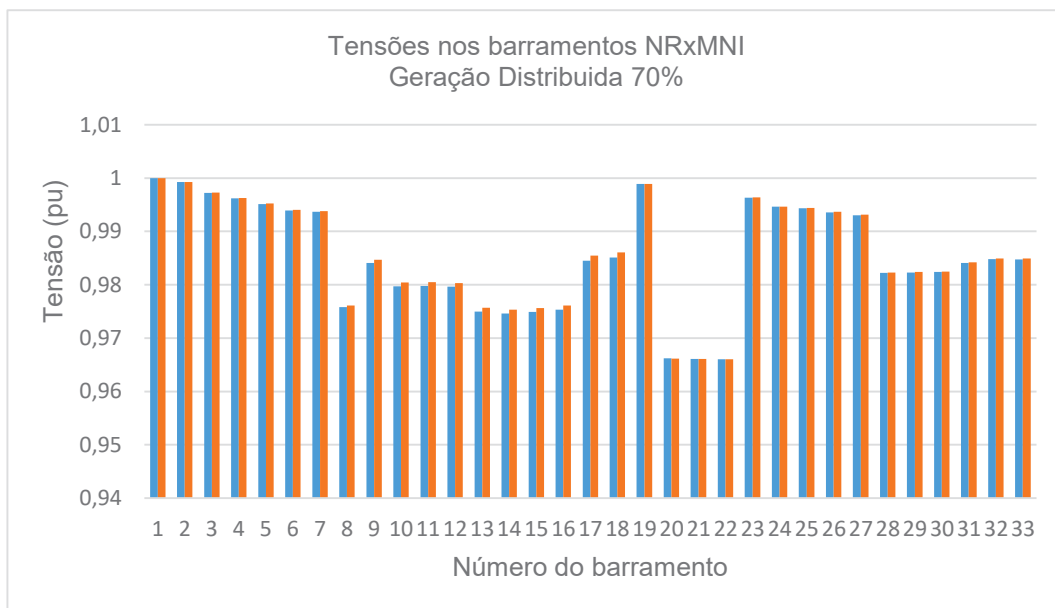
QUADRO 15 - Valores de geração em 70%

Barra	PG (pu)
3	1,7
6	3,0
9	1,3
11	0,8
13	0,5
18	1,2
32	2,5

Fonte: O Autor (2023).

A FIGURA 16 apresenta a representação gráfica das magnitudes de tensão de barra obtidas com os dois métodos considerados neste trabalho, método de Newton-Raphson em azul e em laranja o método não-iterativo.

FIGURA 16 - Tensões de barra (Geração distribuída 70%) Cenário 1



Fonte: O Autor (2023).

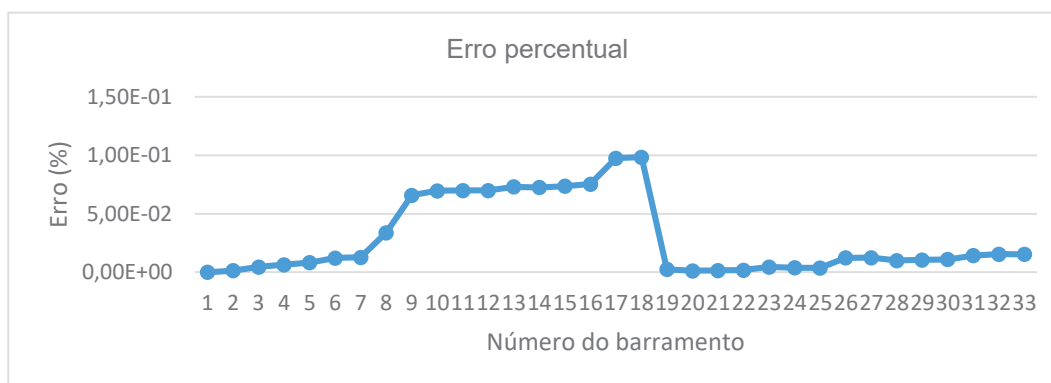
As FIGURAS 17 e 18 apresentam as representações gráficas das diferenças das magnitudes das tensões de barra em pu e em porcentagem obtidas com os dois métodos considerados neste trabalho.

FIGURA 17 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 1



Fonte: O Autor (2023).

FIGURA 18 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 1



Fonte: O Autor (2023).

4.3.2 CENÁRIO 2: Geração distribuída à 20%

Neste cenário, as barras geradoras estarão produzindo 20% de sua geração máxima. Nesse teste em questão simula-se um cenário de operação noturna. Pode-se ver as gerações consideradas conforme o QUADRO 16.

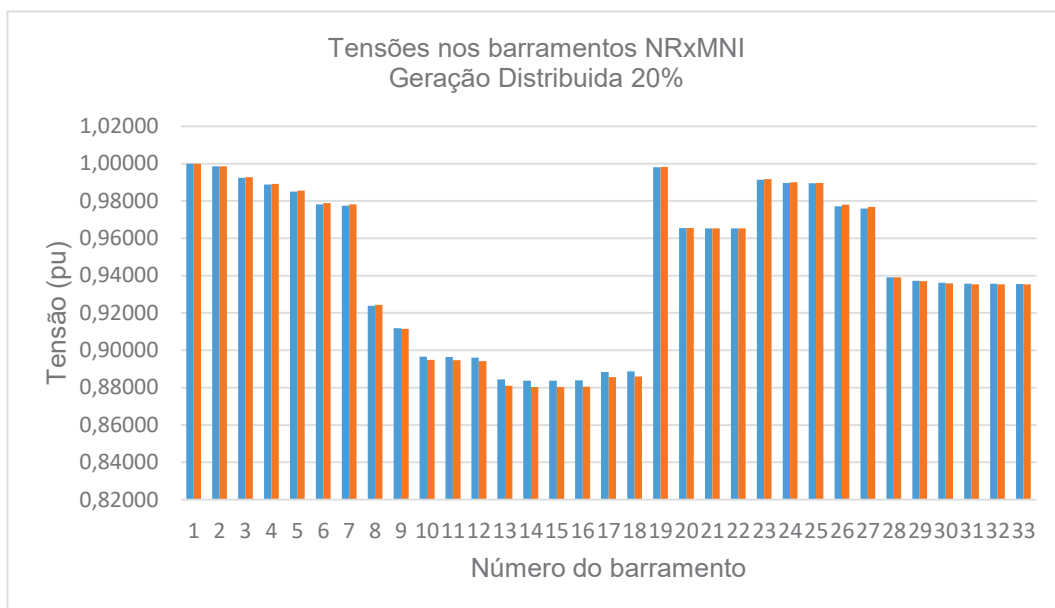
QUADRO 16 - Valores de geração em 20%

Barra	PG (pu)
3	0,34
6	0,6
9	0,36
11	0,3
13	0,5
18	0,8
32	0,24

Fonte: O Autor (2023).

Um gráfico mostrando as tensões em cada barra utilizando os dois algoritmos propostos na metodologia é apresentado, na FIGURA 19, método de Newton-Raphson em azul e em laranja o método não-iterativo.

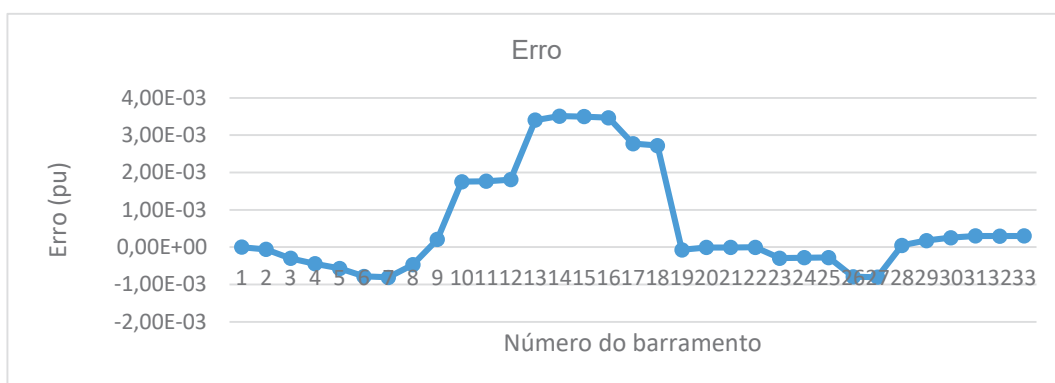
FIGURA 19 - Tensões de barra (Geração distribuída 20%) Cenário 2



Fonte: O Autor (2023).

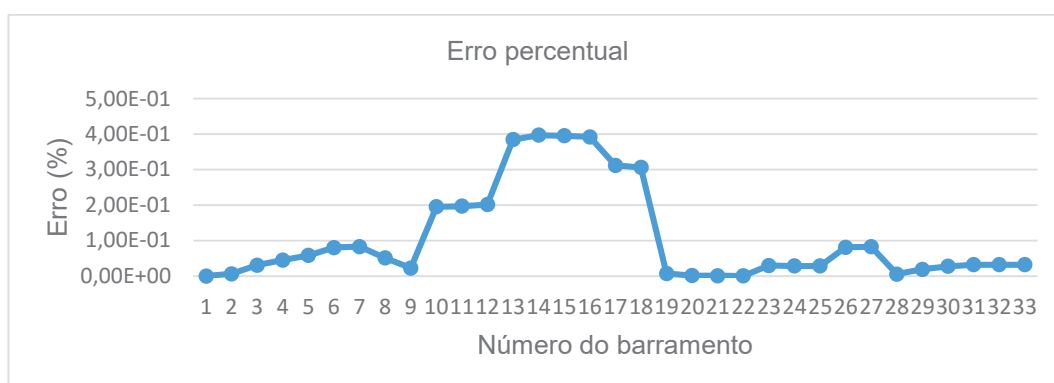
As FIGURAS 20 e 21 apresentam as representações gráficas das diferenças das magnitudes das tensões de barra em pu e em porcentagem obtidas com os dois métodos considerados neste trabalho.

FIGURA 20 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 2



Fonte: O Autor (2023).

FIGURA 21 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 2



Fonte: O Autor (2023).

4.3.3 CENÁRIO 3: Geração distribuída a 100% e Carga 70% acima

Neste cenário, são consideradas as barras geradoras produzindo 100% de sua potência máxima e a carga é aumentada igualmente em todas as barras em 70%. Essa configuração foi adotada para simular um cenário em um dia com bastante incidência de sol em conjunto com um significativo aumento no carregamento do sistema. As gerações correspondentes podem ser visualizadas no QUADRO 17.

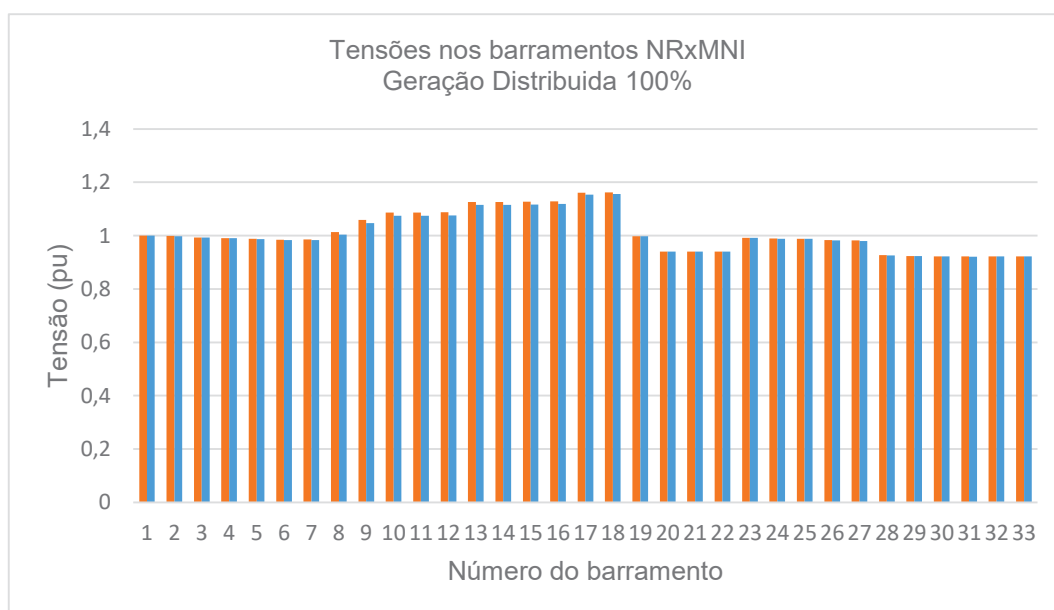
QUADRO 17 - Valores de geração em 100%

Barra	PG (pu)
3	1,7
6	3
9	1,8
11	1,5
13	2,5
18	4
32	1,2

Fonte: O Autor (2023).

Um gráfico mostrando as tensões em cada barra utilizando os dois algoritmos propostos na metodologia é apresentado, na FIGURA 22, método de Newton-Raphson em azul e em laranja o método não-iterativo.

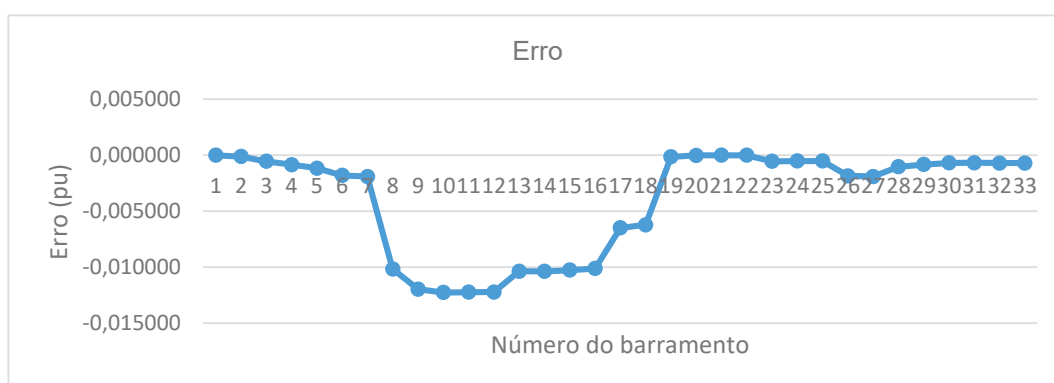
FIGURA 22 - Tensões de barra (Geração distribuída 100%) Cenário 3



Fonte: O Autor (2023).

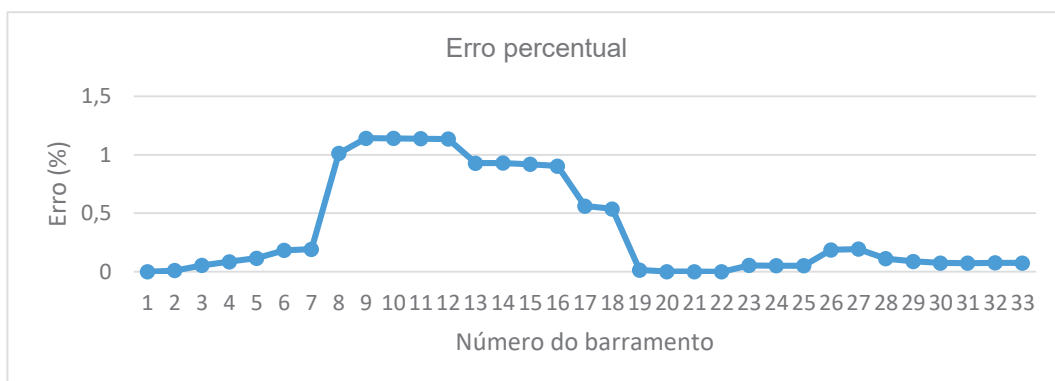
As FIGURAS 23 e 24 apresentam as representações gráficas das diferenças das magnitudes das tensões de barra em pu e em porcentagem obtidas com os dois métodos considerados neste trabalho.

FIGURA 23 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 3



Fonte: O Autor (2023).

FIGURA 24 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 3

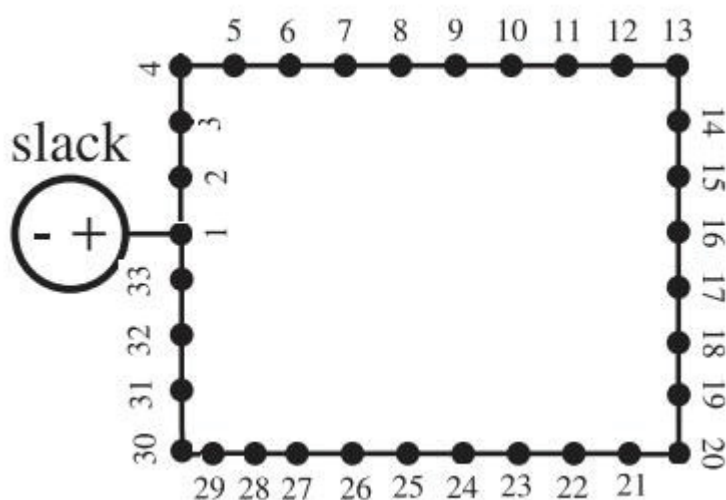


Fonte: O Autor (2023).

4.4 SIMULAÇÃO 2: SISTEMA 33 BARRAS ANEL – MICRORREDE EM CORRENTE CONTÍNUA

Para simulação 2, foi modificado o sistema elaborado por Montoya, O.D., Gil-González, W., & Garces, A. (2020), cuja topologia é radial, e transformado em anel. Como pode ser visto na FIGURA 25. Seus dados de barra serão apresentados no Apêndice 3, e os dados de linha se encontram no Apêndice 4.

FIGURA 25 - Microrrede de corrente contínua 33 barras - Anel



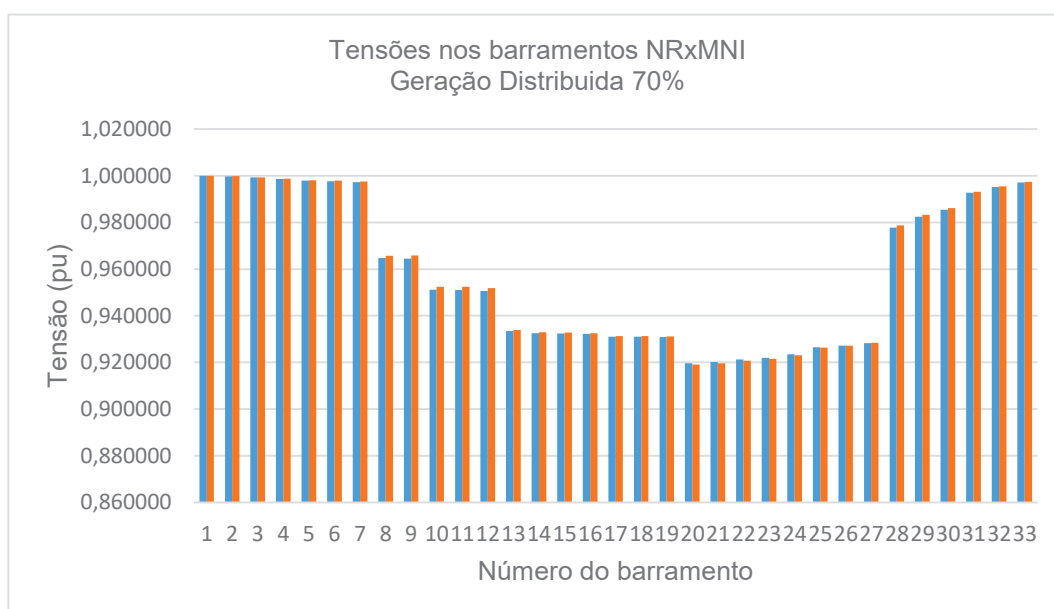
Fonte: O Autor (2023).

4.4.1 CENÁRIO 1: Geração distribuída à 70%

Todos os cenários simulados na Simulação 2, repetem os mesmos procedimentos da Simulação 1. Isso é feito para que os algoritmos sejam testados em diferentes topologias. As condições das gerações podem ser vistas no QUADRO 15 anteriormente apresentada.

A FIGURA 26 apresenta a representação gráfica das magnitudes de tensão de barra obtidas com os dois métodos considerados neste trabalho, método de Newton-Raphson em azul e em laranja o método não-iterativo.

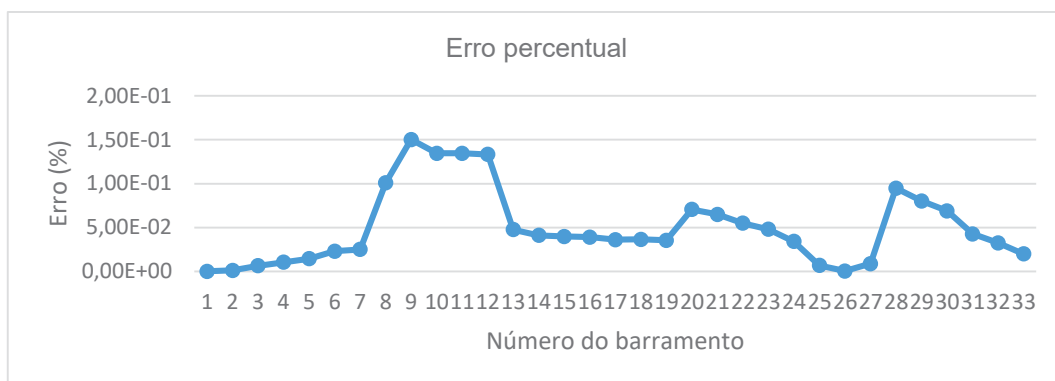
FIGURA 26 - Tensões de barra (Geração distribuída 70%) Cenário 1



Fonte: O Autor (2023).

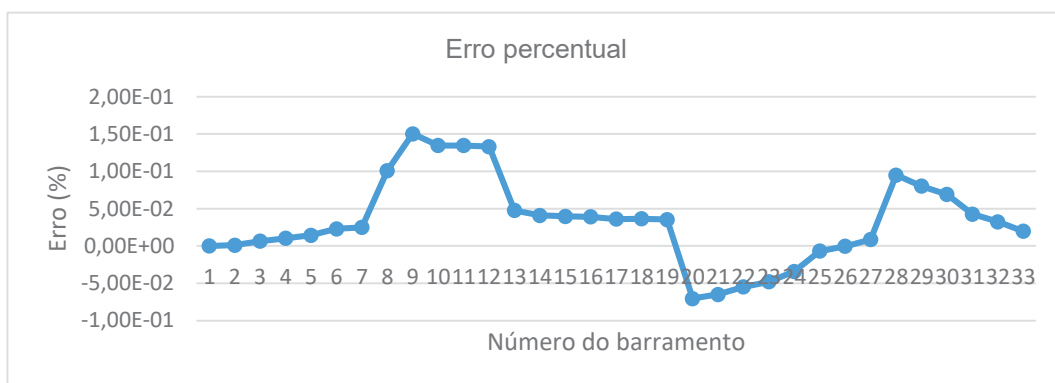
As FIGURAS 27 e 28 apresentam as representações gráficas das diferenças das magnitudes das tensões de barra em pu e em porcentagem obtidas com os dois métodos considerados neste trabalho.

FIGURA 27 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 1



Fonte: O Autor (2023).

FIGURA 28 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 1



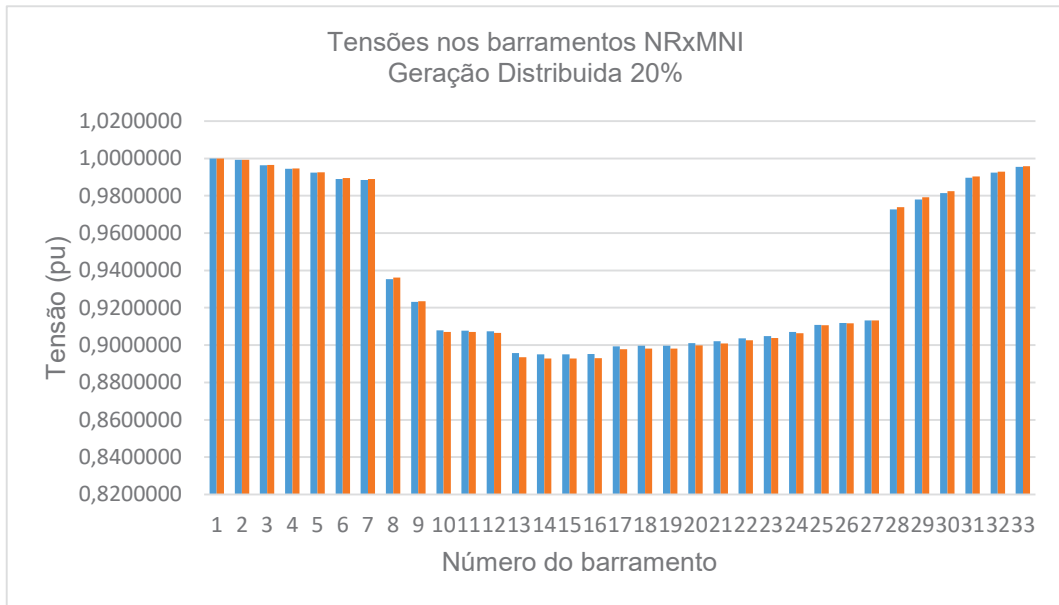
Fonte: O Autor (2023).

4.4.2 CENÁRIO 2: Geração Distribuída à 20%

As condições das gerações podem ser consultadas no QUADRO 16 apresentada anteriormente.

Um gráfico mostrando as tensões em cada barra utilizando os dois algoritmos propostos na metodologia é apresentado, na FIGURA 29, método de Newton-Raphson em azul e em laranja o método não-iterativo.

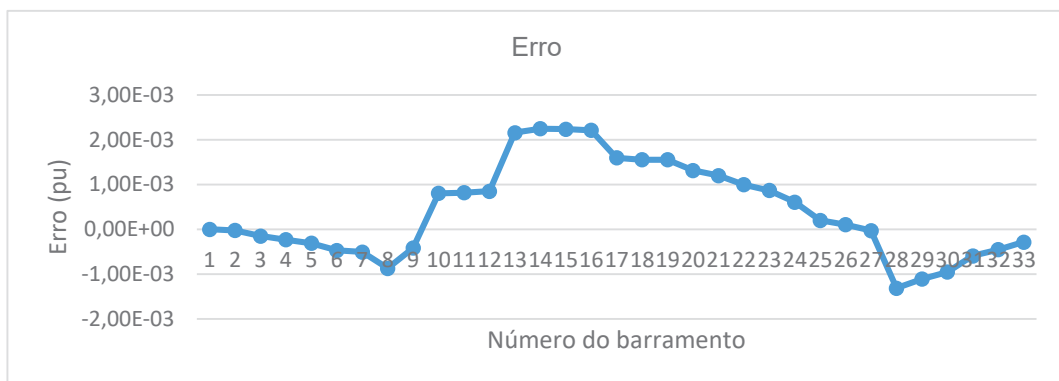
FIGURA 29 - Tensões de barra (Geração distribuída 20%) Cenário 2



Fonte: O Autor (2023).

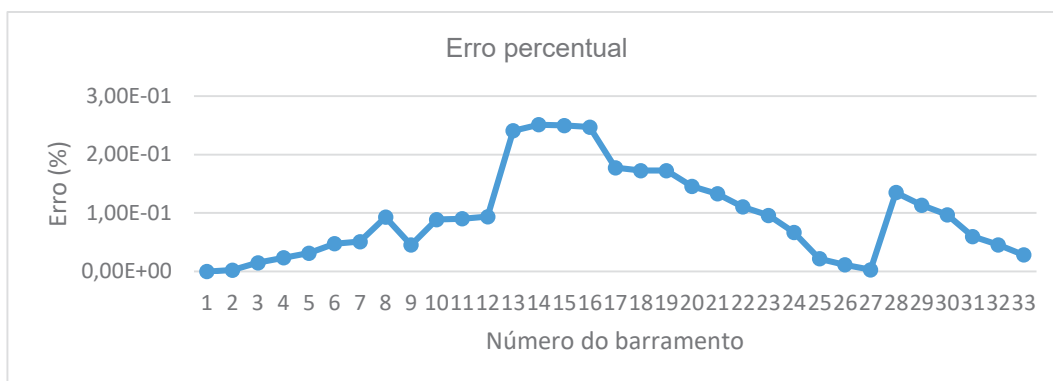
As FIGURAS 30 e 31 apresentam as representações gráficas das diferenças das magnitudes das tensões de barra em pu e em porcentagem obtidas com os dois métodos considerados neste trabalho.

FIGURA 30 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 2



Fonte: O Autor (2023).

FIGURA 31 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 2



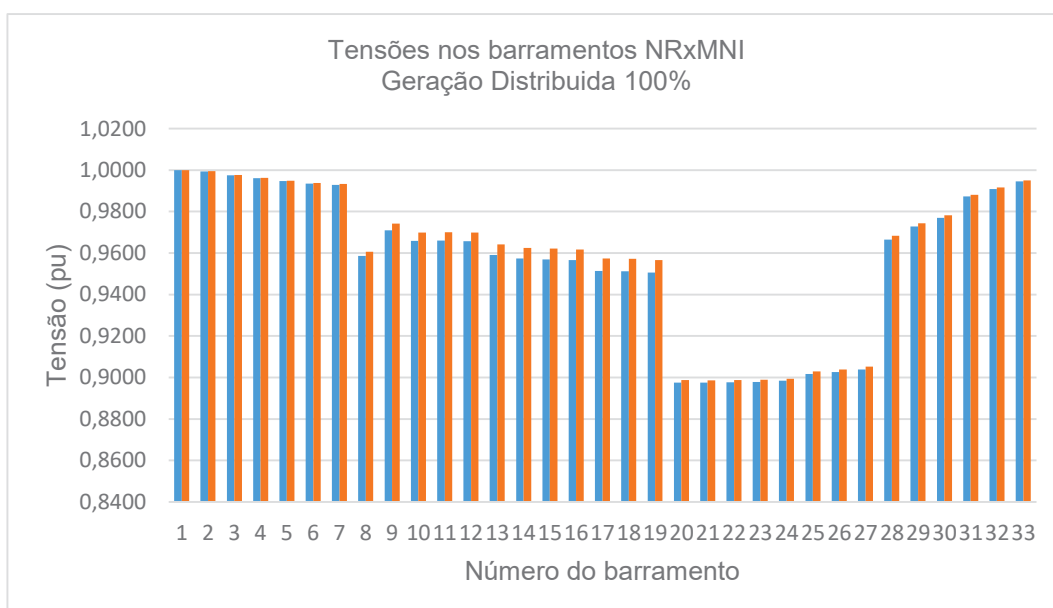
Fonte: O Autor (2023).

4.4.3 CENÁRIO 3: Geração distribuída a 100% e Carga 70% acima

As condições das gerações podem ser encontradas no QUADRO 17, que foi apresentada anteriormente.

A FIGURA 32 apresenta a representação gráfica das magnitudes de tensão de barra obtidas com os dois métodos considerados neste trabalho, método de Newton-Raphson em azul e em laranja o método não-iterativo.

FIGURA 32 - Tensões de barra (Geração distribuída 100%) Cenário 3



Fonte: O Autor (2023).

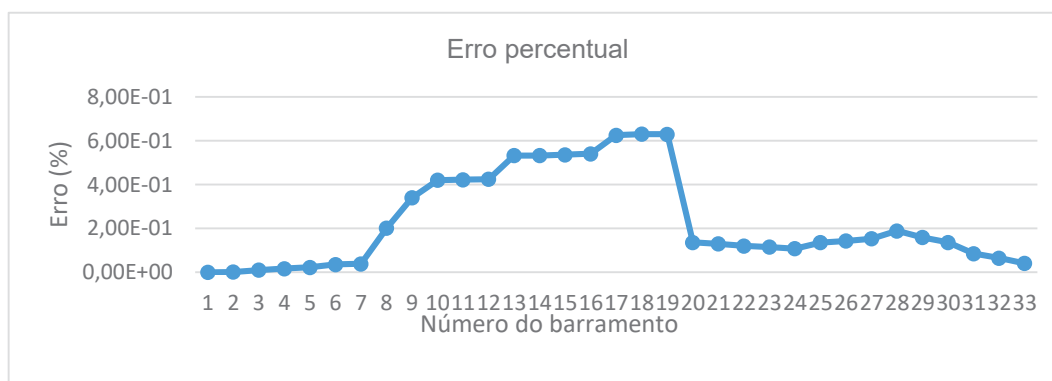
As FIGURAS 33 e 34 apresentam as representações gráficas das diferenças das magnitudes das tensões de barra em pu e em porcentagem obtidas com os dois métodos considerados neste trabalho.

FIGURA 33 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 3



Fonte: O Autor (2023).

FIGURA 34 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 3



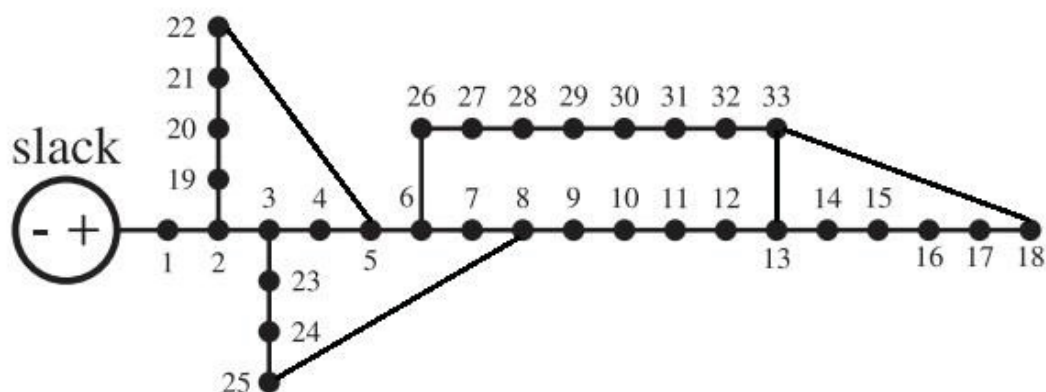
Fonte: O Autor (2023).

4.5 SIMULAÇÃO 3: SISTEMA 33 BARRAS MALHA – MICRORREDE EM CORRENTE CONTÍNUA

No caso da simulação 3, houve uma modificação no sistema desenvolvido por Montoya, O.D., Gil-González, W. e Garces, A. (2020), que originalmente possuía uma topologia radial, sendo transformado em uma topologia em formato de malha.

Essa modificação pode ser visualizada na FIGURA 35. Os detalhes das barras do sistema podem ser encontrados no Apêndice 5, enquanto os dados das linhas estão disponíveis no Apêndice 6.

FIGURA 35 - Microrrede de corrente contínua 33 barras - Malha



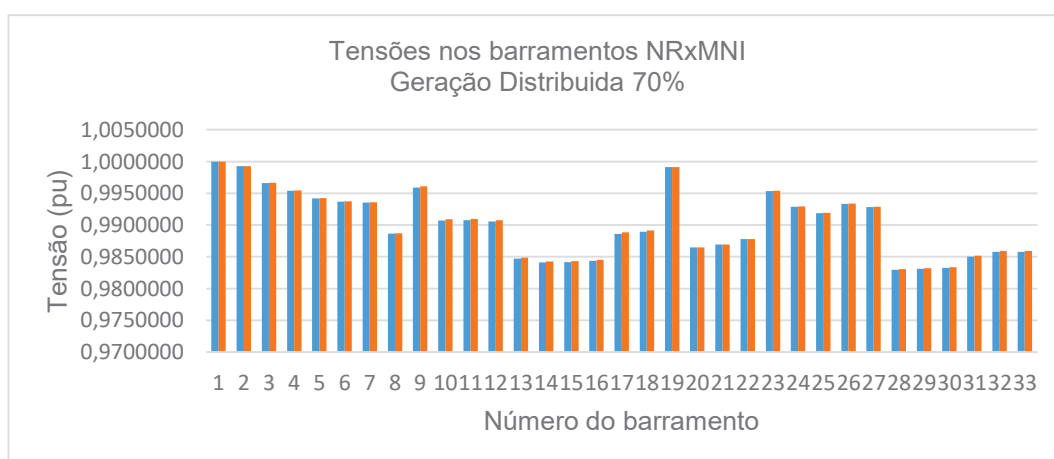
Fonte: O Autor (2023).

4.5.1 CENÁRIO 1: Geração distribuída à 70%

Todos os cenários simulados na Simulação 3 seguirão os mesmos procedimentos da Simulação 1 e 2. Essa abordagem é adotada para testar os algoritmos em diferentes topologias. As condições das gerações podem ser encontradas no QUADRO 15, apresentada anteriormente.

Um gráfico mostrando as tensões em cada barra utilizando os dois algoritmos propostos na metodologia é apresentado, na FIGURA 36, método de Newton-Raphson em azul e em laranja o método não-iterativo.

FIGURA 36 - Tensões de barra (Geração distribuída 70%) Cenário 1



Fonte: O Autor (2023).

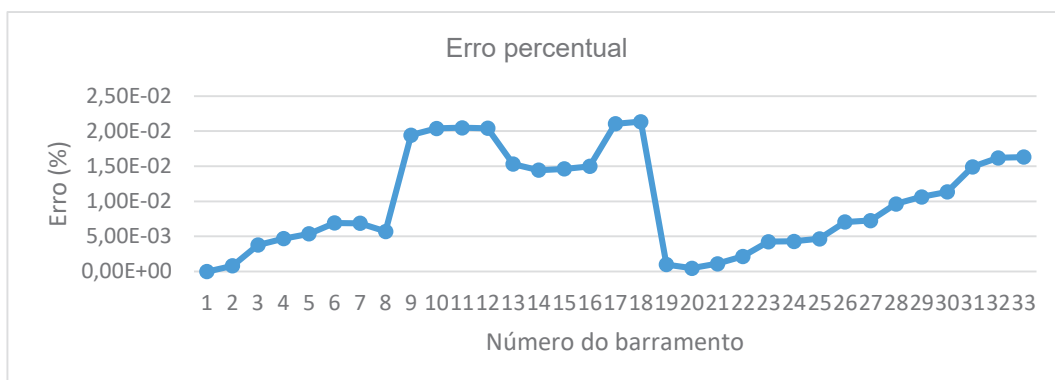
As FIGURAS 37 e 38 apresentam as representações gráficas das diferenças das magnitudes das tensões de barra em pu e em porcentagem obtidas com os dois métodos considerados neste trabalho.

FIGURA 37 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 1



Fonte: Autor (2023).

FIGURA 38 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 1



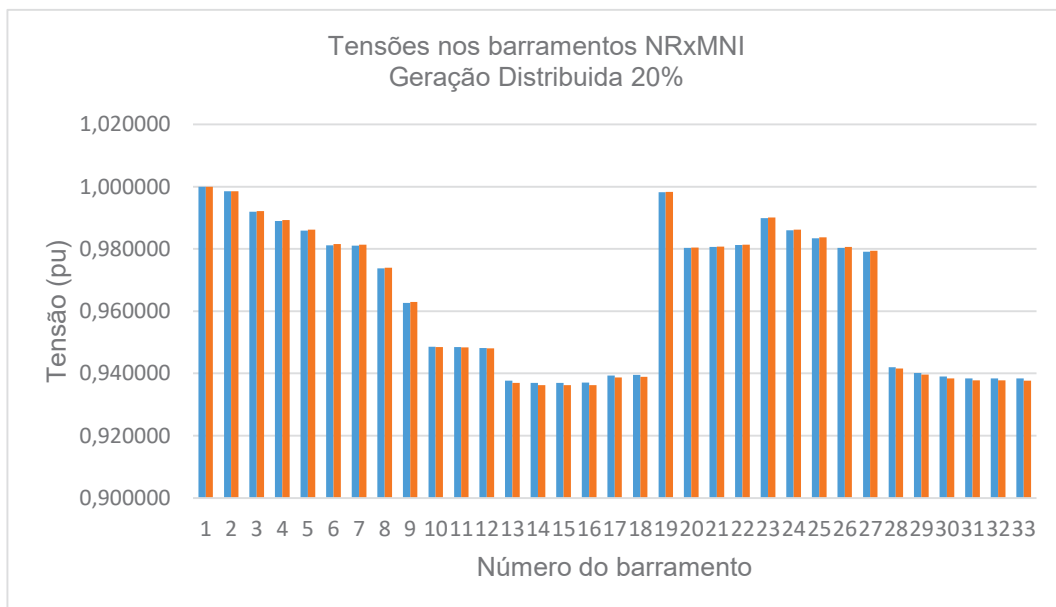
Fonte: Autor (2023).

4.5.2 CENÁRIO 2: Geração Distribuída em 20%

As condições das gerações podem ser encontradas no QUADRO 16, apresentada anteriormente.

A FIGURA 39 apresenta a representação gráfica das magnitudes de tensão de barra obtidas com os dois métodos considerados neste trabalho, método de Newton-Raphson em azul e em laranja o método não-iterativo.

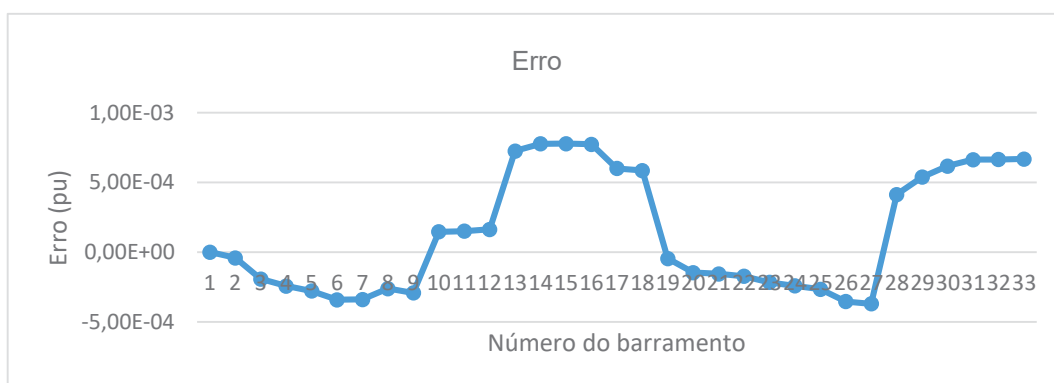
FIGURA 39 - Tensões de barra (Geração distribuída 20%) Cenário 2



Fonte: O Autor (2023).

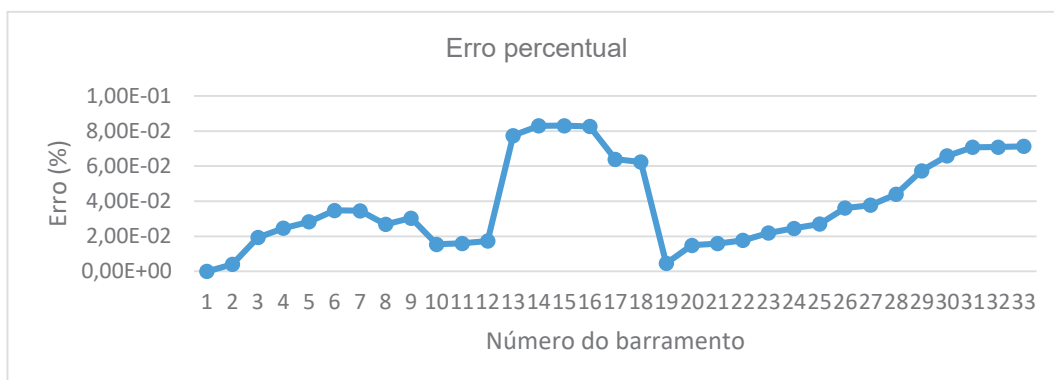
As FIGURAS 40 e 41 apresentam as representações gráficas das diferenças das magnitudes das tensões de barra em pu e em porcentagem obtidas com os dois métodos considerados neste trabalho.

FIGURA 40 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 2



Fonte: O Autor (2023).

FIGURA 41 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 2



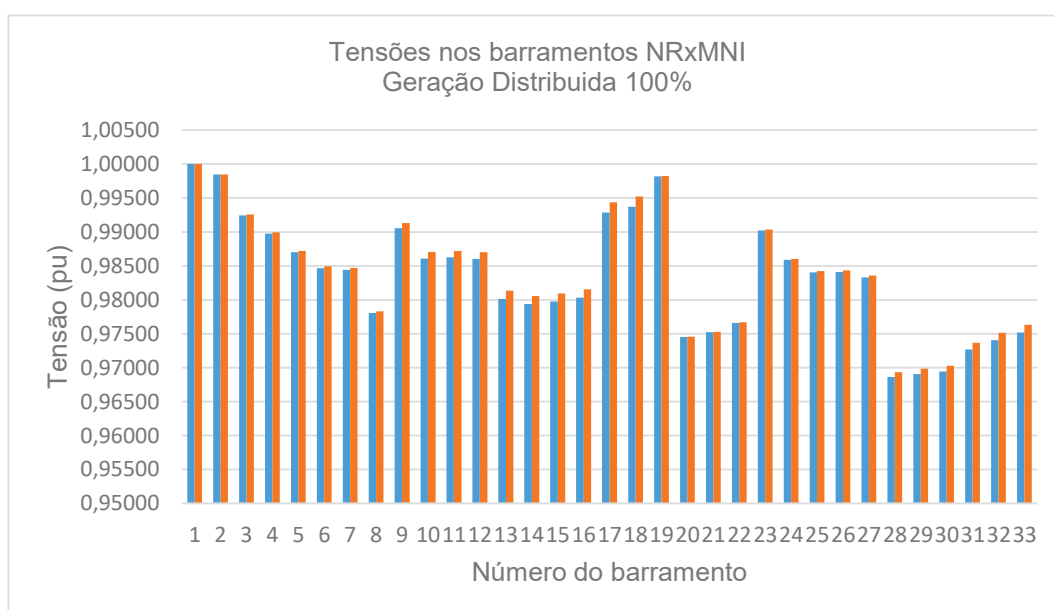
Fonte: O Autor (2023).

4.5.3 CENÁRIO 3: Geração distribuída a 100% e Carga 70% acima

As informações sobre as condições de geração podem ser encontradas no QUADRO 17, apresentada anteriormente.

Um gráfico mostrando as tensões em cada barra utilizando os dois algoritmos propostos na metodologia é apresentado, na FIGURA 42, método de Newton-Raphson em azul e em laranja o método não-iterativo.

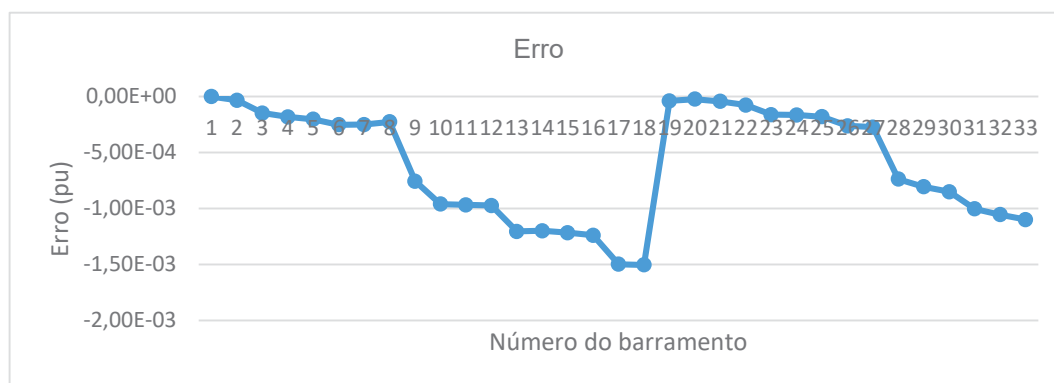
FIGURA 42 - Tensões de barra (Geração distribuída 100%) Cenário 3



Fonte: O Autor (2023).

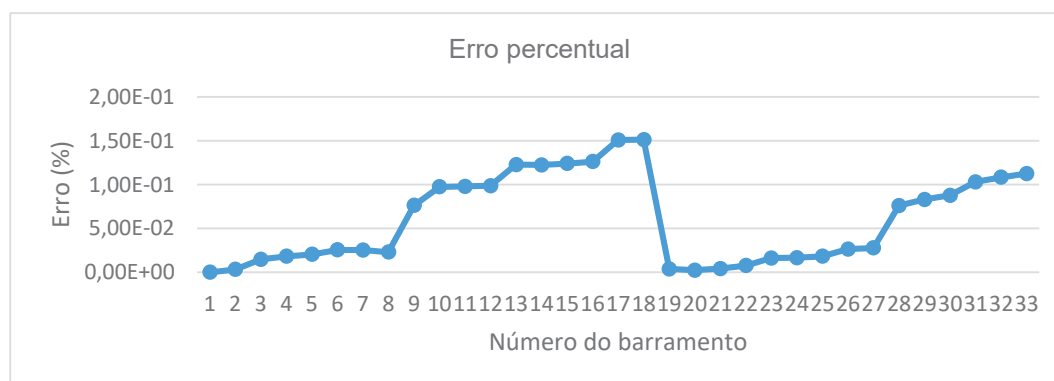
As FIGURAS 43 e 44 apresentam as representações gráficas das diferenças das magnitudes das tensões de barra em pu e em porcentagem obtidas com os dois métodos considerados neste trabalho.

FIGURA 43 - Erro entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 3



Fonte: O Autor (2023).

FIGURA 44 - Erro percentual entre o algoritmo MNI em relação ao NR cenário 3



Fonte: O Autor (2023).

4.6 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Após a conclusão das simulações, foram realizadas análises detalhadas dos resultados obtidos. Essas análises visaram avaliar o desempenho dos algoritmos propostos na metodologia e entender as diferenças entre eles.

Foram criados quadros para cada tipo de topologia simulada, e para cada cenário estudado.

Esses quadros contém a tensão máxima (pu) e a tensão mínima (pu) obtidas pelos barramentos utilizando o método de Newton-Raphson, excluindo o barramento de referência, junto com as perdas totais do sistema (pu).

Também foi incluído o número de iterações que o algoritmo utilizando o método de Newton-Raphson precisou para convergir, considerando uma tolerância de 10^{-6} . Além disso, são apresentados os erros máximo (%), mínimo (%) e médio (%) em relação aos valores das tensões de barra obtidos com o método não-iterativo em comparação aos obtidos com o método Newton-Raphson.

Destaca-se que apenas em cenários mais extremos onde há uma alta variação das tensões nos barramentos, como visto na simulação com o sistema operando com topologia radial, o algoritmo do método não-iterativo teve uma performance pior em comparação ao método de Newton-Raphson, mas mesmo assim com erro máximo um pouco acima de 1%. Já nos demais cenários o erro máximo ficou bem abaixo de 1%.

Os resultados obtidos podem ser vistos nos QUADROS 18, 19 e 20, a seguir:

QUADRO 18 - Resultados: Simulação 1 – Radial

		Radial		
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
NR	Tensão Máxima (pu)	0,999258	0,998485	1,156133
	Tensão Mínima (pu)	0,966033	0,883732	0,921485
	Perdas totais do sistema (pu)	0,1531	0,6721	1,1963
	Quantidade de iterações para convergir	6	8	10
Erro entre MNI e NR	Máximo (%)	0,0983	0,3971	1,1417
	Mínimo (%)	0,0012	0,0004	0,0004
	Médio (%)	0,0302	0,1114	0,3764

Fonte: O Autor (2023).

QUADRO 19 - Resultados: Simulação 2 – Anel

		Anel		
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
NR	Tensão Máxima (pu)	0,999751	0,999291	0,999386
	Tensão Mínima (pu)	0,919683	0,895033	0,897462
	Perdas totais do sistema (pu)	0,5141	0,8703	1,0374
	Quantidade de iterações para convergir	7	8	9
Erro entre MNI e NR	Máximo (%)	0,1502	0,2510	0,6304
	Mínimo (%)	0,0003	0,0025	0,0017
	Médio (%)	0,0511	0,0988	0,2400

Fonte: O Autor (2023).

QUADRO 20 - Resultados: Simulação 3 – Malha

		Malha		
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
NR	Tensão Máxima (pu)	0,999263	0,998504	0,998450
	Tensão Mínima (pu)	0,982951	0,936973	0,968623
	Perdas totais do sistema (pu)	0,0943	0,4616	0,3838
	Quantidade de iterações para convergir	5	7	6
Erro entre MNI e NR	Máximo (%)	0,0005	0,0831	0,1512
	Mínimo (%)	0,0214	0,0041	0,0023
	Médio (%)	0,0102	0,0401	0,0623

Fonte: O Autor (2023).

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS QUANTO AOS RESULTADOS

Neste capítulo foram apresentadas as simulações e testes realizados com dois sistemas testes em diferentes configurações operativas empregando os dois métodos considerados neste trabalho, quais sejam, o método de Newton-Raphson e o método não-iterativo proposto.

Durante os testes comparativos, foi observado que as diferenças entre os resultados obtidos pelos dois métodos foram baixas. O erro percentual entre as soluções das tensões das barras calculadas pelos dois métodos foi bastante satisfatória, confirmando a validade e a robustez de ambos os algoritmos.

O método de Newton-Raphson, mostrou-se confiável e preciso, mas exigiu um maior número de iterações para convergir em alguns casos, especialmente em cenários mais complexos. No entanto, o método não-iterativo, baseado na simplificação de Taylor e na extração das raízes de um problema de grau 2, se destacou por sua abordagem não iterativa para obter as soluções.

5 CONCLUSÃO

Nesta dissertação, foi realizado um estudo abrangente sobre as microrredes em corrente contínua e seu potencial de aplicação em sistemas elétricos. Inicialmente, foram apresentados os antecedentes históricos do uso da corrente contínua e a comparação entre os sistemas em corrente contínua e em corrente alternada. Além disso, foram discutidas as vantagens e desvantagens das MRS em CC, destacando-se seu papel no contexto das redes de energia distribuída.

A revisão bibliográfica abordou as definições de microrredes e diversas topologias das MRS em CC, como o barramento único, radial, anel e malha, e foi realizada uma comparação entre essas topologias. Também foram explorados o fluxo de potência em sistemas de corrente contínua e o problema associado a esse fluxo, com a formulação detalhada do problema de fluxo de potência em redes CC.

A metodologia adotada neste trabalho consistiu na solução do problema de fluxo de potência por meio do método de Newton-Raphson para sistemas em corrente contínua. Além disso, um método não-iterativo foi proposto e formulado. Foi apresentado um algoritmo para o cálculo do fluxo de potência em corrente contínua, com a descrição dos dados de entrada e de saída, bem como os resultados obtidos pelo algoritmo de Newton-Raphson e pelo método não-iterativo.

Com relação aos resultados obtidos destaca-se que tanto o método de Newton-Raphson quanto o método não-iterativo proposto se mostraram eficientes e confiáveis na análise de fluxo de potência em microrredes de corrente contínua. Ambos os métodos foram submetidos a uma série de testes e demonstraram um desempenho excepcional, fornecendo resultados consistentes.

Os resultados obtidos nesta pesquisa corroboram a eficácia e a utilidade do método não-iterativo como uma alternativa viável ao método de Newton-Raphson. Além disso, a implementação bem-sucedida do método não-iterativo em diferentes topologias e estados de um sistema de energia elétrica demonstrou sua capacidade de lidar com diversas situações práticas.

Portanto, conclui-se que tanto o método de Newton-Raphson quanto o método não-iterativo são opções válidas e confiáveis para a análise de fluxo de potência em microrredes de corrente contínua. A escolha entre eles dependerá das características específicas do sistema em estudo, levando em consideração fatores como tempo de processamento e complexidade da rede elétrica. Ambos os métodos têm o potencial de contribuir significativamente para o avanço das técnicas de análise e planejamento de sistemas de energia elétrica

5.1 TRABALHOS FUTUROS

A metodologia proposta neste trabalho pode ter diversas aplicações e contribuir para diferentes áreas de estudo do sistema de potência em corrente contínua. Com base nos resultados obtidos, algumas sugestões para a continuidade e aprimoramento do método proposto são apresentadas a seguir:

1. Análise de sistemas de energia elétrica de maior escala: Aplicação dos métodos em redes de transmissão de alta tensão em corrente contínua para lidar com sistemas mais complexos e extensos.
2. Estudo de contingências e análise de segurança do sistema: Investigar a resposta do sistema elétrico a contingências e realizar estudos de análise de estabilidade e segurança do sistema.
3. Integração de métodos de otimização e inteligência artificial: Utilizar técnicas de otimização e inteligência artificial para melhorar a eficiência e precisão da análise de fluxo de potência.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Omar P.; HERNÁNDEZ, José H. T. **Power Flow Solution in Direct Current Power Systems**. IEEE, 2018.

GARCÉS, Alejandro; MONTOYA, Oscar-Danilo. **A Potential Function for the Power Flow in DC Microgrids: An Analysis of the Uniqueness and Existence of the Solution and Convergence of the Algorithms**. IEEE, 2019.

FRANCK, C. M. **HVDC Circuit Breakers: A Review Identifying Future Research Needs**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 2, abril 2011.

FOTOPOULOU, M. et al. **State of the Art of Low and Medium Voltage Direct Current (DC) Microgrids**. *Energies* 2021, 14, 5595.

MONTOYA, O. D. et al. **Numerical methods for power flow analysis in DC networks: State of the art, methods and challenges**. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 123, 106299, 2020. ISSN 0142-0615.

KIM, Chan-Ki et al. **HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems**. 1. ed. Wiley-IEEE Press, 2009. ISBN 978-0-470-82295-1.

ALASSIA, A. et al. **HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook**. 2019.

MUNIAPPAN, M. **A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems**. *Prot Control Mod Power Syst* 6, 1, 2021.

EUROPEAN COMMISSION. STATE OF THE UNION 2020. Brussels, Belgium: European Commission, 2020.

ENERGIEWENDE, A., 2019. **European Energy Transition 2030: The Big Picture IMPULSE, German Hydrogen and Fuel-Cell Association**. Germany. Retrieved from <https://policycommons.net/artifacts/1621284/european-energy-transition-2030/2311211/> on 15 Jun 2023. CID: 20.500.12592/67b126.

AL SHAQSI, A. Z.; SOPIAN, K.; AL-HINAI, A. **Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits**. *Energy Reports*, v. 6, Supl. 7, p. 288-306, 2020. ISSN 2352-4847.

YANG, Y.; BREMNER, S.; MENICTAS, C.; KAY, M. **Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 91, p. 109-125, 2018.

ELSAYED, A. T.; MOHAMED, A. A.; MOHAMMED, O. A. **DC microgrids and distribution systems: An overview.** *Electric Power Systems Research*, v. 119, p. 407-417, 2015.

PLOUMPIDOU, E. **Supporting the transition to DC microgrids in the built environment Eindhoven.** Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2017.

RTE. **PE Interface to AC Grid: Grid Forming Control for a More Resilient Transmission Grid, and a Flexible DC Connection of Grid Customers.** Paris, France: RTE, 2020.

ULLAH, S.; HAIDAR, A. M. A.; HOOLE, P.; ZEN, H.; AHFOCK, T. **The Current State of Distributed Renewable Generation, Challenges of Interconnection and Opportunities for Energy Conversion based DC Microgrids.** *Journal of Cleaner Production*, 122777, 2020.

KUMAR, D.; ZARE, F.; GHOSH, A. **DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks,** Applications, and Standardizations Aspects. *IEEE Access*, v. 5, pp. 12230-12256, 2017.

CHANDRA, Ankan; SINGH, G. K.; PANT, Vinay. **Protection techniques for DC microgrid - A review.** *Electric Power Systems Research*, v. 187, p. 106439, 2020. ISSN 0378-7796.

HATAHET, Walid; MAREI, Mostafa I.; MOKHTAR, Mohamed. **Adaptive controllers for grid-connected DC microgrids.** *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 130, p. 106917, 2021. ISSN 0142-0615.

LIU, Ziwen; ZHAO, Jinqun; ZOU, Ziqiang. **Impedance modeling, dynamic analysis and damping enhancement for DC microgrid with multiple types of loads.** *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 122, p. 106183, 2020. ISSN 0142-0615.

SOUZA JR., Marcus E. T. et al. **O que são microrredes? – Conceitos, componentes e controle.** CEEL – Uberlândia, 2019. ISSN 2596-2221.

KASSAR, Lucas C. **Concepção de modelo de microrrede em corrente contínua com fontes renováveis alternativas.** Curitiba: UTFPR, 2018.

AMBRÓSIO, Bryan A. S. **Método não-iterativo para determinação das tensões nodais em sistemas de distribuição ativos.** Curitiba: UFPR, 2018

APÊNDICE 1 – MICRORREDE CC 33 BARRAS – RADIAL – DADOS DE BARRA

Barra	Tipo	Vesp (pu)	PG (pu)	PD (pu)
1	1	1	0	0
2	2	1	0	1,7
3	2	1	1,7	0,9
4	2	1	0	0,1
5	2	1	0	1,3
6	2	1	3	1
7	2	1	0	0,5
8	2	1	0	1,8
9	2	1	1,3	0,1
10	2	1	0	0,7
11	2	1	0,8	0,1
12	2	1	0	0,1
13	2	1	0,5	0,1
14	2	1	0	1,2
15	2	1	0	0,1
16	2	1	0	0,1
17	2	1	0	0,1
18	2	1	1,2	0,4
19	2	1	0	0,1
20	2	1	0	1,9
21	2	1	0	0,1
22	2	1	0	0,1
23	2	1	0	0,1
24	2	1	0	1,6
25	2	1	0	0,3
26	2	1	0	0,1
27	2	1	0	0,8
28	2	1	0	1,1
29	2	1	0	0,1
30	2	1	0	1,5
31	2	1	0	0,6
32	2	1	2,5	0,1
33	2	1	0	0,1

APÊNDICE 2 – MICRORREDE CC 33 BARRAS – RADIAL – DADOS DE LINHA

De	Para	R (pu)
1	2	0,0000922
2	3	0,000493
3	4	0,000366
4	5	0,0003811
5	6	0,000819
6	7	0,0001872
7	8	0,017114
8	9	0,0103
9	10	0,0104
10	11	0,0001966
11	12	0,0003744
12	13	0,01468
13	14	0,0005416
14	15	0,000591
15	16	0,0007463
16	17	0,01289
17	18	0,000732
2	19	0,000164
19	20	0,015042
20	21	0,0004095
21	22	0,0007089
3	23	0,0004512
23	24	0,000898
24	25	0,00089
6	26	0,000203
26	27	0,0002842
27	28	0,01059
28	29	0,0008042
29	30	0,0005075
30	31	0,0009744
31	32	0,0003105
32	33	0,000341

APÊNDICE 3 – MICRORREDE CC 33 BARRAS – ANEL – DADOS DE BARRA

Barra	Tipo	Vesp (pu)	PG (pu)	PD (pu)
1	1	1	0	0
2	2	1	0	1,7
3	2	1	1,7	0,9
4	2	1	0	0,1
5	2	1	0	1,3
6	2	1	3	1
7	2	1	0	0,5
8	2	1	0	1,8
9	2	1	1,3	0,1
10	2	1	0	0,7
11	2	1	0,8	0,1
12	2	1	0	0,1
13	2	1	0,5	0,1
14	2	1	0	1,2
15	2	1	0	0,1
16	2	1	0	0,1
17	2	1	0	0,1
18	2	1	1,2	0,4
19	2	1	0	0,1
20	2	1	0	1,9
21	2	1	0	0,1
22	2	1	0	0,1
23	2	1	0	0,1
24	2	1	0	1,6
25	2	1	0	0,3
26	2	1	0	0,1
27	2	1	0	0,8
28	2	1	0	1,1
29	2	1	0	0,1
30	2	1	0	1,5
31	2	1	0	0,6
32	2	1	2,5	0,1
33	2	1	0	0,1

APÊNDICE 4 – MICRORREDE CC 33 BARRAS – ANEL – DADOS DE LINHA

De	Para	R (pu)
1	2	0,0000922
2	3	0,000493
3	4	0,000366
4	5	0,0003811
5	6	0,000819
6	7	0,0001872
7	8	0,017114
8	9	0,0103
9	10	0,0104
10	11	0,0001966
11	12	0,0003744
12	13	0,01468
13	14	0,0005416
14	15	0,000591
15	16	0,0007463
16	17	0,01289
17	18	0,000732
18	19	0,000164
19	20	0,015042
20	21	0,0004095
21	22	0,0007089
22	23	0,0004512
23	24	0,000898
24	25	0,00089
25	26	0,000203
26	27	0,0002842
27	28	0,01059
28	29	0,0008042
29	30	0,0005075
30	31	0,0009744
31	32	0,0003105
32	33	0,000341
33	1	0,0005075

APÊNDICE 5 – MICRORREDE CC 33 BARRAS – MALHA – DADOS DE BARRA

Barra	Tipo	Vesp (pu)	PG (pu)	PD (pu)
1	1	1	0	0
2	2	1	0	1,7
3	2	1	1,7	0,9
4	2	1	0	0,1
5	2	1	0	1,3
6	2	1	3	1
7	2	1	0	0,5
8	2	1	0	1,8
9	2	1	1,3	0,1
10	2	1	0	0,7
11	2	1	0,8	0,1
12	2	1	0	0,1
13	2	1	0,5	0,1
14	2	1	0	1,2
15	2	1	0	0,1
16	2	1	0	0,1
17	2	1	0	0,1
18	2	1	1,2	0,4
19	2	1	0	0,1
20	2	1	0	1,9
21	2	1	0	0,1
22	2	1	0	0,1
23	2	1	0	0,1
24	2	1	0	1,6
25	2	1	0	0,3
26	2	1	0	0,1
27	2	1	0	0,8
28	2	1	0	1,1
29	2	1	0	0,1
30	2	1	0	1,5
31	2	1	0	0,6
32	2	1	2,5	0,1
33	2	1	0	0,1

APÊNDICE 6 – MICRORREDE CC 33 BARRAS – MALHA – DADOS DE LINHA

De	Para	R (pu)
1	2	0,0000922
2	3	0,000493
3	4	0,000366
4	5	0,0003811
5	6	0,000819
6	7	0,0001872
7	8	0,017114
8	9	0,0103
9	10	0,0104
10	11	0,0001966
11	12	0,0003744
12	13	0,01468
13	14	0,0005416
14	15	0,000591
15	16	0,0007463
16	17	0,01289
17	18	0,000732
2	19	0,000164
19	20	0,015042
20	21	0,0004095
21	22	0,0007089
3	23	0,0004512
23	24	0,000898
24	25	0,00089
6	26	0,000203
26	27	0,0002842
27	28	0,01059
28	29	0,0008042
29	30	0,0005075
30	31	0,0009744
31	32	0,0003105
32	33	0,000341
22	5	0,00498
25	8	0,00389
33	13	0,00375
33	18	0,00842