

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VINÍCIUS ARENHART SALVON

ANÁLISE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA EM CORRENTE CONTÍNUA

CURITIBA

2019

VINÍCIUS ARENHART SALVON

ANÁLISE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA EM CORRENTE CONTÍNUA

Monografia apresentada à disciplina
TE104 - Projeto de Graduação como
requisito parcial à conclusão do Curso de
Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia,
da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Odilon Luis Tortelli

CURITIBA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

VINÍCIUS ARENHART SALVON

ANÁLISE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA EM CORRENTE CONTÍNUA

Monografia apresentada à disciplina TE105 - Projeto de Graduação como requisito parcial à conclusão do Curso de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Prof. Dr. Odilon Luis Tortelli
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof. Dr. João Américo Vilela Jr.
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Dr. Luiz Schuartz
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Curitiba, 05 de dezembro de 2019.

RESUMO

Este trabalho tem como proposta a análise do comportamento de sistemas de potência em corrente contínua. Hoje em dia, existe uma forte tendência de aumentar a participação deste tipo de rede em sistemas elétricos, devido às vantagens que a corrente contínua apresenta em relação à corrente alternada no tocante à qualidade de energia e eficiência, além do aumento da utilização deste tipo de corrente nas cargas e na geração. A abordagem da análise teve como foco o estudo do fluxo de potência nestas redes, e para tanto, desenvolveu-se um método computacional na plataforma Octave capaz de retornar as variáveis de interesse para um determinado estado de um sistema em corrente contínua. A partir de casos conhecidos, validou-se o funcionamento do algoritmo e avaliou-se o comportamento destas redes a partir de diferentes cenários, permitindo identificar possíveis problemas existentes nestas redes e verificar o comportamento de possíveis soluções através de testes.

Palavras-chave: Fluxo de Potência. Corrente Contínua. Sistemas de Potência

SUMÁRIO

1	Introdução	6
1.1	Contextualização	6
1.2	Justificativa	12
1.3	Objetivos	13
1.4	Estrutura do Trabalho	14
2	Referencial Teórico	15
2.1	Fluxo de Potência Tradicional em Sistemas Elétricos de Corrente Contínua	15
2.2	Inclusão do Controle Droop no Cálculo de Fluxo de Potência em Sistemas Elétricos de Corrente Contínua	20
3	Metodologia	23
3.1	Solução do Problema Fluxo de Potência em Corrente Contínua pelo Método de Newton-Raphson	23
3.2	Algoritmo de Cálculo de Fluxo de Potência em Corrente Contínua	25
4	Simulações e Resultados	34
4.1	Teste 1: Caso de Estudo de 5 Barras	34
4.2	Teste 2: Caso de Estudo de 4 Barras	38
4.3	Teste 3: Sistema 45 Barras – Rede de Transmissão em Corrente Contínua	42
4.4	Teste 4: Sistema 48 Barras – Microgrid em Corrente Contínua	52
4.5	Discussão do Método (Algoritmo) Desenvolvido	69
5	Conclusão	71
6	Referências Bibliográficas	72
	Apêndice A – Sistema HVDC: Dados de Barra	73
	Apêndice B – Sistema HVDC: Dados de Linha	75
	Apêndice C – Microgrid DC: Dados de Barra	77
	Apêndice D – Microgrid DC: Dados de Linha	79

1 INTRODUÇÃO

Nesta primeira seção, serão tratados os aspectos iniciais do trabalho. Desta forma, será apresentada uma breve contextualização a respeito das redes em corrente contínua e a formulação do problema. Também serão apresentados a justificativa e os objetivos deste projeto de graduação.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A corrente contínua já foi utilizada em sistemas de potência de diferentes formas. Sendo assim, dividiremos esta seção em 3 partes:

- A primeira parte diz respeito ao histórico do uso de corrente contínua em sistemas de potência. Como já é conhecido, o primeiro sistema de potência foi em corrente contínua (concebido por Thomas Edison), o qual foi substituído pelo sistema em corrente alternada no evento conhecido como “guerra das correntes”.
- A segunda parte diz respeito aos sistemas em HVDC, tratando da transmissão de grandes quantidades de potência em corrente contínua.
- E por fim, a terceira parte diz respeito aos microgrids em corrente contínua, um conceito que se aproxima muito do que foi idealizado por Edison no século XIX, desta vez sustentado por avanços tecnológicos ocorridos nos séculos XX e XXI.

1.1.1 Histórico do Uso de Corrente Contínua em Sistemas de Potência

Nos primórdios da história da eletricidade, a energia elétrica era um recurso pouco acessível às pessoas, e com uso limitado. Sua aplicação era restrita aos usos mais pontuais, como sistemas de comunicação por telégrafo e alguns sistemas de iluminação em locais públicos com lâmpadas a arco. Tais sistemas não demandavam uma grande quantidade de energia, e poderiam ser supridas com pequenas fontes geradoras, como baterias.

Com o advento da lâmpada incandescente, Thomas Edison idealizou um sistema capaz de viabilizar a iluminação elétrica para o uso doméstico, o que até então era restrito a locais públicos devido aos problemas existentes com as lâmpadas a arco (como ruído, risco de incêndio e elevada potência luminosa). Para tanto, era necessário produzir uma quantidade maior de energia elétrica, de uma forma mais concentrada, para então ser levada às residências. Assim nascia o primeiro sistema elétrico de potência do mundo.

O sistema proposto por Edison utilizava uma pequena central geradora em Nova Iorque, que usava carvão como fonte primária. Nesta central geradora, um dínamo gerava corrente contínua, a qual era distribuída para os consumidores nas redondezas.

A visão que Edison tinha, na época, era de criar um sistema elétrico de potência mais distribuído, com pequenas centrais geradoras espalhadas ao longo da cidade, operando em baixas tensões e atendendo aos consumidores locais. O motivo desta proposta, na época, era o fato de que a corrente contínua não podia ter sua tensão elevada ou reduzida facilmente. Tensões mais elevadas permitem que a mesma potência seja transmitida com menos corrente, que resulta em perdas menores nas linhas entre o gerador e as cargas. Entretanto, tensões elevadas não são adequadas para uso doméstico, uma vez que são muito perigosas.

Com isto, surgiu a proposta de um sistema elétrico baseado em corrente alternada. Em corrente alternada, a tensão pode ser elevada ou reduzida facilmente através de um transformador, permitindo que a transmissão seja feita em níveis elevados de tensão (de modo a reduzir as perdas) e seja distribuída em tensões baixas, adequadas para uso doméstico. Este sistema, proposto por George Westinghouse e suportado por Nikola Tesla, provocou um conflito no final da década de 1880 conhecido como “guerra das correntes”.

Tesla viabilizou o sistema em corrente alternada através da aplicação dos conceitos de campo girante, que o levou a inventar o motor de corrente alternada - algo que não existia na época. Isso somado aos avanços do transformador fez com que a corrente alternada tivesse muitas vantagens sobre a corrente contínua (BARNES et al., 2017). Devido a estas vantagens, a CA foi adotada como o principal meio de distribuir energia elétrica, o que parecia ter sepultado o uso de corrente contínua em sistemas elétricos de potência (WANG et. al, 2013).

Entretanto, foi justamente uma desvantagem da corrente alternada em sistemas de transmissão que se levou a considerar o uso de corrente contínua em altas-tensões (HVDC) para a transmissão de energia em larga escala. De modo geral, a corrente alternada é geralmente inviável para uso em redes submarinas, pois estas linhas apresentam uma alta capacitância por quilômetro, gerando perdas elevadas (ROUZBEHI et al., 2016). Este problema não afeta redes em corrente contínua, pois ela enxerga um capacitor como um circuito aberto.

A partir disto, em 1954, foi construída a primeira linha de corrente contínua em alta-tensão do mundo utilizando retificadores a arco de mercúrio em suas conversões. Esta linha ligava a ilha de Gotland à parte continental da Suécia, operando com uma tensão de 100 kV (CALLAVIK et al., 2018).

Com o aperfeiçoamento dos semicondutores, as válvulas a arco de mercúrio deram lugar aos tiristores, onde esta mesma linha passou a operar com 150 kV de tensão (CALLAVIK et al., 2018).

É importante notar que, antes disso, corrente contínua em altas-tensões já era utilizada, sendo que conversões elétricas (CA-CC, CC-CA, CC-CC) eram feitas através do acoplamento de pares motor-gerador (BARNES et al., 2017). Tais conexões eram utilizadas, principalmente, para a conexão de dois sistemas CA assíncronos (BARNES et al., 2017). Mas um exemplo de linha em HVDC utilizando conversores eletromecânicos foi a linha de Lyon-Moutiers, que possuía 200 km de extensão e transmitia uma potência máxima de 22 MW, com tensões de ± 75 kV e uma corrente máxima de 150 A (BARNES et al., 2017).

Hoje, avanços tecnológicos na área de eletrônica de potência têm aumentado a viabilidade do uso da corrente contínua em sistemas de potência (ANDRADE e HERNÁNDEZ, 2018).

1.1.2 Sistemas HVDC: das Interligações Ponto-a-Ponto aos Sistemas Malhados

Atualmente, existem diversas linhas em HVDC no mundo. Algumas destas linhas são apenas pontuais, e visam apenas conectar dois sistemas CA não sincronizados - entretanto, a maior parte dos sistemas HVDC chega a ter centenas ou até milhares de quilômetros (ROUZBEHI et al., 2016).

Em altas-tensões, a corrente contínua é mais eficiente do que a corrente alternada, pois não é afetada pelas parcelas indutiva e capacitiva da linha, aumentando a sua capacidade de transmissão. Além disso, por requerer apenas um par de condutores (um para o polo positivo e outro para o negativo), a corrente contínua requer torres de transmissão menores e ocupam menos espaço físico para transmitir determinada quantidade de potência em relação a linhas em corrente alternada, reduzindo eventuais impactos ambientais no decorrer da linha (WANG et al., 2013).

Considerando as diversas vantagens existentes do uso de corrente contínua em sistemas de potência, a área de sistemas CC multiterminais (ou malhadas) tem sido um campo atrativo para pesquisas (ROUZBEHI et al., 2016).

De fato, hoje em dia, praticamente todas as linhas HVDC contêm apenas dois terminais, fazendo uma conexão ponto a ponto (ROUZBEHI et al., 2016), tendo apenas duas linhas HVDC com 3 terminais (FRANCK, 2011).

Já existe o interesse de se criar redes malhadas em corrente contínua, devido às diversas vantagens que existem em uma rede deste tipo, desde redução de perdas e custos devido a um número total menor de terminais, até o controle total da troca de potência entre todos os pontos de conexão entre rede CC e CA (FRANCK, 2011). Apesar disso, dificuldades com seccionamento e com controle de nível de tensão (e, portanto, de fluxo de potência) ainda são grandes desafios para se construir uma rede deste tipo.

Além disso, a maior parte dos estudos já realizados em sistemas elétricos visavam os sistemas tradicionais em corrente alternada. Portanto, já existe um grande conhecimento agregado nos aspectos de controle e operação de redes deste tipo, que é algo que ainda está em desenvolvimento para sistemas CC (ROUZBEHI et al., 2016). Entretanto, diversas analogias podem ser feitas entre os dois sistemas, permitindo uma melhor compreensão de um sistema CC a partir do que já conhecemos dos sistemas tradicionais CA (ROUZBEHI et al., 2016).

Por exemplo, em sistemas de corrente alternada, o parâmetro de sincronização de uma rede é a frequência. Já em sistemas de corrente contínua, este parâmetro é a tensão de barra (ROUZBEHI et al., 2016). Ao mesmo tempo, o fluxo de potência de uma barra para a outra, em sistemas CA, tem uma correlação forte com a diferença angular das tensões das barras (mas depende também da

tensão aplicada, e da reatância indutiva da linha, sendo que o R normalmente é desprezado) (MONTICELLI, 2011). Em sistemas CC, o fluxo de potência está correlacionado com a diferença de tensão entre as duas barras, além da magnitude de tensão em si e da resistência da linha (ANDRADE e HERNÁNDEZ, 2018).

Isto cria uma diferença fundamental entre sistemas CC e sistemas CA, pois o parâmetro de sincronização, que é constante em sistemas de corrente alternada, é obrigado a ser diferente em cada barra de um sistema CC, pois se isto não acontecer, não haverá fluxo de potência na rede (ROUZBEHI et al., 2016).

Além disso, em redes de corrente contínua, indutores e capacitores comportam-se, respectivamente, como curtos-circuitos e circuitos abertos em regime permanente (ALEXANDER e SADIKU, 2000). Ou seja, não existe circulação de energia reativa em redes de corrente contínua, fazendo com que toda a capacidade de transmissão de energia de uma linha fique disponível totalmente para a potência ativa, fazendo com que, na prática, uma linha em corrente contínua tenha uma maior capacidade de transmissão do que uma linha em corrente alternada (HÄFNER e JACOBSON, 2011). Problemas de qualidade de energia comuns em redes CA, como desbalanceamento de fases, também não estão presentes em redes CC, dispensando o uso de elementos compensadores para amenizar problemas desta natureza (ROUZBEHI et al., 2016).

Ainda assim, há diversos problemas associados com redes em corrente contínua. Um dos principais problemas diz respeito aos seccionamentos, os quais são utilizados em manobras de segurança (disjuntores) e em manobras de desligamentos manuais (relés, chaves, contactores). Sempre que uma chave é aberta, ocorre um arco elétrico. Em corrente alternada, este arco torna-se instável quando a tensão passa pelo zero, fazendo o arco cessar na maioria das vezes. Entretanto, em corrente contínua jamais há a passagem pelo zero. Isto quer dizer que o arco tende a ser estável, fazendo com que dispositivos que realizam manobras em CC sejam muito mais complexos, pois requerem estratégias para fazer o arco elétrico cessar após a chave ser aberta (FRANCK, 2011).

Isto se torna ainda mais crítico quando se considera a baixa impedância de uma rede CC, o que faz com que uma falta tenha um impacto muito maior do que em sistemas CA, devido à magnitude e a velocidade envolvida (HÄFNER e JACOBSON, 2011). Faltas em corrente contínua requerem um tempo de ação com

duas ordens de grandezas a menos que sistemas CA (ou seja, na ordem de alguns milissegundos), pois requerem ainda que não ocorra a descarga de capacitores da rede, o que poderia comprometer a estabilidade do sistema (HÄFNER e JACOBSON, 2011).

Além da questão de proteção e chaveamento, há o desafio do controle da tensão em redes deste tipo. Como já explicado, a tensão é a variável que determina o fluxo de potência em uma rede, ao mesmo tempo em que é o parâmetro de sincronismo de uma rede CC. Portanto, controlar esta variável é de fundamental importância, mas isto não é trivial em corrente contínua como é em corrente alternada (utilizando um transformador).

Uma das maneiras é utilizar o que alguns autores chamam de “FDCTS”, ou “Sistemas Flexíveis de Transmissão em Corrente Contínua”, um termo análogo ao FACTS usado em sistemas CA. Tais dispositivos são compostos de dispositivos de eletrônica de potência, sendo essencialmente os conversores CC-CC. Devido à capacidade de ajustar a tensão em uma barra, estes dispositivos inserem um grau de liberdade em um sistema de corrente contínua, permitindo controlar o fluxo de potência nesta rede (HÄFNER e JACOBSON, 2011).

1.1.3 As Microgrids em Corrente Contínua

Até agora, foi mostrado o panorama a respeito de redes malhadas CC em altas-tensões (“*meshed HVDC*”). Como foi visto, tais redes ainda são um sonho a ser realizado em sistemas de potência presentes no mundo.

Entretanto, se mudarmos o foco para as tensões mais baixas, redes malhadas em corrente contínua já são uma realidade e tornaram-se uma tecnologia comum em aplicações vinculadas a sistemas de potência (KITSON et al., 2018).

Os chamados microgrids (ou microrredes) são sistemas de distribuição que contém unidades geradoras distribuídas ao longo da rede, os quais são capazes de operar de forma independente da rede elétrica convencional.

Avanços em sistemas de armazenamento de energia e na geração de energia renovável têm aumentado a influência dos microgrids em corrente contínua em sistemas de potência, já que estes sistemas são operados em CC (MONTOYA,

GONZÁLES e GARCÉS, 2018). Outros aspectos que aumentam a relevância destes sistemas diz respeito ao fato de que a geração das fontes renováveis é tipicamente feita em corrente contínua; enquanto isso, uma parcela significativa das cargas conectadas à rede também precisam ser alimentadas em corrente contínua. Isso provoca perdas devido a conversões em redes de corrente alternada (GOWTHAM et al, 2018).

Apesar de parecer algo contraintuitivo, o fluxo de potência em microgrids de corrente contínua são um problema desafiador, uma vez que o problema é naturalmente não-linear devido ao fato de que os conversores que tipicamente ligam as fontes de energia renováveis ao sistema elétrico comportam-se como uma injeção de potência constante; além disso, em uma microgrid ilhada, tipicamente não há a presença de barras de folga (que mantém as tensões próximas a 1 pu), tornando necessário a inclusão do controle droop no modelo (GARCÉS e MONTOYA, 2019).

1.2 JUSTIFICATIVA

Conforme apresentado na contextualização, o uso da corrente contínua em sistemas de potência possui diversas vantagens. Com o advento da eletrônica de potência, a viabilidade destes sistemas está aumentando.

Entretanto, dada a consolidação dos sistemas de corrente alternada e devido ao fato de que os fatos que aumentaram a atratividade e viabilidade dos sistemas em corrente contínua são recentes (como os avanços em eletrônica de potência, a viabilidade da geração renovável e da geração distribuída), existem poucos estudos realizados na área de sistemas em corrente contínua em comparação com o conhecimento agregado em sistemas CA tradicionais.

Sendo assim, e dado que é um tema que possui relação com eficiência energética, podemos concluir que é um tema relevante para a comunidade científica brasileira, e em especial para a Universidade Federal do Paraná, tendo em vista os projetos de geração fotovoltaica e eficiência energética em progresso.

1.3 OBJETIVOS

Nesta seção, encontram-se os objetivos deste trabalho.

1.3.1 Objetivo Geral

O projeto tem como objetivo analisar o comportamento de sistemas elétricos de potência em corrente contínua, em regime permanente. Em seguida, será desenvolvido um método computacional de análise para um sistema deste tipo. Por fim, serão discutidos os eventuais problemas existentes neste tipo de sistema e possíveis abordagens para minimizá-los.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Realizar uma revisão bibliográfica a fim de se obter o estado da arte dos sistemas elétricos de potência em corrente contínua;
- b) Elaborar um algoritmo através da plataforma Octave, que deverá receber os parâmetros de uma rede em corrente contínua e retornar as variáveis do sistema relevantes à operação desta rede;
- c) Testar o algoritmo criado através de sistemas testes, de forma a comprovar seu funcionamento;
- d) Identificar, através das simulações e da revisão bibliográfica, possíveis problemas que existem em sistemas deste tipo;
- e) Discutir estratégias com potencial de amenizar ou eliminar os problemas identificados.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Na primeira etapa, será feita uma revisão bibliográfica, a fim de verificar na literatura o que já se conhece sobre sistemas elétricos de potência em corrente contínua, bem como o que está sendo estudado hoje. Esta etapa será realizada através da consulta a periódicos, artigos, livros e outras fontes científicas.

Em seguida, será a etapa de síntese do método computacional de análise de sistemas de potência em corrente contínua. Este programa será desenvolvido na plataforma Octave, e deverá receber, como dados de entrada, os parâmetros de geração e consumo em cada barra do sistema, além da resistência elétrica de cada ramo. Através da aplicação de ferramentas matemáticas e algoritmos, o programa deverá retornar o valor de tensão em cada barra e o fluxo de potência em cada ramo do sistema.

Com o programa pronto, deverão ser simulados os sistemas testes. Tais sistemas serão submetidos a condições comuns em sistemas de corrente alternada, como aumento de carga, redução de carga e contingenciamento. A partir dos testes, os resultados deverão ser comparados com os dados da literatura, a fim de comprovar o correto funcionamento do algoritmo criado.

Por fim, dado o funcionamento do algoritmo, deverão ser discutidos os resultados obtidos nas simulações. Nesta etapa, deve-se identificar possíveis problemas existentes em sistemas de potência em corrente contínua a partir das simulações realizadas e da revisão bibliográfica, e propor formas de solucioná-los ou minimizá-los.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A primeira etapa do trabalho realiza uma revisão bibliográfica, de forma a determinar o que já existe hoje em termos de sistemas de potência em corrente contínua.

2.1 FLUXO DE POTÊNCIA TRADICIONAL EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE CORRENTE CONTÍNUA

Tipicamente, um sistema de potência em corrente contínua é composto por fontes de injeção de potência (geradores), unidades consumidoras de potência (cargas) e por uma rede elétrica, que interconecta os elementos da rede (ANDRADE e HERNÁNDEZ, 2018).

2.1.1 Modelagem dos Elementos da Rede Elétrica em Corrente Contínua

Os geradores podem ser vistos como uma fonte de tensão constante (ANDRADE e HERNÁNDEZ, 2018) ou uma fonte de potência constante (GARCÉS e MONTOYA, 2019).

As cargas são tipicamente consideradas como consumidores de potência constante (ANDRADE e HERNÁNDEZ, 2018).

E por fim, os alimentadores da rede são modelados apenas como uma resistência série, os quais comporão a matriz condutância da rede elétrica (ANDRADE e HERNÁNDEZ, 2018).

2.1.2 Problema de Fluxo de Potência em Corrente Contínua

O problema de fluxo de potência consiste em calcular a tensão em cada barra do sistema, e a partir disso obter-se o fluxo de potência em cada ramo e as respectivas perdas na rede (ANDRADE e HERNÁNDEZ, 2018).

Para isto, deve-se considerar como dados de entrada as informações sobre potência gerada, potência demandada e os dados da rede elétrica (isto é, a resistência de cada ramo do sistema) (ANDRADE e HERNÁNDEZ, 2018).

A solução deste problema deverá contemplar o balanço geral de energia do sistema - isto é, toda a potência gerada deverá ser igual à potência consumida, considerando como consumo tanto a potência demandada pelas cargas quanto a energia dissipada como perda na rede elétrica (ANDRADE e HERNÁNDEZ, 2018).

A solução do problema de fluxo de potência deve cumprir com o balanço de potência global do sistema, conforme a equação 1.

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

Onde P_G indica potência gerada, P_D indica a potência demanda pelas cargas, P_L é a potência perdida na rede, n é o número de barras do sistema e n_l é o número de ramos do sistema (ANDRADE e HERNÁNDEZ, 2018).

2.1.3 Formulação do Problema de Fluxo de Potência em Redes CC

A formulação do problema se dá a partir das equações de balanço de potência nodais (ou de barra) (ANDRADE e HERNÁNDEZ, 2018). Podemos deduzí-lo através da aplicação direta da lei das correntes de Kirchhoff, como pode ser verificado na dedução apresentada no artigo escrito por Andrade e Hernández.

Seja uma determinada barra k de um sistema elétrico em corrente contínua, na qual estão conectados elementos de geração e demanda de potência, além de linhas de energia, de forma que cada qual injeta uma determinada corrente neste nó, conforme mostrado na figura 1.

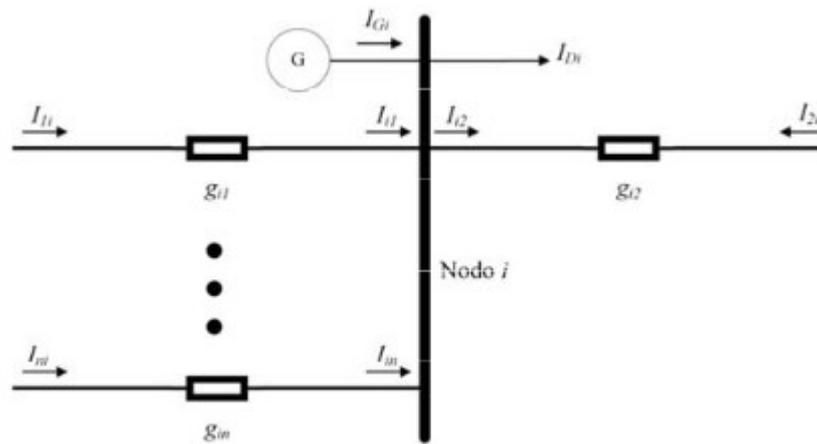


Figura 1: Balanço de Corrente na Barra k

Fonte: ANDRADE e HERNÁNDEZ, 2018

Aplicando a lei de Kirchoff das correntes, chegamos à equação 2:

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

Onde I_{km} representa a injeção de corrente das linhas, I_{Dk} é a corrente demandada pelas cargas e I_{Gk} é a corrente injetada pela geração.

A somatória da equação 2 pode ser desenvolvida para ficar em termos de tensões e condutâncias, substituindo a corrente pelas relações das equações 3 e 4:

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

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

Assim, obtemos a equação 5:

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

Podemos expressar a equação 5 em termos da matriz condutância de barra:

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

Sendo que:

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

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

Multiplicando a equação 2 por V_k , se obtém o balanço de potência nodal do sistema. Ou seja, o balanço 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 a equação 10:

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

Podemos substituir a equação 10 na equação 9:

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

Seguindo a definição do problema de fluxo de potência, temos:

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

Sendo que:

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

Por outro lado, a potência injetada em cada nó em termos de correntes e tensões é:

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

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

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

Como a geração e a carga são definidas em cada barra do sistema, as incógnitas do problema são as tensões de barra. Dado o fato de que existem perdas no sistema, não há como se definir o balanço de potência em todas as barras do sistema. Sendo assim, é necessário que exista pelo menos uma barra de geração

cuja potência não é especificada, de tal forma que sua equação não é incluída no conjunto total de equações a resolver. Esta barra é chamada de “barra de folga” (ou *slack node*).

Após o problema ser resolvido, pode-se calcular o fluxo de potência em cada ramo do sistema, a partir da equação 16:

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

De forma análoga, pode-se aplicar a equação 17 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 folga pode ser calculada através da equação 18:

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

E, por fim, podemos obter as perdas de transmissão em cada ramo através da soma algébrica do fluxo da barra k à m com o fluxo da barra m à k, obtendo-se as perdas totais do sistema a partir da equação 19:

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

2.2 INCLUSÃO DO CONTROLE DROOP NO CÁLCULO DE FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE CORRENTE CONTÍNUA

Conforme citado anteriormente, uma das limitações do fluxo de potência tradicional em corrente contínua é a necessidade de haver pelo menos uma barra cuja tensão seja constante e conhecida, tipicamente com uma geração forte, capaz de assumir as perdas do sistema. Embora esta condição seja aceitável em

determinados casos, microgrids operando de forma ilhada tipicamente não possuem uma barra capaz de assumir este papel, uma vez que a geração é distribuída ao longo da rede (GARCÉS e MONTOYA, 2019).

Sendo assim, é necessário modificar a estrutura do problema, de forma a eliminar a necessidade de uma barra com uma tensão constante e conhecida. Uma das formas de se fazer isso é aplicando o controle droop ao problema de fluxo de potência (GARCÉS e MONTOYA, 2019).

Em uma microgrid CC, tipicamente há diversas fontes de corrente contínua conectadas em paralelo. O ideal é que estas fontes não trabalhem como fontes de tensão constante, a fim de entregar a potência apropriada de forma autônoma (LI et al., 2014).

Fazendo uma analogia aos geradores controlados por droop na rede CA, as fontes CC podem implementar este tipo de comportamento através da subtração da corrente de saída do conversor, ou através da multiplicação por um valor recíproco ao desvio da tensão medida em relação à tensão de referência (LI et al., 2014).

A equação 31 ilustra o método da subtração da corrente, o qual será implementado em nosso projeto:

$$V_k = V_{ref} - R_D i_k \quad (20)$$

Onde V_k é a tensão na saída do conversor, V_{ref} é tensão de referência, que é o valor de tensão de terminal quando não há nenhuma carga conectada; R_D é a resistência virtual do controlador droop e i_k é a corrente de saída do conversor (LI et al., 2014).

Para simular o controle droop em um sistema CC, devemos considerar que há um outro tipo de barra, denominada barra droop (LI et al., 2014).

Uma vez que, em uma rede CC unipolar, a injeção de potência possui uma relação com a corrente descrita pela seguinte equação (LI et al., 2014):

$$P = V \cdot I \quad (21)$$

Podemos escrever uma equação adicional para as barras do tipo droop que, conjuntamente com a equação de balanço de potência nodal (equação 5), deverá reger este tipo de barra no problema de fluxo de potência (LI et al., 2014):

$$V_k = V_{\text{ref}_k} - R_{Dk} \cdot \frac{P_k}{V_k} \quad (22)$$

3 METODOLOGIA

Será elaborado algoritmo que deverá receber os dados de barra e os dados de linha do sistema.

Este algoritmo deverá ser capaz de realizar o cálculo do fluxo de potência para redes em corrente contínua através do método de Newton-Raphson, na forma tradicional quanto considerando o modelo com droop.

Após resolver o problema de fluxo de potência, o algoritmo deverá retornar 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.

O programa deverá ser testado a partir de casos conhecidos, a fim de atestar seu funcionamento.

Por fim, deverá ser feita a etapa de testes, utilizando diferentes cenários para os sistemas testes, como situações de aumento e redução de carga, além de análises de contingência.

3.1 SOLUÇÃO DO PROBLEMA FLUXO DE POTÊNCIA EM CORRENTE CONTÍNUA PELO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

Considerando o caso clássico (sem droop), o problema de fluxo de potência resulta em um sistema de n equações não-lineares a serem resolvidas, conforme a equação 15. Para isto, podemos utilizar um método iterativo para encontrar uma solução para este sistema.

Um destes métodos é o método de Newton-Raphson, cuja dedução pode ser encontrada no artigo de Andrade e Hernández. A partir da equação original, pode-se aplicar uma expansão em série de Taylor, desprezando todos os termos com derivadas de ordem superior a 1. Além disso, supõe-se que todas as variáveis envolvidas pertencem a uma solução. A partir disso, obtém-se a seguinte expressão:

$$F_{Pk} = \frac{\partial F_{Pk}}{\partial P_{Gk}} \Delta P_{Gk} + \frac{\partial F_{Pk}}{\partial P_{Dk}} \Delta P_{Dk} + \sum_{m \in k} \frac{\partial F_{Pk}}{\partial V_m} \Delta V_m + \sum_{m \in k} \frac{\partial F_{Pk}}{\partial G_{km}} \Delta G_{km} \quad (23)$$

Como há variáveis que são especificadas, podemos simplificar a equação 20 e obter:

$$F_{Pk} = \sum_{m \in k} \frac{\partial F_{Pk}}{\partial V_m} \Delta V_m \quad (24)$$

Assim, para a iteração i do método de Newton aplicado ao problema de fluxo de potência em corrente contínua, temos:

$$-[\Delta P]^{(i)} = \left[\frac{\partial F_P}{\partial V} \right]^{(i)} [\Delta V]^{(i)} \quad (25)$$

Partindo do princípio que a carga e a geração são constantes, as derivadas parciais de F_P podem ser expressas em função das derivadas parciais da injeção de potência líquida:

$$\frac{\partial F_{Pk}}{\partial V} = \frac{\partial P_{Gk}}{\partial V} - \frac{\partial P_{Dk}}{\partial V} - \frac{\partial P_k}{\partial V} = -\frac{\partial P_k}{\partial V} \quad (26)$$

A equação 23 se converte em:

$$[\Delta P]^{(i)} = \left[\frac{\partial P}{\partial V} \right]^{(i)} [\Delta V]^{(i)} \quad (27)$$

Cada elemento da matriz de derivadas pode ser calculado por:

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_k} = 2V_k G_{kk} + \sum_{m \in k} V_m G_{km} \quad (28)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k G_{km} \quad (29)$$

Para calcular o vetor independente:

$$\Delta P_k^{(i)} = P_{Gk} - P_{Dk} - P_k^{(i)} \quad (30)$$

Onde:

$$P_k^{(i)} = V_k^{(i)} \sum_{m \in k} V_m^{(i)} G_{km} \quad (31)$$

Uma vez que se resolve a equação 25, as tensões são atualizadas de acordo com:

$$V_k^{(i+1)} = V_k^{(i)} + \Delta V_k^{(i)} \quad (32)$$

As iterações se repetem até que seja cumprido o critério de convergência para o método de Newton-Raphson, dado por:

$$\text{Max} |\Delta P_k^{(i)}| \leq \text{tol}_P \quad (33)$$

Onde tol_P é a tolerância.

3.2 ALGORITMO DE CÁLCULO DE FLUXO DE POTÊNCIA EM CORRENTE CONTÍNUA

O algoritmo, o qual será desenvolvido na plataforma Octave, pode ser analisado em três etapas: a etapa dos dados de entrada, etapa dos dados de saída e a etapa de processamento. Cada uma destas entradas será analisada a seguir.

3.2.1 Dados de Entrada

Os dados de entrada são divididos entre os dados de barra do sistema e os dados de linha. Cada uma destas partes será estruturada em um arquivo de formato .csv (valores separados por vírgula), sendo que cada um destes arquivos terá sua própria estrutura referente a dados e colunas.

3.2.1.1 Dados de Barra

O arquivo referente ao dado de entrada conterá um cabeçalho, que denotará qual informação contém em cada uma das colunas. Portanto, as informações propriamente ditas começarão na 2ª linha do arquivo.

Cada barra do sistema será indexada, e os valores dos índices devem estar em ordem crescente, e começar a partir do 1. Isto é fundamental para que o algoritmo, tal como foi criado, reconheça que a barra 1 do índice é a mesma barra 1 dos resultados, uma vez que o programa em si utilizará a linha como índice e não o valor da coluna. Em outras palavras, a coluna de indexação presente neste arquivo tem apenas o propósito de organizar o próprio arquivo de entrada, e sua informação não é relevante para o algoritmo em si.

Para cada barra, serão apresentados os valores referente ao tipo de barra, a potência gerada, a potência demandada, a condutância shunt de barra, a tensão associada a esta barra, a tensão de referência para o controle droop e a resistência virtual de droop. Cada uma destas informações será detalhada a seguir.

3.2.1.1.1 Tipo de Barra

O tipo de barra é o que identificará se a barra em questão é uma barra de tensão, potência ou droop. Caso se trate de uma barra de tensão ou droop, pode-se colocar a folga na geração ou na carga (para termos de cálculo de injeções de potência).

Para definir uma barra como sendo uma barra de potência constante, o tipo deverá ser definido como 2. Nestas barras, as colunas referentes às potências de geração e de demanda serão levadas em conta durante todo o algoritmo.

A coluna referente à tensão V determinará o valor do chute inicial para esta barra nos métodos iterativos (caso receba um valor nulo, será considerado um valor igual a 1 pu).

Por fim, as colunas referentes ao droop (V_0 e R) não são consideradas em barras do tipo 2.

Para definir uma barra como tensão constante, deve-se definir o tipo como 1 ou 3. Para estas barras, o valor de tensão será fixado como sendo o valor da coluna de tensão V.

O valor de PD será levado em conta no cálculo das injeções de potência para barras do tipo 1, e o valor de PG será desprezado. Para barras do tipo 3, inverte-se esta lógica: despreza-se PD e leva-se em conta PG.

Valores das colunas referentes ao droop também são desprezados nestas barras.

Finalmente, para se definir uma barra como sendo do tipo droop, define-se ela como 4 (folga na geração) ou 5 (folga na demanda). A coluna de tensão V será usada para determinar o valor de chute inicial para o método iterativo, e os valores de PG e PD serão considerados ou desprezados conforme o tipo de barra: barra 4 desprezará PG e barra 5 desprezará PD.

As colunas do tipo droop só serão levadas em conta neste tipo de barra.

3.2.1.1.2 Potência Gerada (PG)

Esta coluna define o valor de potência gerada, em pu, para barras de potência e para barras de tensão ou droop com folga na demanda.

3.2.1.1.3 Potência Demandada (PD)

Nesta coluna, definem-se os valores de demanda (carga), para barras de potência e barras de droop ou tensão com folga na geração. Os valores devem estar em pu.

3.2.1.1.4 Condutância Shunt de Barra (GL)

Nesta coluna, define-se o valor da condutância shunt de barra (em pu), a fim de modelar cargas de resistência constante. Sendo um dado da matriz condutância de barra, esta coluna é levado em conta em qualquer tipo de barra.

Caso o valor inserido seja menor do que 10^{-8} , o valor considerado pelo algoritmo será 10^{-8} .

3.2.1.1.5 Tensão de barra (V)

Esta coluna definirá o valor de tensão constante, em pu, para todas as barras de tensão do sistema. Também será usada para definir o valor do chute inicial nos métodos iterativos para barras droop ou de potência.

3.2.1.1.6 Tensão de referência droop (V0_droop)

Nesta coluna, define-se o valor de tensão de referência (em pu) para barras do tipo droop.

3.2.1.1.7 Resistência virtual de droop (R_droop)

Por fim, nesta coluna se define o valor de resistência droop (em pu), sendo levada em conta apenas nas barras deste tipo.

3.2.1.2 Dados de Linha

Tal como os dados de barra, o arquivo para os dados de linha também deverá conter um cabeçalho que identificará o que cada uma das colunas significa.

Também haverá uma coluna de indexação para os ramos, que também terá a finalidade exclusiva de organizar a planilha de dados (uma vez que estes índices não serão levados em conta no algoritmo).

Para cada linha, haverão duas colunas identificando os pontos de conexão deste ramo, uma coluna denotando a resistência desta linha e o estado de operação da linha.

3.2.1.2.1 Colunas “De” e “Para”

Estas duas colunas indicam as barras nas quais a linha está conectada. O algoritmo reconhece que uma linha de ‘k’ para ‘m’ é equivalente a uma linha de ‘m’ para ‘k’ - portanto, 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 ligadas em paralelo.

É importante reforçar que estes valores não dizem respeito ao índice do arquivo de barras, e sim à ordem a partir da segunda linha deste arquivo.

3.2.1.2.2 Resistência da linha (R_{pu})

Esta coluna indica a resistência do ramo, em pu. Valores menores que 10^{-8} serão considerados como 10^{-8} pelo algoritmo.

3.2.1.2.3 Estado da linha (Status)

Indica se uma linha está em operação ou não. A linha será considerada como inoperante caso exista um valor 0. Para qualquer outro valor, considera-se que a linha está em operação.

3.2.1.3 Arquivo Inicio.m

Embora seja um arquivo referente ao processamento, alguns dados de entrada podem ser alterados aqui.

Um deles é a tolerância do método iterativo, cujo valor pode ser alterado na variável 'Tol'. O Octave aceitará qualquer valor de tolerância, mas recomenda-se colocar valores acima de 10^{-8} .

3.2.2 Dados de Saída

Os resultados são divididos entre resultados de barra e resultados de linha, tendo um arquivo em formato .csv para cada caso.

3.2.2.1 Resultados de Barra

Os resultados de barra contém as informações sobre a tensão, a qual foi calculada por um dos métodos iterativos, e também a potência gerada e demandada em cada barra (balanço de potência).

Em termos de balanço de potência, P_G e P_D sempre serão as especificadas para as barras do tipo P. Para as barras de tensão constante ou droop, as barras com folga na geração terão P_D especificado, e as barras com folga na demanda terão P_G especificado.

Os valores não especificados serão calculados de acordo com a equação de balanço de potência (equação 15).

É importante ressaltar que todos os valores retornados estarão em pu.

Os resultados serão salvos no arquivo ResultadosBarra.csv.

3.2.2.2 Resultados de Linha

Os resultados de linha contém o fluxo de potência em cada ramo do sistema (tanto o fluxo direto P_{km} quanto o fluxo reverso P_{mk}) e as respectivas perdas em cada linha, sempre em pu.

Seus dados são salvos no arquivo ResultadosLinha.csv.

3.2.3 Etapa de Processamento

Esta etapa é o que faz a ponte entre os dados de entrada e os dados de saída, contendo o algoritmo implementado para cálculo de fluxo de potência. O algoritmo extrai as informações dos dados de entrada, e as manipula para obter os dados de saída.

Os seguintes arquivos compõem o algoritmo:

- Inicio.m
- Dados.m
- Matrizes.m
- Newton.m
- Resultados.m

Todos os arquivos deverão estar na mesma pasta, bem como os arquivos de entrada.

3.2.3.1 Inicio.m

Este arquivo é responsável por dar início à execução do programa, carregando e executando os demais arquivos. Portanto, para executar o algoritmo completo, basta rodar este programa.

Além disso, este programa carrega um dos pacotes do Octave (io), que é necessário para utilizar um dos comandos de escrita nos arquivos de saída.

Como foi dito, é possível alterar algumas informações de entrada neste arquivo, referentes à tolerância e ao método utilizado (Newton-Raphson convencional ou o método com a matriz jacobiana constante).

E por fim, este arquivo também avisa o usuário de que os arquivos de saída serão zerados, pedindo autorização para prosseguir.

3.2.3.2 Dados.m

Este programa limpa os arquivos de saída e transforma os dados dos arquivos de entrada em matrizes, a fim de serem processadas facilmente pelo Octave. A primeira linha de cada matriz gerada pelos arquivos de entrada é excluída, uma vez que se refere ao cabeçalho do programa.

Caso os arquivos de saída não existam, eles são criados nesta etapa.

3.2.3.3 Matrizes.m

Neste arquivo, são geradas as matrizes e os vetores comuns do algoritmo: a matriz condutância de rede, o vetor de tensões iniciais, o vetor de potências especificadas (das barras de potência) e a matriz jacobiana (que será construída posteriormente).

Também são detectados o número de barras e o número de ramos do sistema, e armazenados em variáveis.

3.2.3.4 Newton.m

Este arquivo é responsável por realizar o cálculo de fluxo de potência utilizando o método de Newton-Raphson, que tem como objetivo determinar as tensões em todas as barras do sistema. Todos os tipos de barra podem ser considerados nesta análise (potência constante, tensão constante ou droop), admitindo inclusive um sistema que possua os três tipos de barra ao mesmo tempo.

O algoritmo começa criando os vetores de diferenças de tensão e de potência, além de iniciar o contador de iterações.

Após a primeira construção do vetor de diferenças de potência, o algoritmo verifica se o chute inicial dado já não é a solução. Caso afirmativo, encerra-se a execução desta etapa. Caso contrário, inicia-se o processo iterativo.

A cada iteração, a matriz jacobiana e o vetor de diferença de potência são atualizados, a fim de se determinar o novo vetor de tensões de barra. Quando o critério de convergência for atingido, as iterações cessam e a solução estará armazenada no vetor de tensões de barra.

3.2.3.5 Resultados.m

Neste programa, é feita a análise dos dados após o cálculo de fluxo de potência ter sido realizado. Logo, são calculados os fluxos de potência em cada linha do sistema, as injeções de potência em cada uma das barras, e o cálculo das perdas em cada linha bem como as perdas totais do sistema.

Os resultados obtidos, incluindo as tensões em cada barra do sistema, são escritos nos arquivos de saída.

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Nesta seção, serão mostrados os testes realizados e os resultados obtidos. Para todos os testes, utilizou-se uma tolerância de 10^{-6} ou menor e um limite de 200 iterações.

4.1 TESTE 1: CASO DE ESTUDO DE 5 BARRAS

Este sistema teste foi o caso de estudo proposto por Andrade e Hernández e sua topologia pode ser vista na figura 2. Seus dados de barra, já convertido para valores em pu, estão mostrados na tabela 1, enquanto seus dados de linha estão na tabela 2.

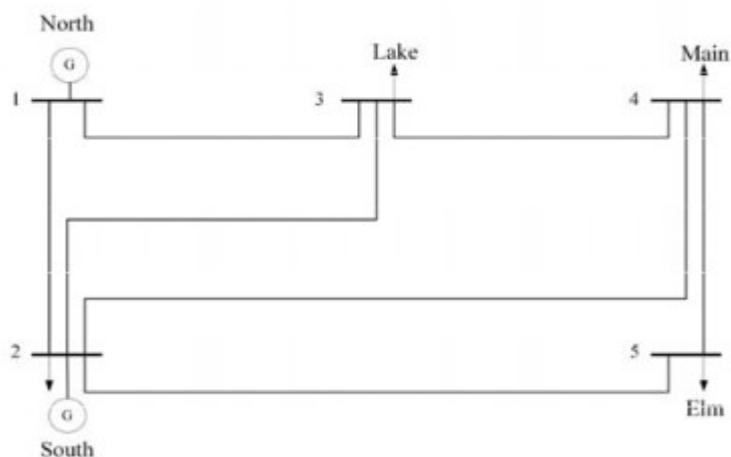


Figura 2: Sistema teste de 5 barras

Fonte: Andrade e Hernández

Barra	P_G (pu)	P_D (pu)	V_{esp} (pu)
1	-	0	1
2	5,4	2,2	0,99
3	0	2,45	-
4	0	3	-
5	0	3	-

Tabela 1: Dados de barra para o sistema 5 barras

Fonte: Andrade e Hernández

Barra 1	Barra 2	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

Tabela 2: Dados de linha para o sistema 5 barras

Fonte: Andrade e Hernández

Este sistema teste foi utilizado para verificar o funcionamento do algoritmo para os casos sem droop. A fim de comparação, tomou-se como referência os resultados do caso de estudo 3, proposto pelos autores, cujos resultados de tensão estão dispostos na tabela 3 e os fluxos de potência na tabela 4.

Barra	Tensão (pu)
1	1
2	0,99
3	0,980432
4	0,970308
5	0,967961

Tabela 3: Resultados de tensão para o sistema de 5 barras

Fonte: Andrade e Hernández

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

Tabela 4: Resultados para o fluxo de potência para o sistema de 5 barras

Fonte: Andrade e Hernández

Para este teste, os arquivos de entrada foram configurados conforme as figuras 3 (dados de barra) e 4 (dados de linha).

Barra	Tipo	PG	PD	GL	V	V0_droop	R_droop
1	1	0	0	0	1	0	0
2	1	5.4	2.2	0	0.99	0	0
3	2	0	2.45	0	1	0	0
4	2	0	3	0	1	0	0
5	2	0	3	0	1	0	0

Figura 3: Teste 1 - Dados de Barra

Fonte: autor

Ramo	De	Para	R _{pu}	Status
1	1	2	0.006875	1
2	1	3	0.00625	1
3	2	3	0.0096875	1
4	2	4	0.01125	1
5	2	5	0.0078125	1
6	3	4	0.00625	1
7	4	5	0.0084375	1

Figura 4: Teste 1 - Dados de Linha

Fonte: autor

Após realizados os testes, analisou-se os resultados de tensão de barra, fluxo de potência direto e fluxo de potência reverso, além das perdas.

Para a tensão, os resultados obtidos estão mostrados na tabela 5, conjuntamente com os resultados teóricos (valores de tensão estão em pu).

Barra	Simulado	Referência
1	1,000000	1
2	0,990000	0,99
3	0,980432	0,980432
4	0,970308	0,970308
5	0,967961	0,967961

Tabela 5: Teste 1 - Resultados de tensão (em pu)

Fonte: autor

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

Para os fluxos de potência, os resultados obtidos estão na tabela 6, sendo que, novamente, os valores de fluxo estão em pu.

De	Para	Fluxo Direto		Fluxo Reverso	
		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

Tabela 6: Teste 1 - Resultados de fluxo de potência (em pu)

Fonte: autor

Nota-se que houve uma pequena discrepância entre os fluxos reversos prático e teórico para as barras 2 e 3. Entretanto, ao aplicar manualmente a equação 17 para os valores de tensão referentes à barra 3 e 2, chegaremos ao resultado -0,968364, que foi o valor encontrado pelo algoritmo.

E, por fim, as perdas totais para o caso 3 foram de 0,198953 pu (Andrade e Hernández, 2018), cujo valor também foi encontrado pela simulação.

Desta forma, conclui-se que o algoritmo é capaz de retornar resultados confiáveis para testes que não envolvem controle droop.

4.2 TESTE 2: CASO DE ESTUDO DE 4 BARRAS

Este também é um sistema teste, que foi proposto por LI et al., o qual será utilizado para verificar o funcionamento do algoritmo para sistemas com droop.

Este sistema é composto por 4 barras conectados em uma única malha, e sua topologia pode ser visualizada na figura 5.

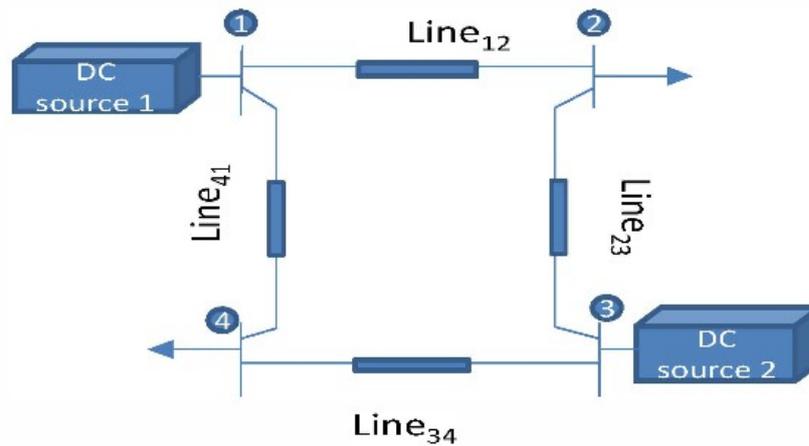


Figura 5: Teste 2 - Sistema teste com droop

Fonte: LI et al.

Há um total de 4 linhas, que utilizam o mesmo valor de resistência (0,007233796 pu), e fazem as conexões entre as barras 1 e 2, 2 e 3, 3 e 4 e, por fim, 4 e 1.

Os dados de barra do sistema estão mostrados na tabela 7, onde V_{ref} se refere à tensão de referência droop, P_G é a geração, P_D é a demanda e R_D é a resistência virtual de droop.

Barra	P_G (pu)	P_D (pu)	V_{ref} (pu)	R_d (pu)
1	0	0	1	0,028935
2	0	4,6625	-	-
3	0	0	1	0,072338
4	0	6,975	-	-

Tabela 7: Teste 2 - Dados de barra para o sistema 4 barras

Fonte: LI et al.

Neste sistema, foram realizados dois testes. O primeiro teste teve como objetivo analisar o funcionamento do algoritmo utilizando apenas barras de potência e barras droop. Para isto, serão comparados os valores retornados pelo algoritmo com os valores encontrados pelos autores.

Em seguida, testou-se o comportamento do sistema com uma barra do tipo droop e uma barra de tensão (barra 3), que utilizou o valor encontrado para esta

barra no caso com droop. O objetivo deste teste foi analisar o comportamento do algoritmo quando o sistema apresenta os 3 tipos de barras: tensão, droop e potência.

Os resultados teóricos obtidos pelos autores, para este sistema, estão mostrados na tabela 8, o qual se contém as injeções de potência e às tensões de barra.

Barra	Tensão (pu)	Potência Gerada	Potência Demandada
1	0,975766	0,81723	0
2	0,973167	0	0,46625
3	0,974035	0,34962	0
4	0,972306	0	0,6975

Tabela 8: Teste 2 - Resultados de tensão e injeções (em pu)

Fonte: LI et al.

4.2.1 Teste 2.1: Barras Droop

Para este caso, os arquivos de entrada foram configurados conforme as figuras 6 (dados de barra) e 7 (dados de linha).

Barra	Tipo	PG	PD	GL	V	V0_droop	R_droop
1	4	0	0	0	1	1	0.0289352
2	2	0	0.46625	0	1	0	0
3	4	0	0	0	1	1	0.072338
4	2	0	0.6975	0	1	0	0

Figura 6: Teste 2.1 - Dados de Barra

Fonte: autor

Ramo	De	Para	R_pu	Status
1	1	2	0.007233796	1
2	1	4	0.007233796	1
3	2	3	0.007233796	1
4	3	4	0.007233796	1

Figura 7: Teste 2.1 - Dados de Linha

Fonte: autor

Após a simulação, foram analisadas as tensões em cada barra e as injeções de potência. Os resultados obtidos, bem como os valores da teoria, estão mostrados na tabela 9.

Barra	Tensão (pu)		Geração (pu)		Demanda (pu)	
	Simulado	Referência	Simulado	Referência	Simulado	Referência
1	0,975766	0,975766	0,81723	0,81723	0	0
2	0,973167	0,973167	0	0	0,46625	0,46625
3	0,974035	0,974035	0,34962	0,34962	0	0
4	0,972306	0,972306	0	0	0,6975	0,6975

Tabela 9: Teste 2.1 - Resultados obtidos

Fonte: autor

Pode-se notar que os resultados obtidos pelo algoritmo concordam com os resultados de referência.

4.2.2 Teste 2.2: Barra Droop + Barra de Tensão

Desta vez, a barra 3 foi configurada como uma barra de tensão. Sendo assim, o arquivo dos dados de barra foi configurado conforme a figura 8 (os dados de linha não foram alterados em relação ao teste 2.1).

Barra	Tipo	PG	PD	GL	V	V0_droop	R_droop
1	4	0	0	0	1	1	0.0289352
2	2	0	0.46625	0	1	0	0
3	1	0	0	0	0.974035	0	0
4	2	0	0.6975	0	1	0	0

Figura 8: Teste 2.2 - Dados de Barra

Fonte: autor

Os resultados obtidos foram idênticos aos resultados da tabela 9.

Sendo assim, verifica-se que o algoritmo proposto é capaz de lidar com sistemas que possuem barras de tensão, potência e droop ao mesmo, sendo o droop modelado pelo método da subtração da corrente de saída do conversor (equação 20).

4.3 TESTE 3: SISTEMA 45 BARRAS - REDE DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA

Neste caso, foi analisado um sistema elaborado pelo autor, cuja topologia pode ser vista na figura 9. Seus dados de barra estão mostrados no Apêndice A, e os dados de linha se encontram no Apêndice B.

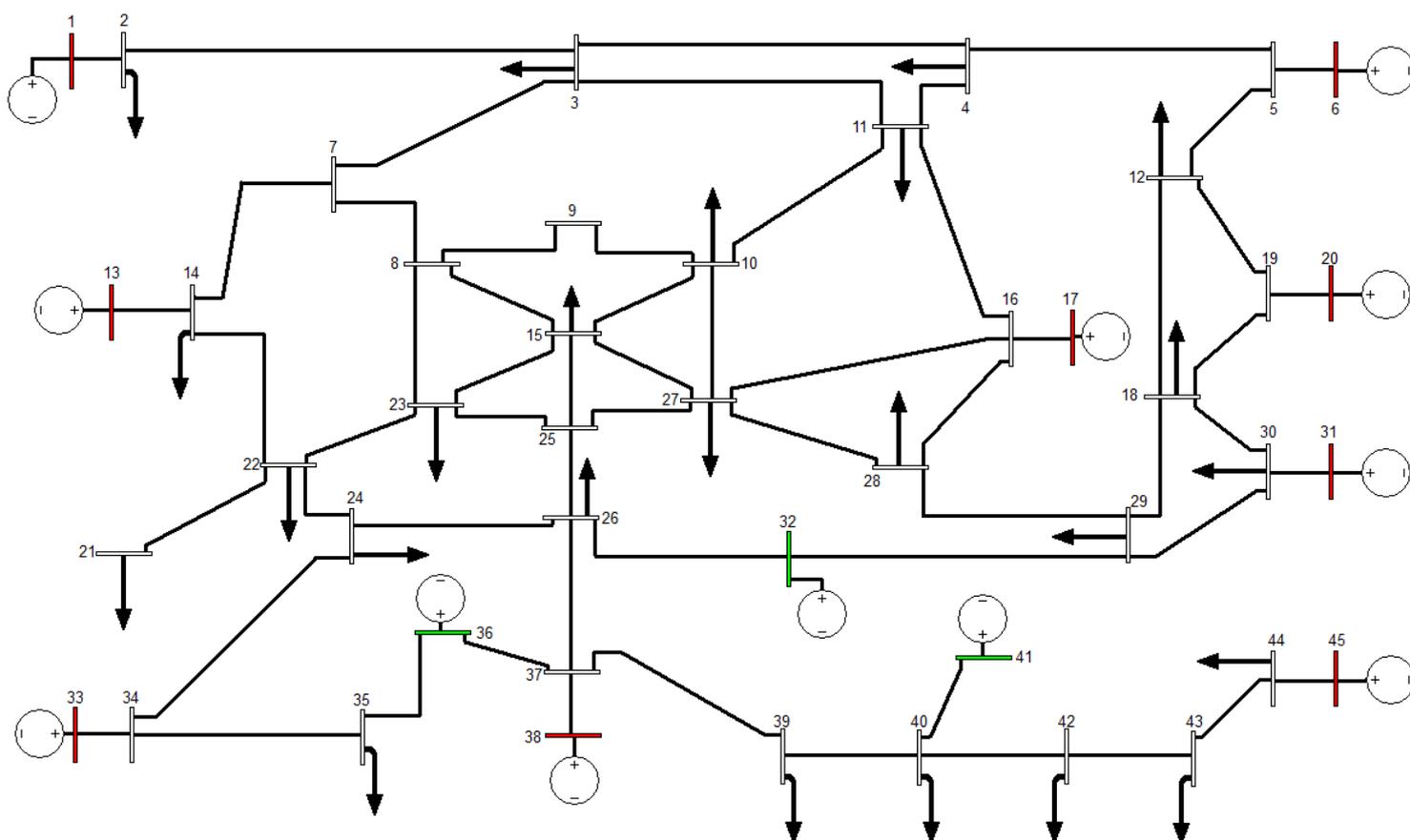


Figura 9: Rede de Transmissão HVDC

Fonte: autor

Este sistema foi utilizado para testar o comportamento de um sistema de corrente contínua frente a contingências. O sistema já está considerado em uma situação de alta demanda (carga alta).

Além do caso original, dois cenários foram escolhidos a fim de testar contingência. No primeiro caso (“Contingência I”), a linha 65 (que faz a conexão entre as barras 16 e 27) será desativada. Já no segundo caso (“Contingência II”), a linha 65 permanecerá desativada, e a linha 28 (entre as barras 14 e 22) também será desligada.

4.3.1 Teste de Contingência: Análise das Tensões de Barra

Após a simulação, foi feita uma tabela contendo os resultados de tensão para cada caso. Esta tabela foi então utilizada para construir um gráfico contendo as tensões em cada barra nos 3 casos, o qual está mostrado na figura 10. Além disso, foi feito um segundo gráfico, contendo apenas as barras que sofreram maiores impactos em suas tensões, que está mostrado na figura 11.

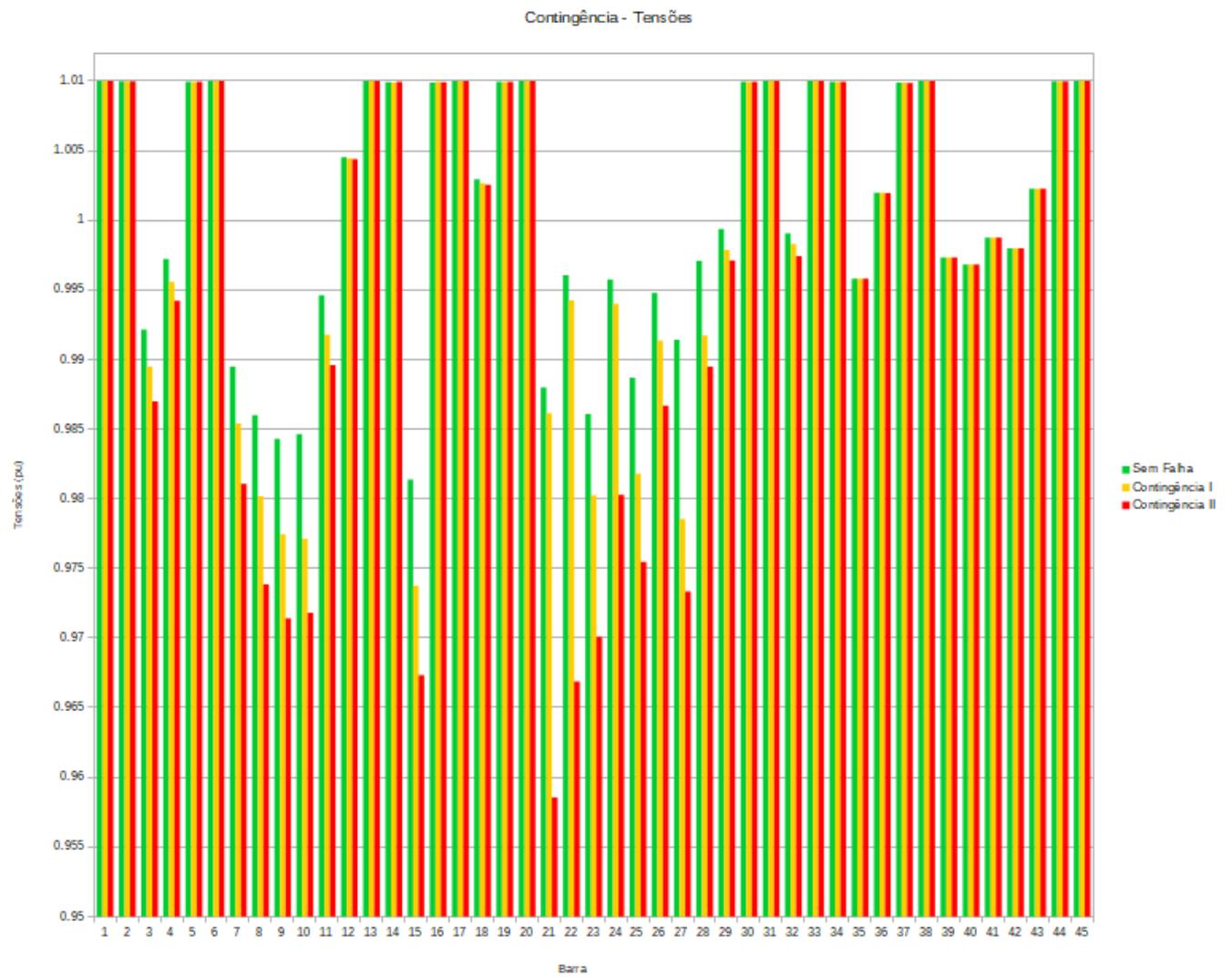


Figura 10: Teste 3 - Tensões de Barra

Fonte: autor

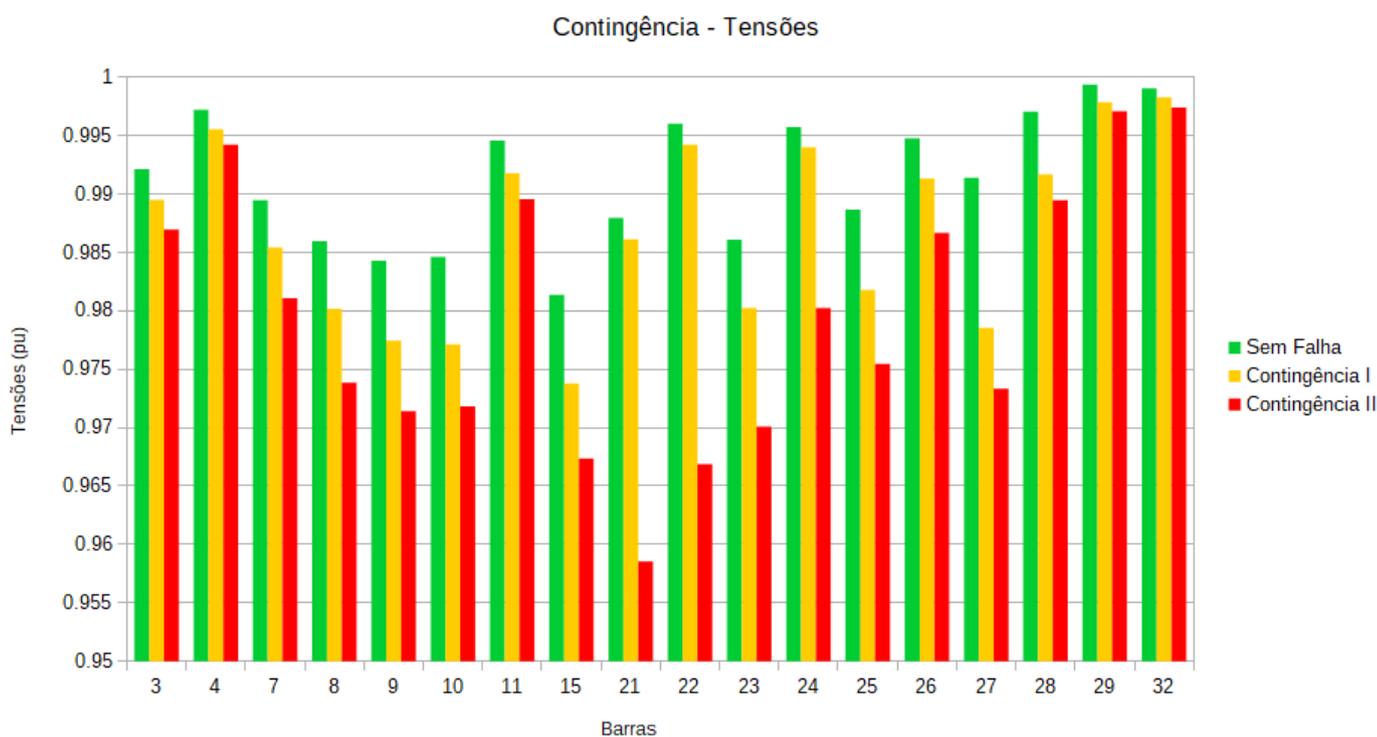


Figura 11: Teste 3 - Tensões de Barra

Fonte: autor

No caso original, nenhuma tensão estava abaixo de 0,98 pu. Para os dois casos de contingência, houve quedas significativas de tensão (especialmente nas barras 21, 22 e 23 para o caso Contingência II). Entretanto, nenhum caso chegou a uma subtensão inferior a 5% do valor nominal.

4.3.2 Teste de Contingência: Análise da Geração

Além das tensões, também foi analisado o comportamento da geração nos casos de contingência. Em termos de tratamento de dados, adotou-se a mesma estratégia utilizada para as tensões de barra. O gráfico de geração está mostrado na figura 12.

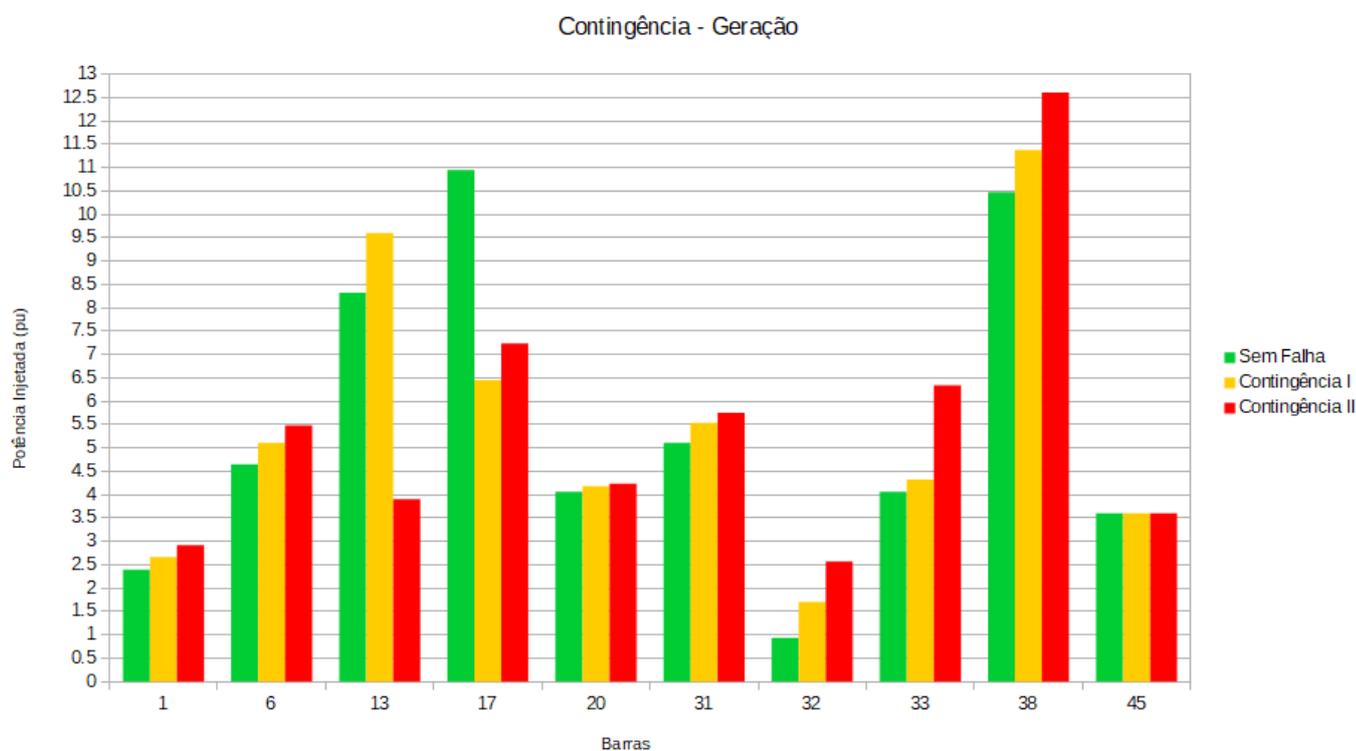


Figura 12: Teste 3 - Gerações

Fonte: autor

Com exceção da barra 32 (que é do tipo droop), todas as barras mostradas no gráfico são de tensão e mantêm uma tensão de 1,01 pu em seus terminais.

Pode-se notar, pelo gráfico, que as principais fontes de injeção de potência para a situação normal estão conectadas nas barras 13, 17 e 38 (com destaque para o gerador da barra 17, que possui a maior geração neste caso).

Logo na primeira contingência, houve uma queda significativa na potência entregue pelo gerador 17. Essa parcela foi assumida, principalmente, pelos geradores 13, 32 e 38.

Na segunda contingência, a potência entregue pelo gerador da barra 13 caiu para um valor abaixo da metade em relação ao caso original, sobrecarregando ainda mais o gerador 38, além dos geradores 32 e 33 (com destaque para o 32, que está injetando uma potência maior do que o dobro em relação ao caso sem falhas).

É importante notar que o sistema original já estava em condição de alta demanda. Sendo assim, é possível que uma parcela destes pontos já estivesse

próxima dos seus limites máximos de injeção de potência. Nestes casos, estas barras não poderiam mais ser modeladas como barras de tensão constantes, e sim como barras de potência constante, com uma geração igual ao limite máximo de injeção de potência. Desta forma, a injeção destas potências seriam reassumidas pelos geradores de maior capacidade, mas com um impacto direto na tensão de barra.

Sendo assim, os geradores das barras 1, 6, 20, 31, 32, 33 e 38 foram modificados para trabalharem como barras de potência constante. Foi assumido que estes geradores, no caso nominal, estavam em torno de 5% abaixo da sua capacidade máxima. Sendo assim, o caso “Contingência II” foi novamente simulado com as barras referidas modeladas como barras de potência que assumiram os valores de geração conforme a tabela 10.

Barra	P_G (pu)
1	2,415
6	4,83
20	4,2
31	5,355
32	0,9765
33	4,2
38	10,92

Tabela 10: Teste 3 - Geradores Modificados para o Caso Contingência II

Fonte: autor

Assim, foi percebido afundamentos de tensão bem mais severos do que no caso de Contingência II original, com destaque a uma das barras (21) ficando abaixo de 5% da tensão nominal (0,95 pu). O gráfico contendo as tensões das barras relevantes, comparadas com a situação sem falha e com o caso Contingência II, está mostrado na figura 13.

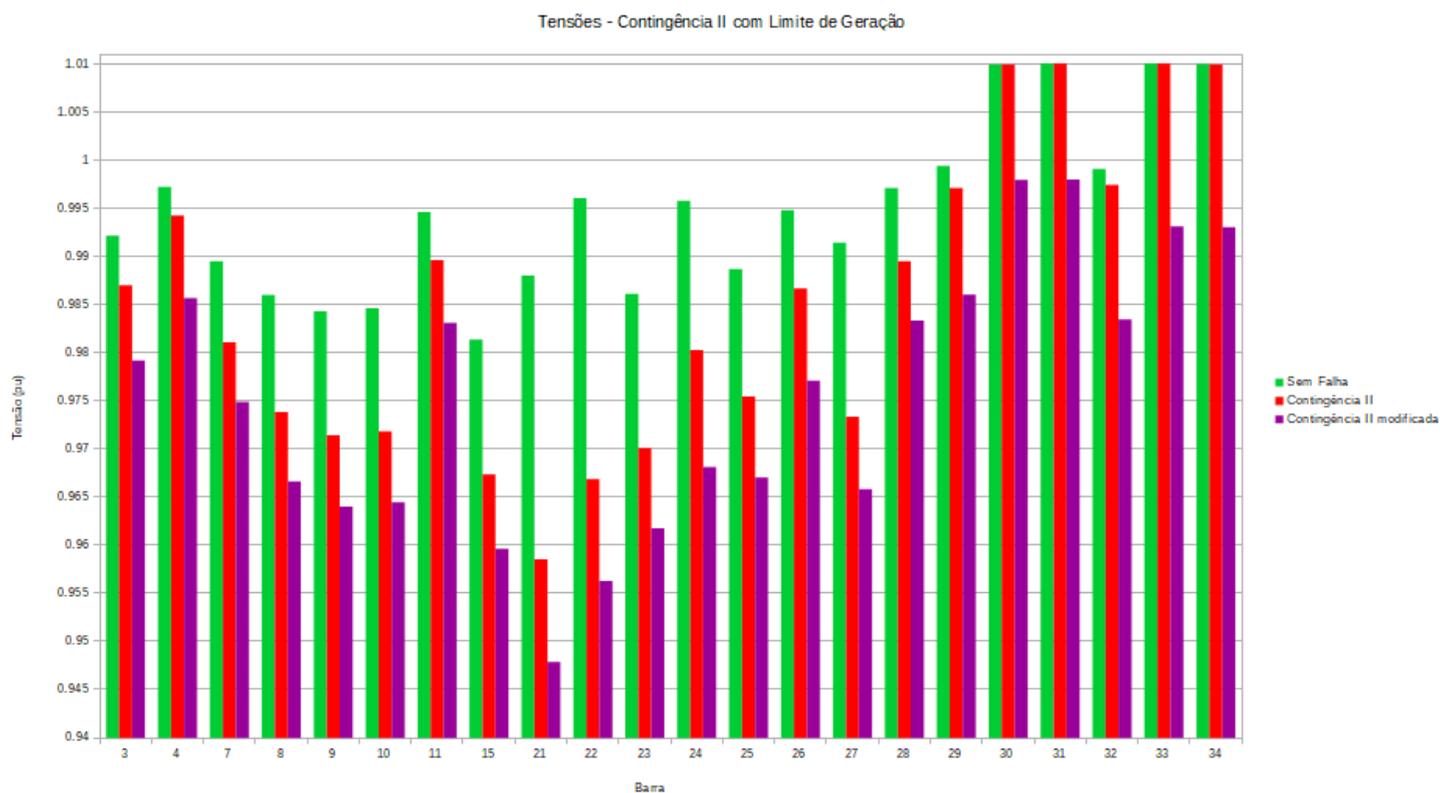


Figura 13: Teste 3 - Níveis de Tensão para Contingência II com Geradores Modificados

Fonte: autor

Já no caso das gerações, cujo gráfico está mostrado na figura 14, nota-se que o gerador da barra 17 reassumiu a maior parte da potência que foi limitada nos demais geradores. Por outro lado, o gerador da barra 13 continuou com uma potência bem abaixo da sua capacidade, levando em conta seu valor de operação nominal).

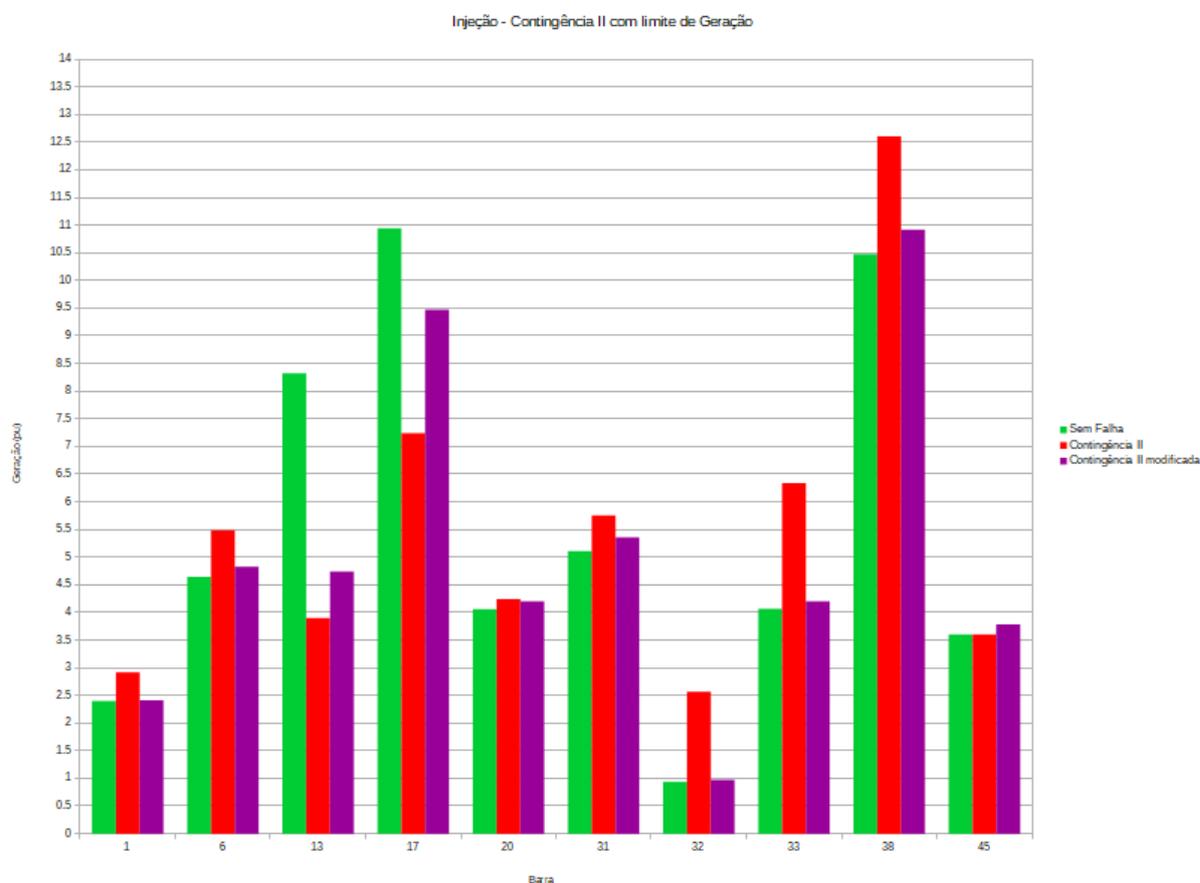


Figura 14: Teste 3 - Potência Gerada com Limite de Geração

Fonte: autor

4.3.3 Teste de Contingência: Análise de Perdas e Fluxos de Potência

Por fim, foi feita uma análise das perdas totais e dos fluxos de potência nas situações de contingência.

No caso das perdas, analisou-se as perdas totais do sistema. Os resultados obtidos estão mostrados na tabela 11, onde verifica-se que as perdas aumentam a medida que as linhas saíram de operação.

Caso	Perdas (pu)
Sem Falha	1,009162
Contingência I	1,230862
Contingência II	1,541866

Tabela 11: Teste 3 - Perdas

Fonte: autor

Já para os fluxos, foi feito para os dados de linha um tratamento similar ao utilizado para os dados de barra. As linhas em série com barras de geração (como 1, 32 e 64) não foram consideradas na análise.

No gráfico, mostrado na figura 15, constam as linhas que tiveram uma alteração considerável em seu fluxo de potência conforme as situações de contingência.

Podemos verificar a partir do gráfico que algumas linhas (18 e 41) tiveram um aumento proporcional absurdamente alto em relação à situação normal. Para as linhas 18 e 41, o fluxo de potência aumentou em aproximadamente 34 e 44 vezes, respectivamente. Outro caso é o da linha 43, em que o fluxo de potência aumentou em quase 7 vezes. Entretanto, estes casos provavelmente indicam linhas que entraram em operação após as falhas, uma vez que, em termos de valores absolutos, não houve um aumento consideravelmente alto.

Outras linhas também tiveram um aumento considerável, com um fluxo próximo ao dobro em relação ao caso nominal, como é o caso das linhas 5, 13, 21, 42, 44, 46, 48 e 69. Algumas destas linhas tiveram um aumento absoluto relativamente alto em comparação aos demais casos, como é o caso das linhas 44 (~2,27 pu), 48 (~2,41 pu) e 69 (~2,54 pu).

Por outro lado, foi possível verificar redução de fluxo em algumas linhas, como foi o caso da linha 31, cujo fluxo ficou abaixo da metade no caso de Contingência I, e um pouco acima da metade para o caso Contingência II.

Determinadas linhas (como 50, 54 e 60) praticamente não sofreram impactos significantes nessas situações (e não estão incluídas no gráfico).

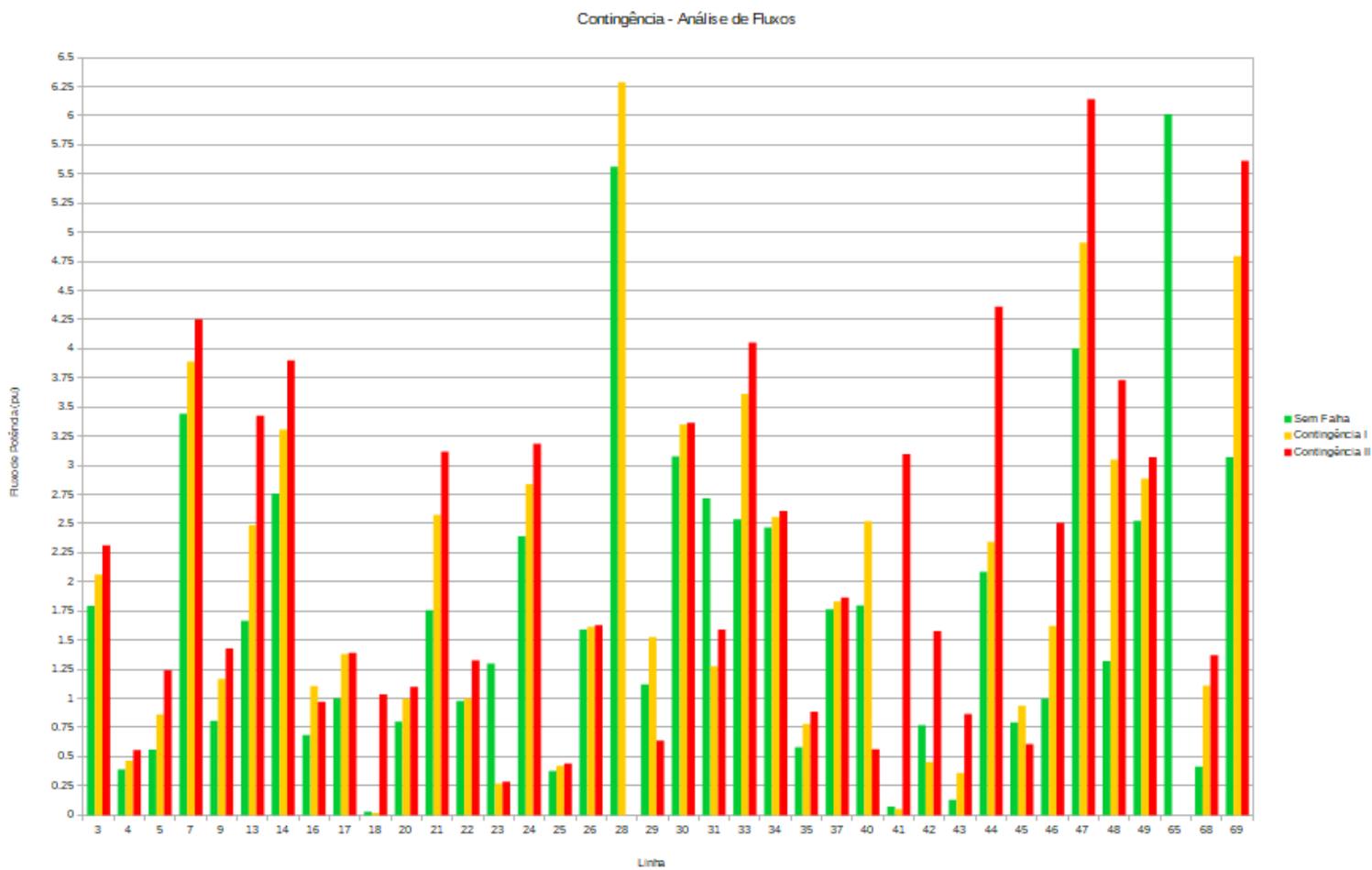


Figura 15: Teste 3 - Fluxo de Potência nas Linhas

Fonte: autor

4.4 TESTE 4: SISTEMA 48 BARRAS - MICROGRID EM CORRENTE CONTÍNUA

A última etapa de testes envolveu um sistema hipotético que simula uma microgrid em corrente contínua, contendo dois possíveis pontos de conexão com a rede e linhas que simulam alimentadores de um dado sistema de distribuição. A topologia deste sistema de 48 barras pode ser vista na figura 16.

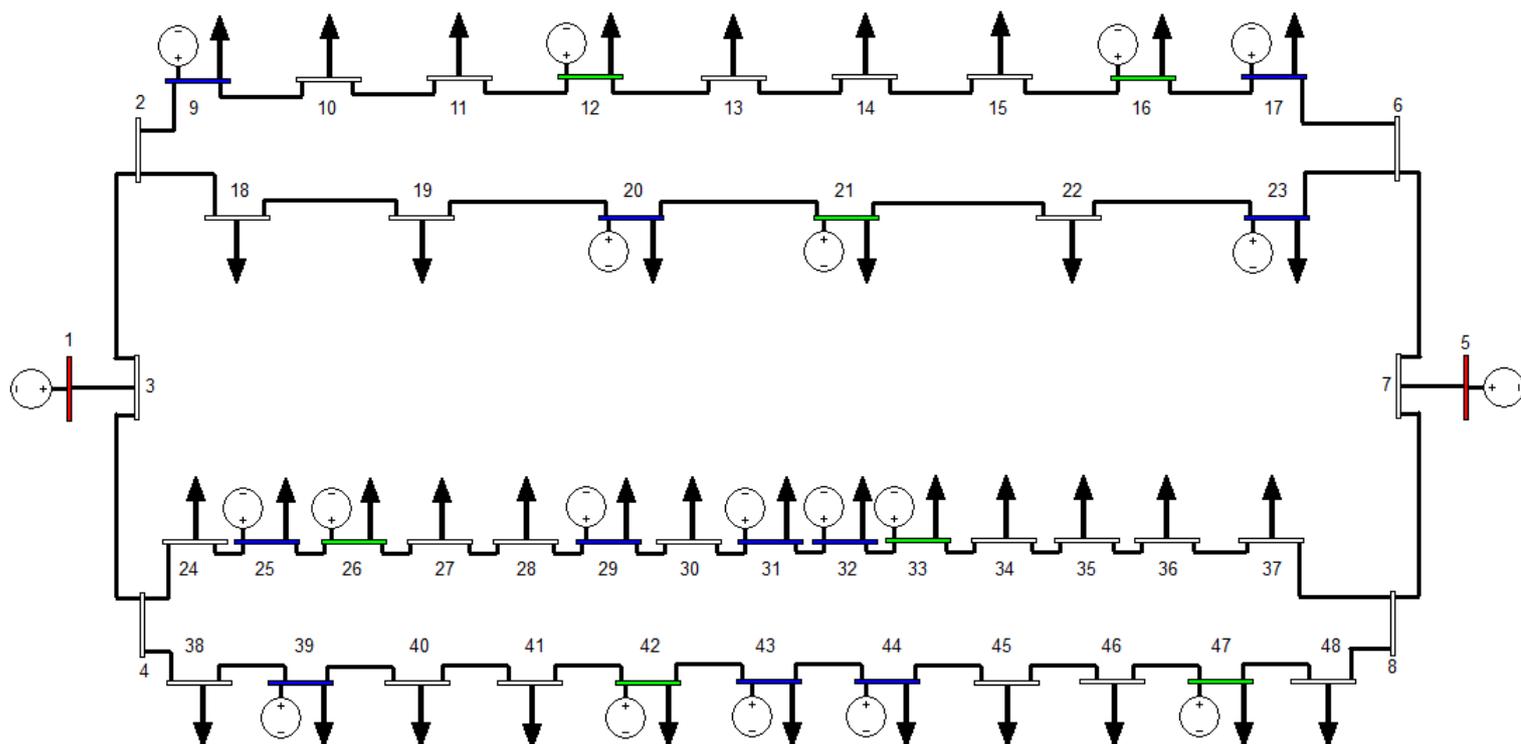


Figura 16: Microgrid DC

Fonte: autor

Os dados de barra do sistema estão mostrados no Apêndice C, enquanto os dados de linha estão mostrados no Apêndice D.

Nesta rede, foram realizados testes envolvendo topologias, variações de carga, variações de geração e casos com o sistema conectado à rede CA ou operando de forma independente (“microgrid ilhada”). Cada caso estudado será visto detalhadamente nas seções a seguir.

4.4.1 Teste 4.1: Testes de Topologia

Nos testes de topologia, teve-se como objetivo verificar a diferença de comportamento entre uma microgrid de característica radial e uma com característica de malha. No algoritmo, estas topologias podem ser testadas modificando o status de operação de algumas linhas, conforme a tabela 12 (onde 1 indica uma linha ligada e 0 indica uma linha desligada).

Ramo	De	Para	Status (Radial)	Status (Malha)
4	7	5	1	0
11	6	17	0	1
12	6	23	0	1
13	8	37	0	1
14	8	48	0	1

Tabela 12: Teste 4.1 - Status dos Ramos Chaveáveis por Topologia

Fonte: autor

Para estes testes, a microgrid estava conectada à rede CA através de uma das conexões (ramo 1).

Os resultados foram avaliados através dos resultados de tensão e potência gerada por barra, além das perdas totais do sistema.

A respeito das tensões de barra, foi feito um gráfico comparando as tensões de barra entre os casos radial e malhado, que pode ser visto na figura 17.

Pode-se observar que, quando houve casos mais extremos, o sistema em malha obteve resultados melhores (com destaque às barras 34 à 37, no final do 3° alimentador, com uma tensão de 0,905945 pu na barra 37 para o sistema radial).

Houve algumas exceções, como nas barras 29 a 33, onde o sistema radial ficou mais próximo de 1 pu, bem como na barra 48.

Analisando a variância das tensões, chegou-se a conclusão de que o sistema em malha, cuja variância é 0,000262, é mais eficaz em manter as tensões estáveis do que um sistema radial (cuja variância, nos testes realizados, foi de 0,000765).

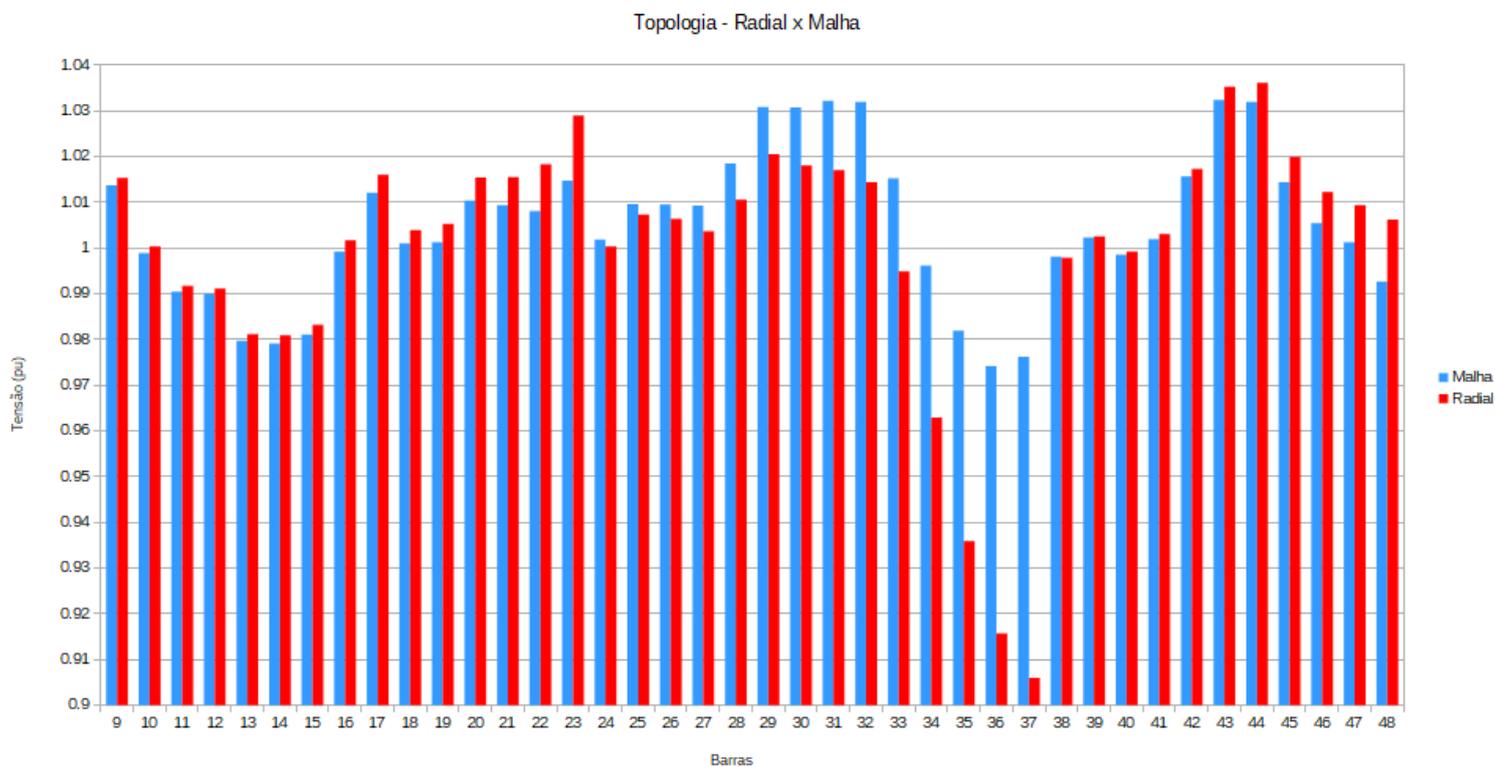


Figura 17: Teste 4.1 - Tensões de Barra por Topologia

Fonte: autor

No caso da geração, os dados para as barras droop e para o ponto de conexão estão mostrados na figura 18, comparando os dois sistemas (radial e malhado).

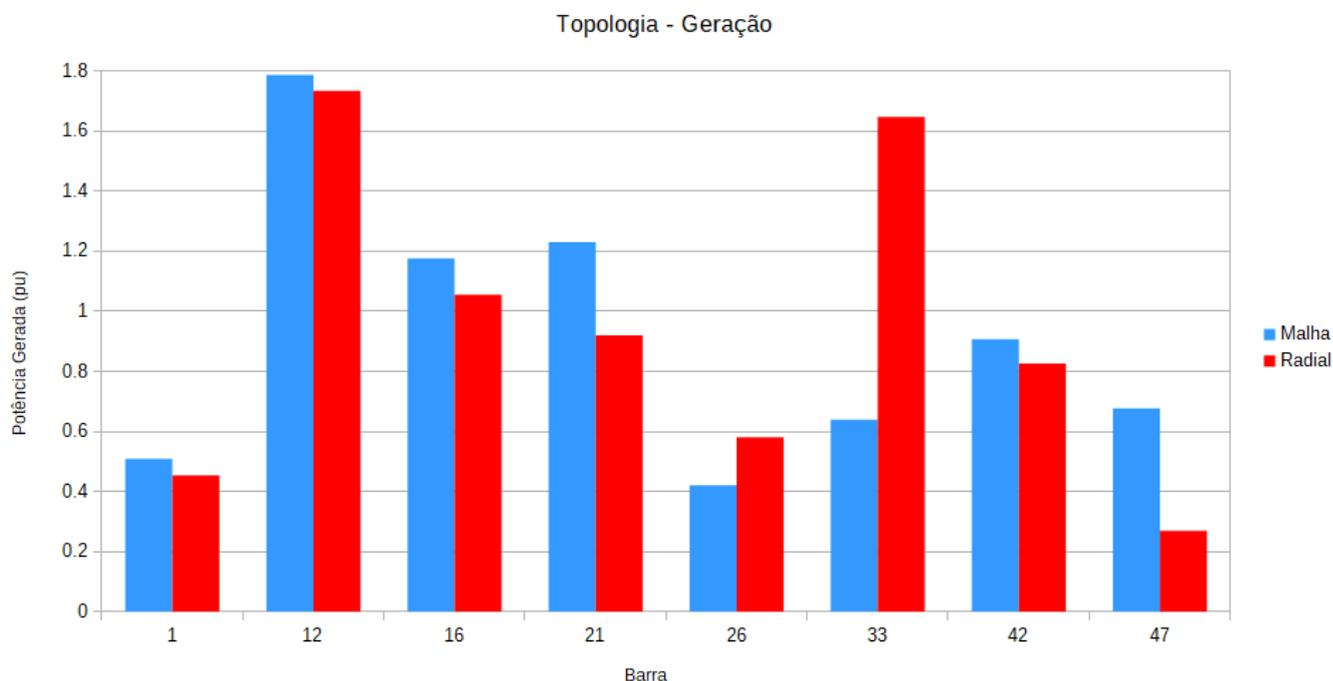


Figura 18: Teste 4.1 - Geração por Topologia

Fonte: autor

Por fim, comparou-se as perdas de cada sistema. As perdas foram maiores para o sistema radial, as quais totalizaram 0,506834 pu (contra 0,367293 pu para o sistema em malha).

4.4.2 Teste 4.2: Testes de Conexão com a Rede

Neste estudo, verificou-se o comportamento da microgrid no que diz respeito ao estado de conexão com a rede, modelando-a através de uma barra de tensão constante. Para isso, foram feitos 3 testes: sem conexão (sistema ilhado), com uma conexão (linha 1) e com duas conexões (linhas 1 e 4). Todos estes testes foram feitos com a microgrid operando em malha.

Observou-se as tensões de barra e as perdas para cada caso.

Para as tensões, cujo gráfico obtido está mostrado na figura 19, observou-se que a conexão com o sistema fez com que as tensões aumentassem levemente, aliviando um pouco as situações de subtensão e potencializando sobretensões.

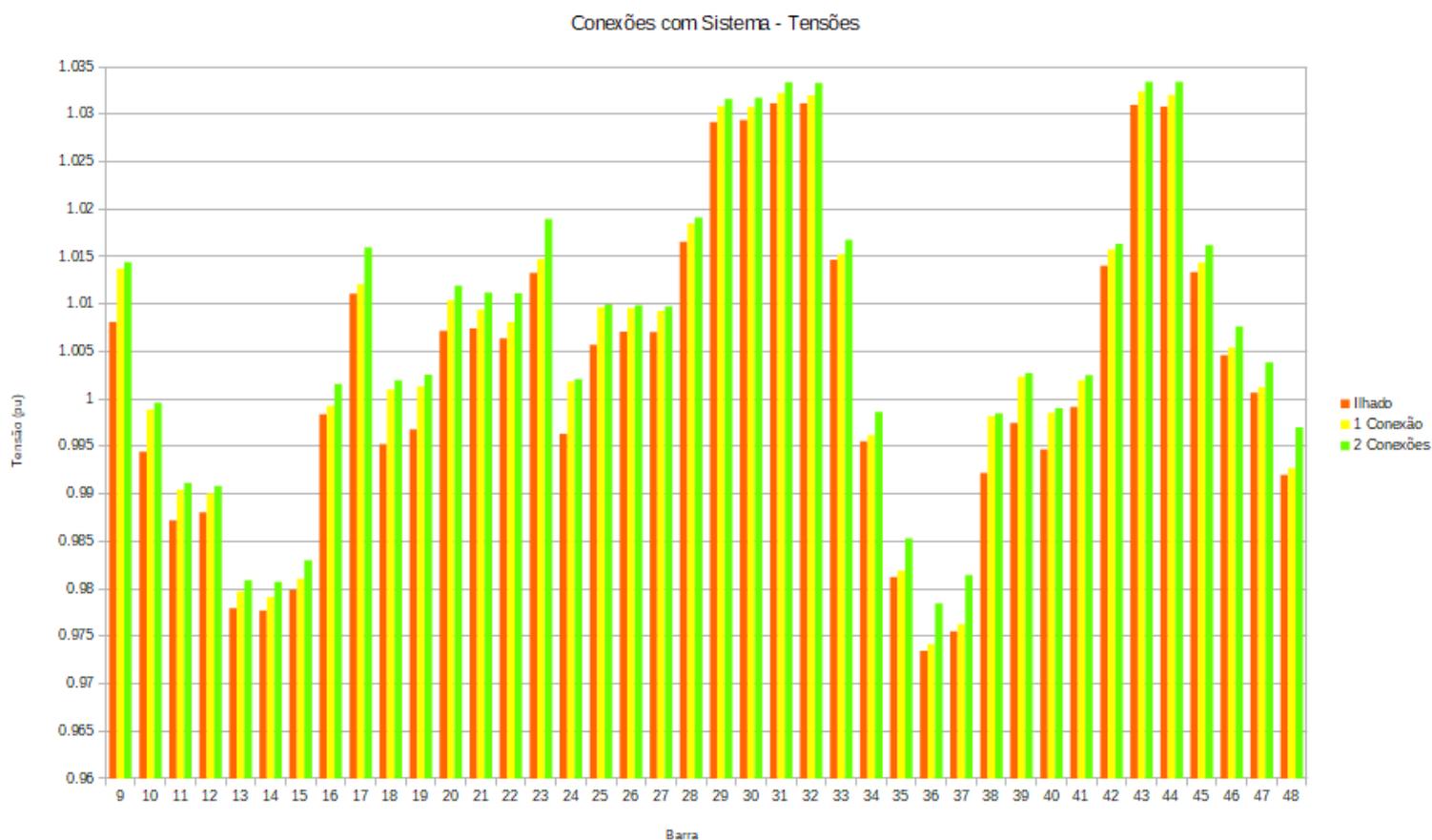


Figura 19: Teste 4.2 - Tensão para o teste de Conexão com a Rede CA

Fonte: autor

No que diz respeito às perdas, verificou-se que elas reduziram sutilmente com o aumento de conexões, conforme a tabela 13.

Sistema	Perdas (pu)
Ilhado	0,369460
1 Conexão	0,367293
2 Conexões	0,361854

Tabela 13: Teste 4.2 - Perdas por caso

Fonte: autor

4.4.3 Teste 4.3: Testes de Variação de Carga

Neste caso de estudo, verificou-se o comportamento do sistema frente a variações de carga, com o sistema em ilha e em malha. Para cada caso, avaliou-se as tensões de barra, a geração e as perdas totais do sistema.

O sistema foi avaliado em 3 patamares de carga: leve, nominal e pesada. A situação nominal utiliza os dados originais do sistema ilhado. A situação de carga leve aplica um valor igual a 62,5% do valor nominal na demanda de todas as barras, enquanto a situação de carga pesada faz o mesmo, porém com um valor de 125%.

Para os resultados de tensão, os resultados obtidos estão concentrados no gráfico da figura 20.

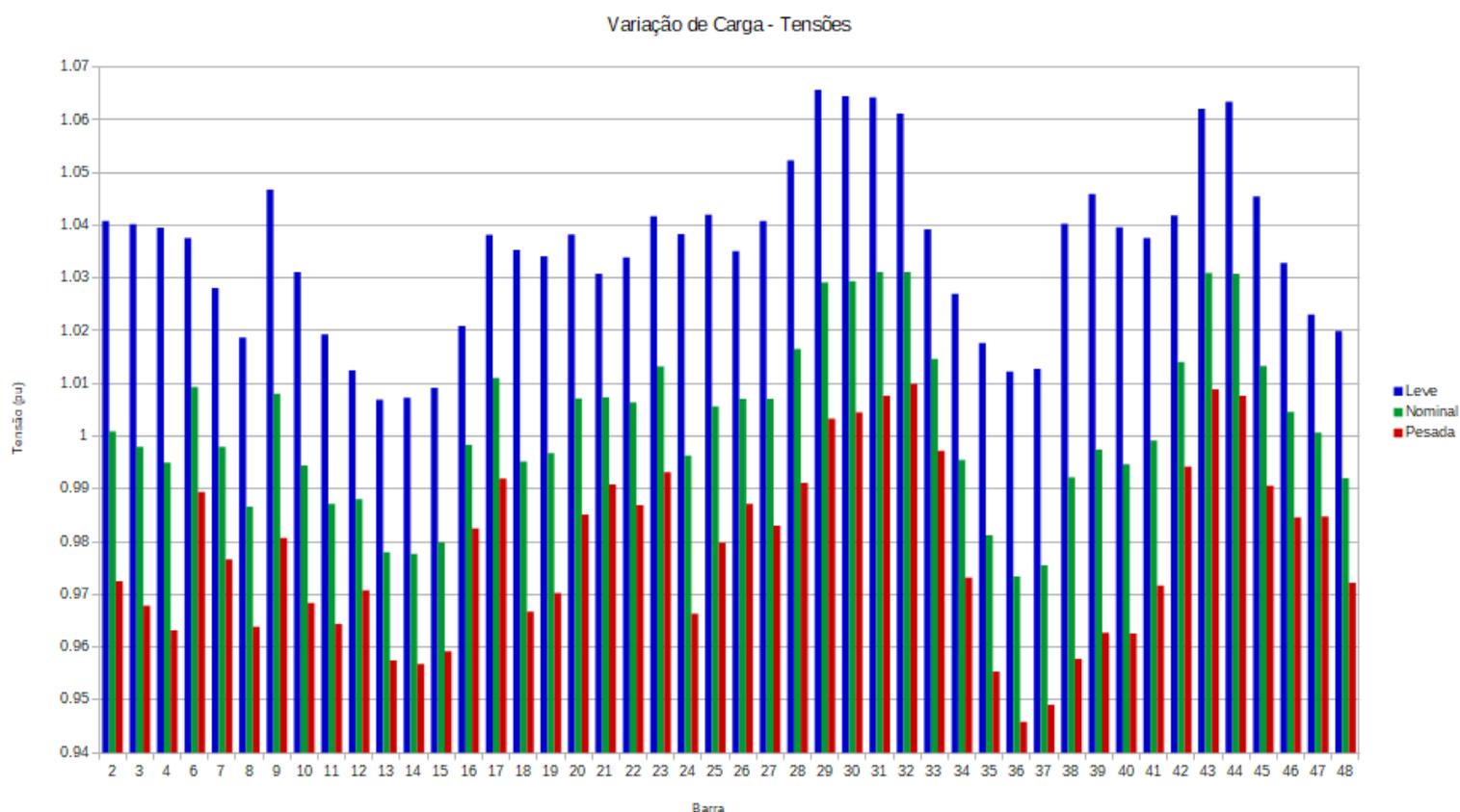


Figura 20: Teste 4.3 - Tensões por Patamar de Carga

Fonte: autor

Podemos notar que, na situação de carga leve, houve diversas situações de sobretensão, tendo 7 casos com valores superando 5% da tensão nominal. Por outro

lado, na situação de carga pesada, as tensões decaíram, mas apenas duas barras (36 e 37) tiveram uma subtensão abaixo de 5% do valor nominal.

No caso da geração, cujos dados estão mostrados na figura 21, notou-se um aumento significativo na geração das barras droop para o caso de carga pesada, na maioria dos casos superando em duas vezes a geração no caso nominal.

Entretanto, na situação de carga leve, com exceção do gerador da barra 12, observou-se geração negativa em todas elas. Como geração negativa indica demanda, conclui-se que estas barras estão absorvendo energia da rede em vez de fornecer, de forma a absorver o excesso de energia injetada pelas barras de potência constante.

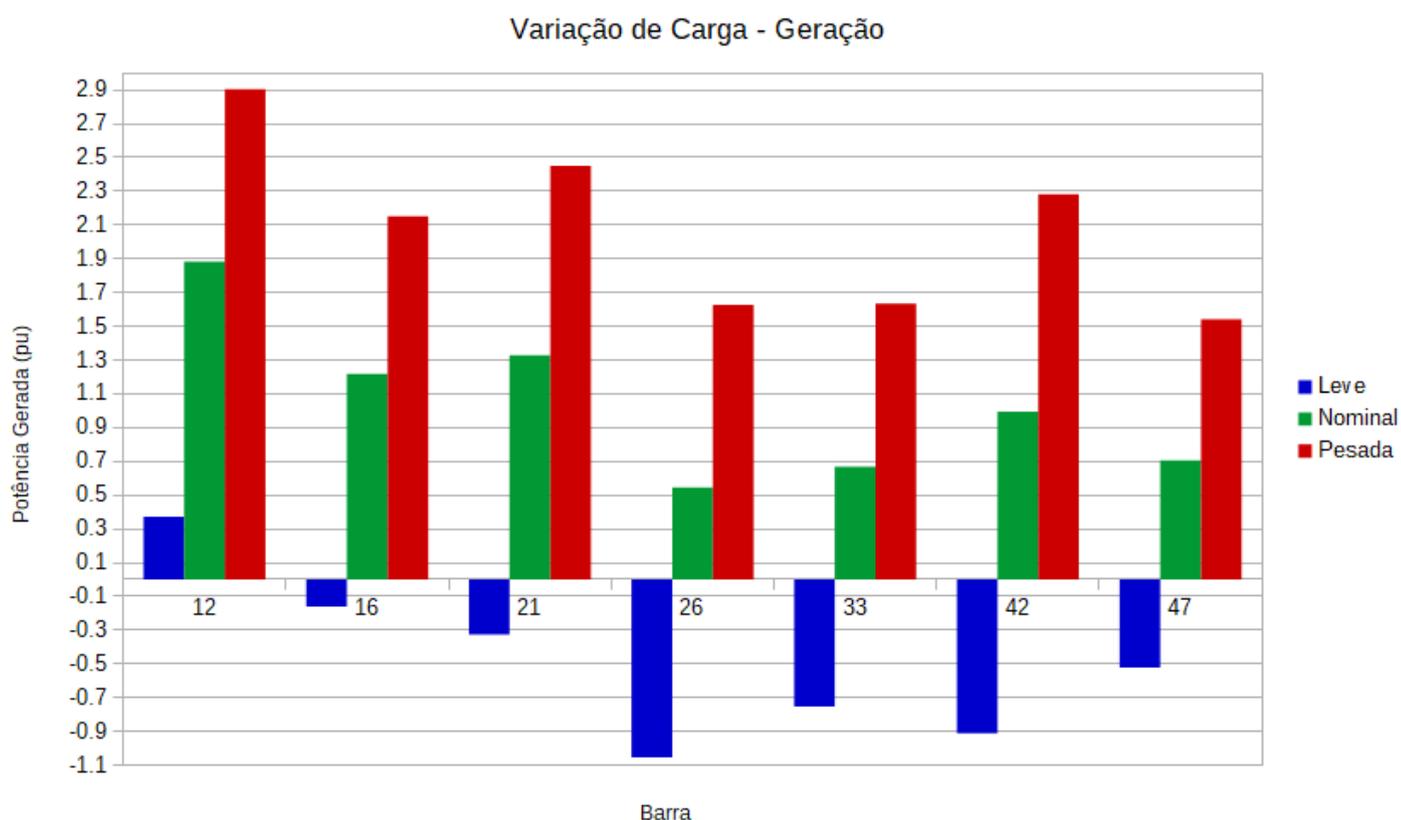


Figura 21: Teste 4.3 - Geração por Patamar de Carga

Fonte: autor

Por fim, as perdas observadas para cada caso estão mostradas na tabela 14. Como é esperado, as perdas tendem a aumentar com o aumento da carga.

Carga	Perdas (pu)
Leve	0,350621
Média	0,369460
Pesada	0,490592

Tabela 14: Teste 4.3 - Perdas por Patamar de Carga

Fonte: autor

4.4.4 Teste 4.4: Testes de Variação de Geração

Desta vez, a carga foi mantida em seu valor nominal, e a geração de todas as barras foi variada, também em 3 patamares: reduzida, normal e excesso. Para os casos de geração reduzida, aplicou-se um fator de 65% a todas as gerações fixas, enquanto para os casos de excesso, o fator aplicado foi de 130%.

Para este teste, também analisou-se tensões, geração e perdas totais, com a microgrid ilhada e em malha.

No caso das tensões, os resultados estão mostrados na figura 22. Os resultados obtidos foram parecidos com os resultados da variação de carga (o que é esperado), embora neste caso em especial, não se observou uma tensão abaixo de 5% da tensão nominal.

Isso também foi observado para a potência gerada nas barras droop (figura 23), onde novamente foi observado gerações negativas para estas barras (no caso de excesso de geração) e um aumento significativo na geração quando a geração reduziu nas barras de potência constante.

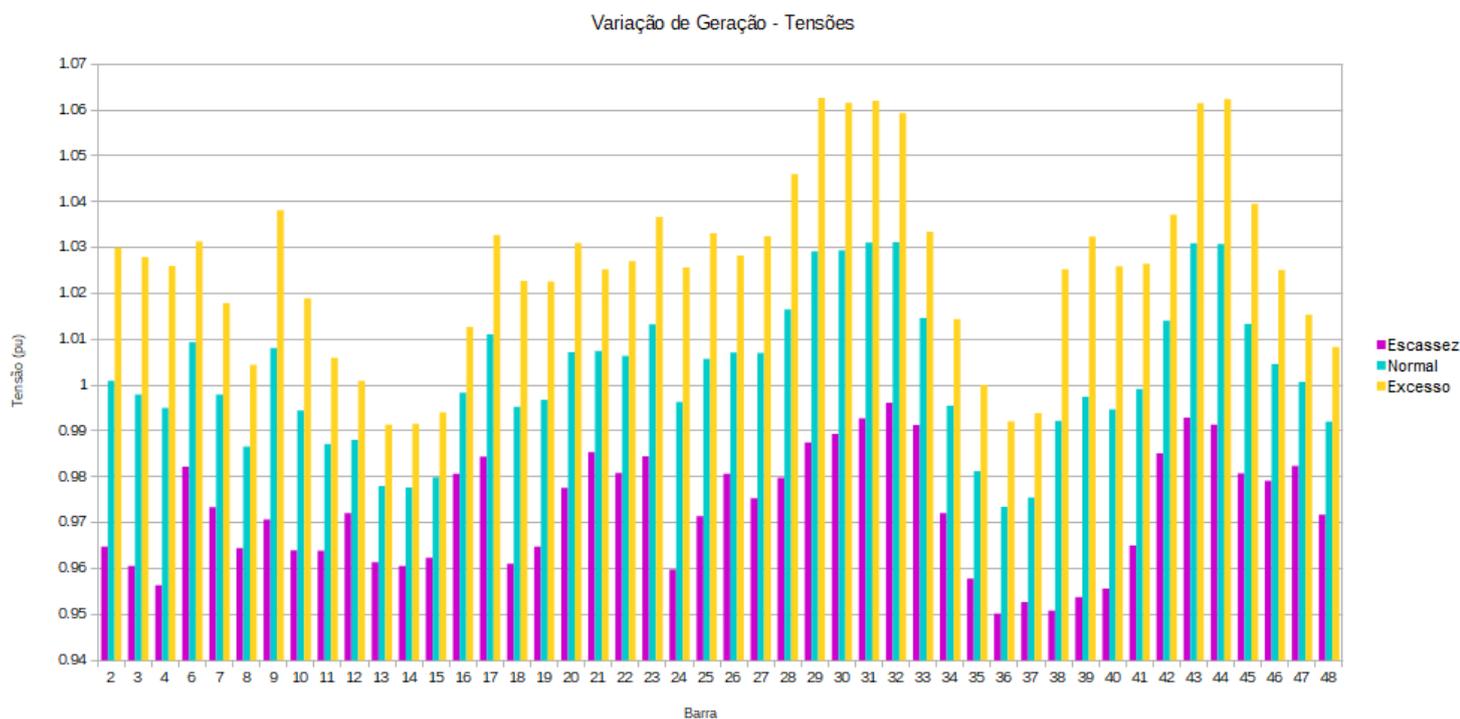


Figura 22: Teste 4.4 - Tensão por patamar de Geração

Fonte: autor

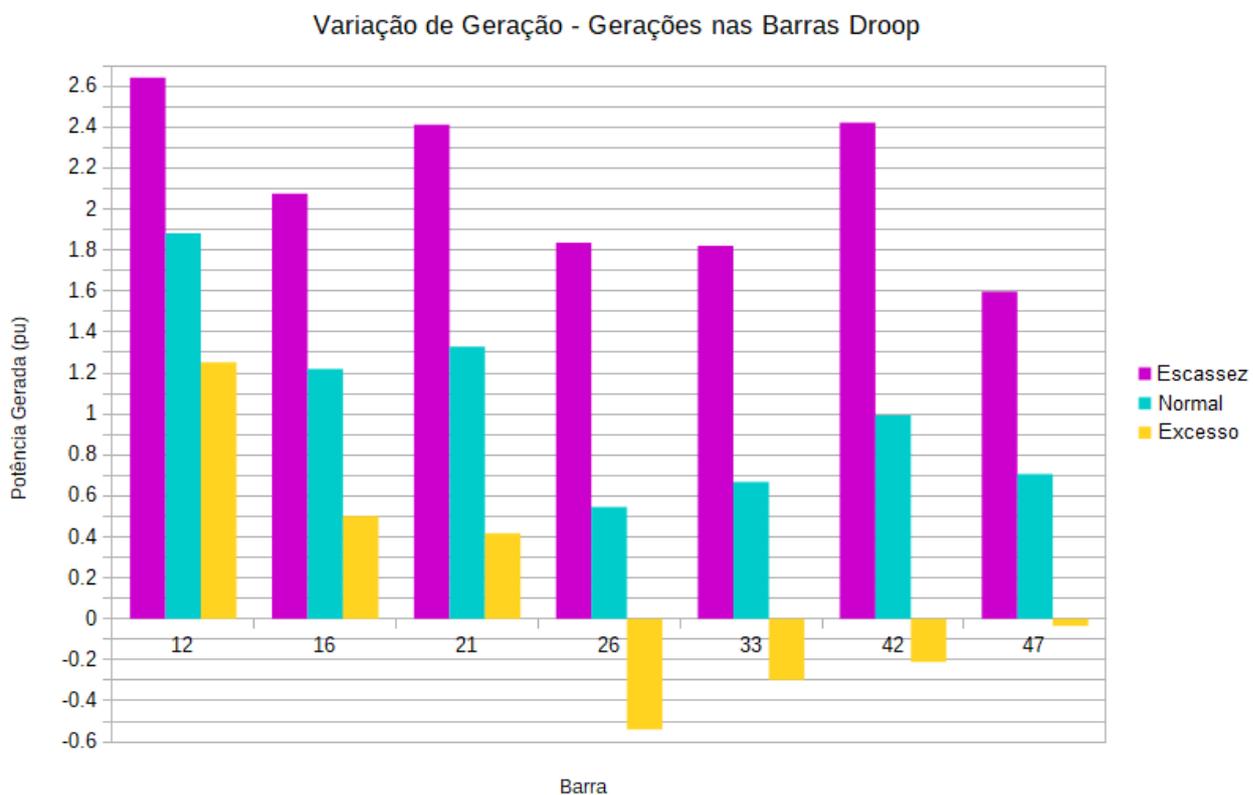


Figura 23: Teste 4.4 - Potência Gerada nas Barras Droop por Patamar de Geração

Fonte: autor

Por fim, as perdas para este caso estão mostradas na tabela 15, e elas tendem a diminuir com a redução da geração.

Geração	Perdas (pu)
Reduzida	0,307201
Normal	0,369460
Excesso	0,561456

Tabela 15: Teste 4.4 - Perdas por Patamar de Geração

Fonte: autor

4.4.5 Teste 4.5: Casos Especiais

Nesta etapa, estudamos 5 casos específicos, baseados na variação de patamares de carga e geração, sendo dois casos extremos e três tentativas de amenizar um deles. Novamente, a microgrid foi considerada ilhada e em topologia de malha.

No primeiro caso, há uma redução da geração e uma alta demanda (carga elevada). Neste caso, observou-se uma grande queda de tensão na maior parte do sistema, com grande parte das barras ficando abaixo de 0,95 pu. Os resultados de tensão para este caso estão mostrados na figura 24.

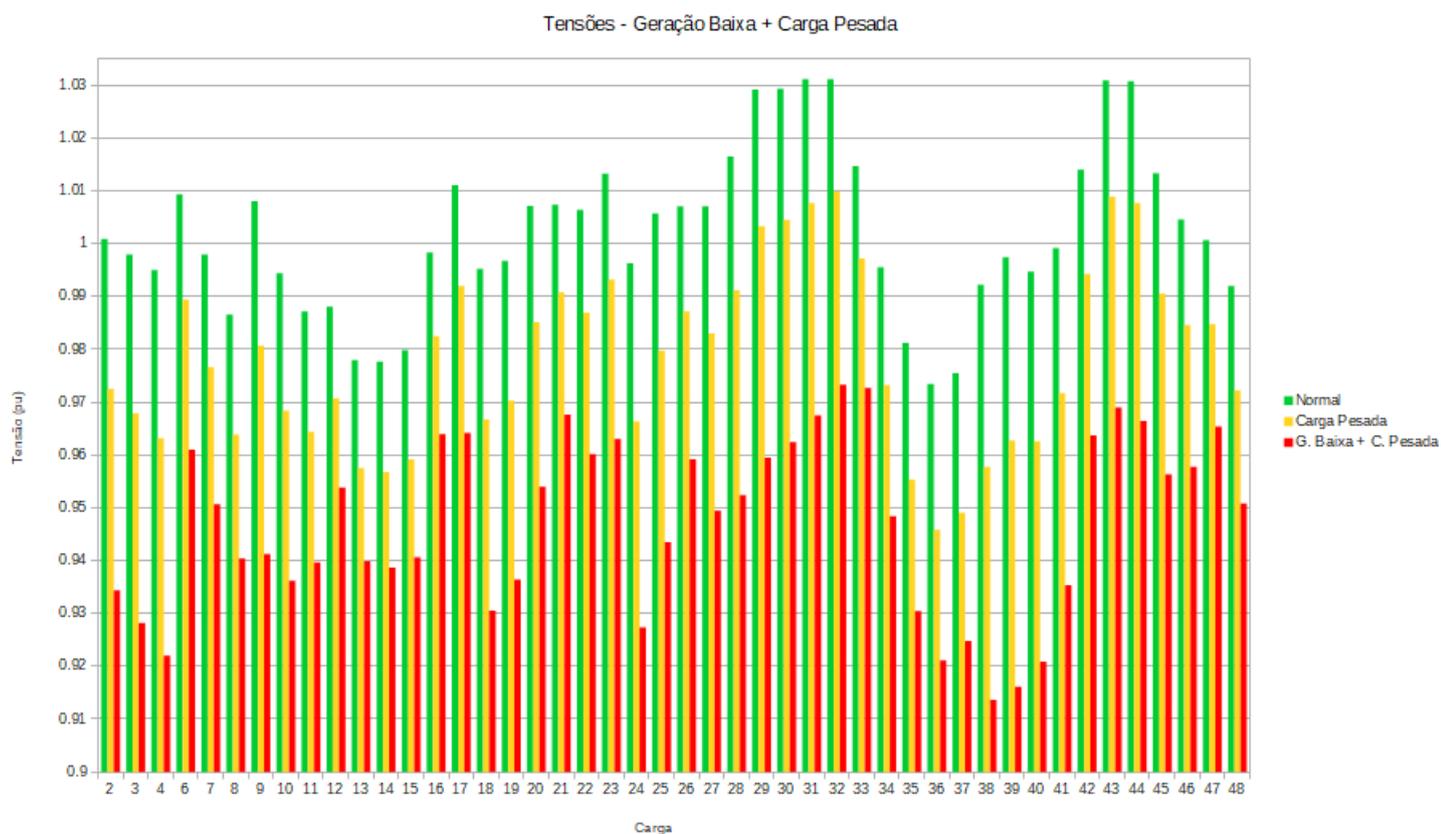


Figura 24: Teste 4.5.1 - Tensões para Carga Alta + Geração Baixa

Fonte: autor

Já para a geração, conforme a figura 25, observou-se um grande aumento na geração das barras com droop.

E por fim, as perdas totais para o caso com excesso de carga e falta de geração chegaram a 0,544079 pu.

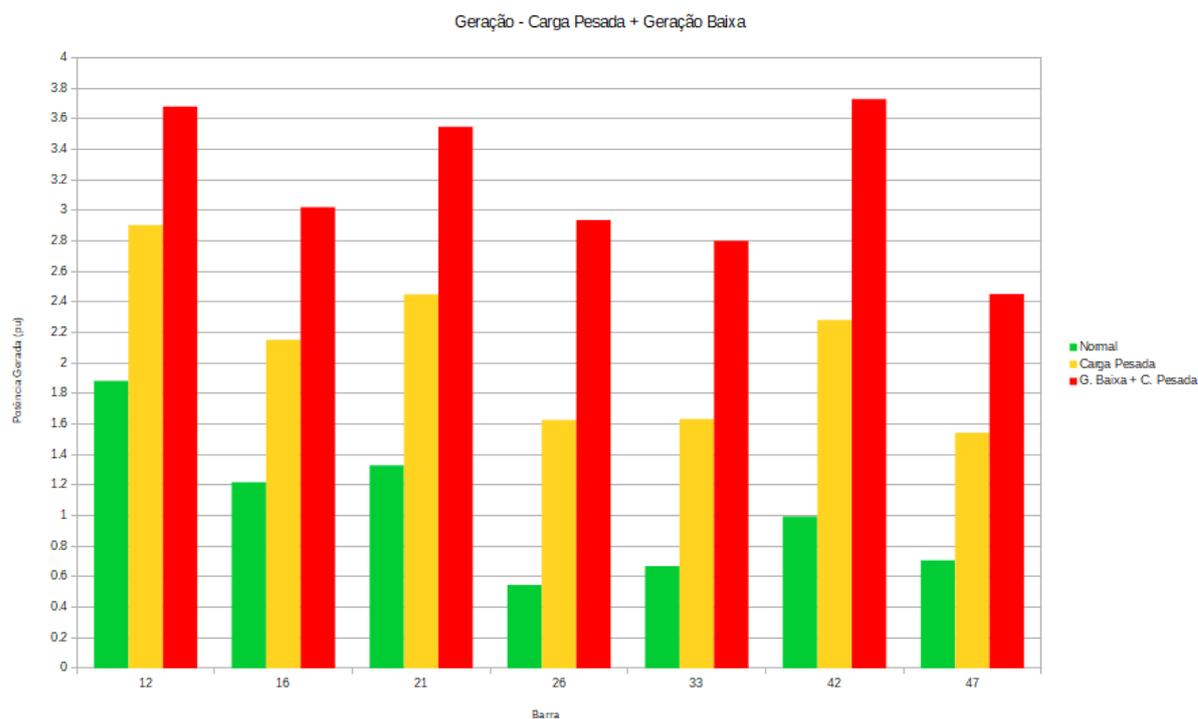


Figura 25: Teste 4.5.1 - Gerações para Carga Alta + Geração Baixa

Fonte: autor

O outro teste realizado visou atingir o outro extremo, com um excesso de geração e uma demanda baixa.

Neste caso, uma parcela significativa das tensões de barra (figura 26) ultrapassaram 1,05 pu.

Para a geração, verifica-se que o excesso de geração amplifica o efeito de absorção de energia da rede por parte das barras droop.

Para este caso, as perdas totais do sistema foram de 0,637890 pu.

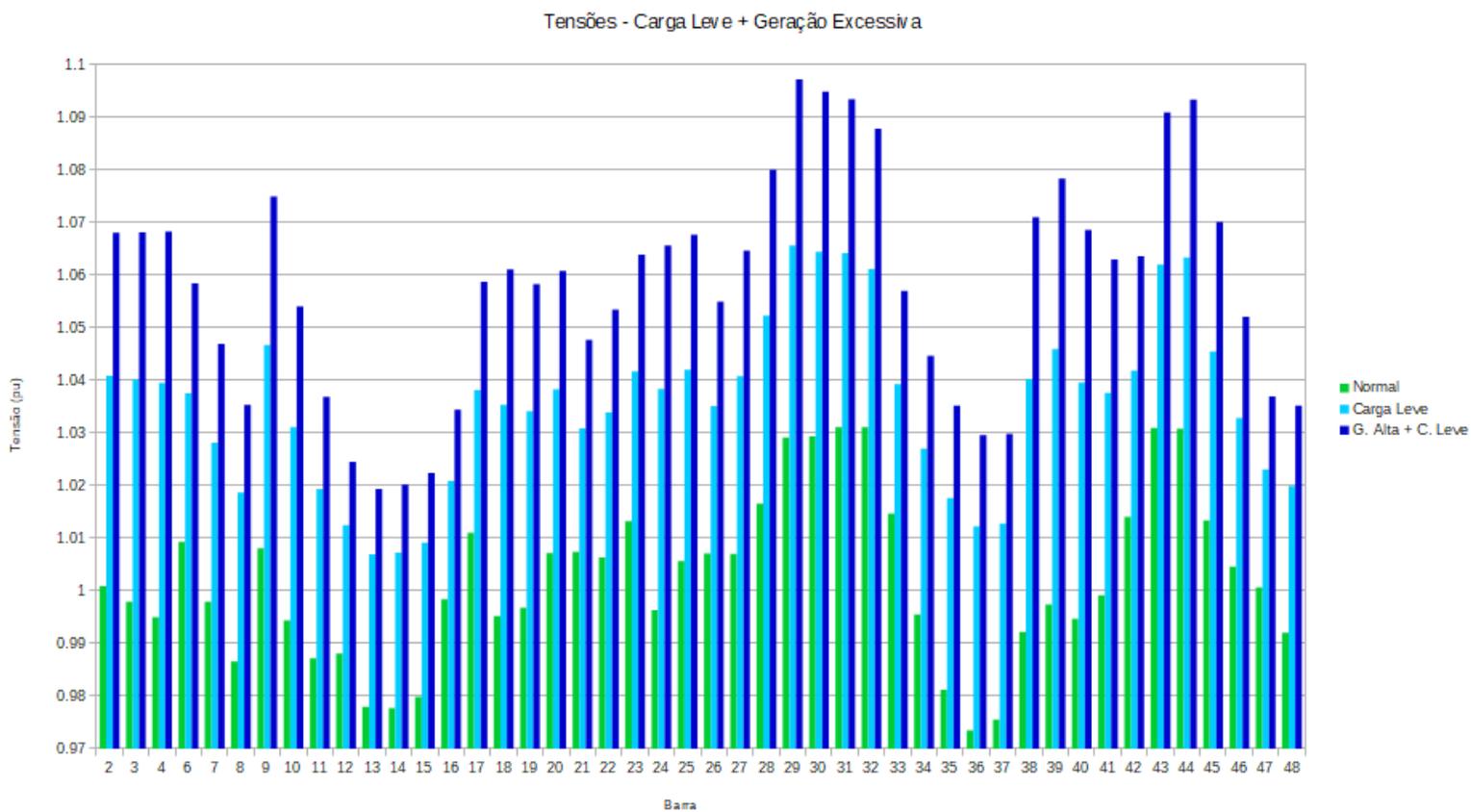


Figura 26: Teste 4.5.2 - Tensões para Carga Baixa + Geração Excessiva

Fonte: autor

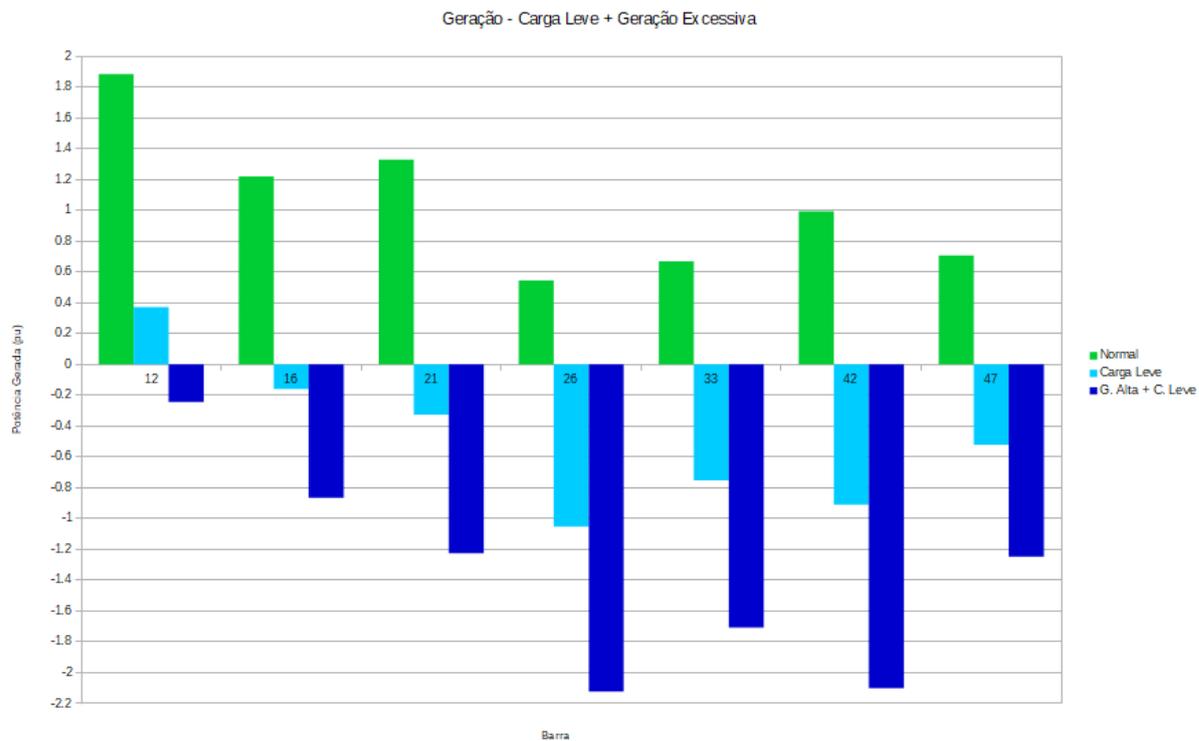


Figura 27: Teste 4.5.2 - Geração para Carga Baixa + Geração Excessiva

Fonte: autor

Uma vez que as barras droop apresentaram uma certa flexibilidade nas injeções de potências durante os testes realizados, podendo cumprir papéis de absorver ou entregar energia, é de se esperar que tais barras sejam propícias para modelar sistemas de armazenamento nesta microgrid.

Sendo assim, o último teste desta seção visa setar todas as barras droop como barras de tensão constantes com folga na demanda, simulando como se o sistema pudesse entrar como uma barra de tensão constante para o caso de se detectar violações por excesso de tensão na vizinhança. Portanto, neste teste, todas as barras droop foram modeladas como barras de tensão constante, com os dados de tensão e geração de acordo com a tabela 16.

Barra	Tensão (pu)	Geração (pu)
12	1	3
16	1,03	3
21	1,02	3
26	1	3
33	1	3
42	1	3
47	1	3

Tabela 16: Teste 4.5.3 - Valores de Tensão e Geração para as Antigas Barras Droop

Fonte: autor

Para este teste, serão observadas as tensões, as perdas e a demanda. As perdas totais do sistema aumentaram em relação aos casos anteriores, chegando a 0,690023 pu.

Já as tensões melhoraram significativamente, como pode ser visto na figura 28. Nenhuma tensão ficou fora da faixa entre 0,95 e 1,05 pu neste caso.

Por outro lado, como pode ser visto na figura 29, houve um aumento significativo na potência demandada em relação ao caso em que as barras eram droop.

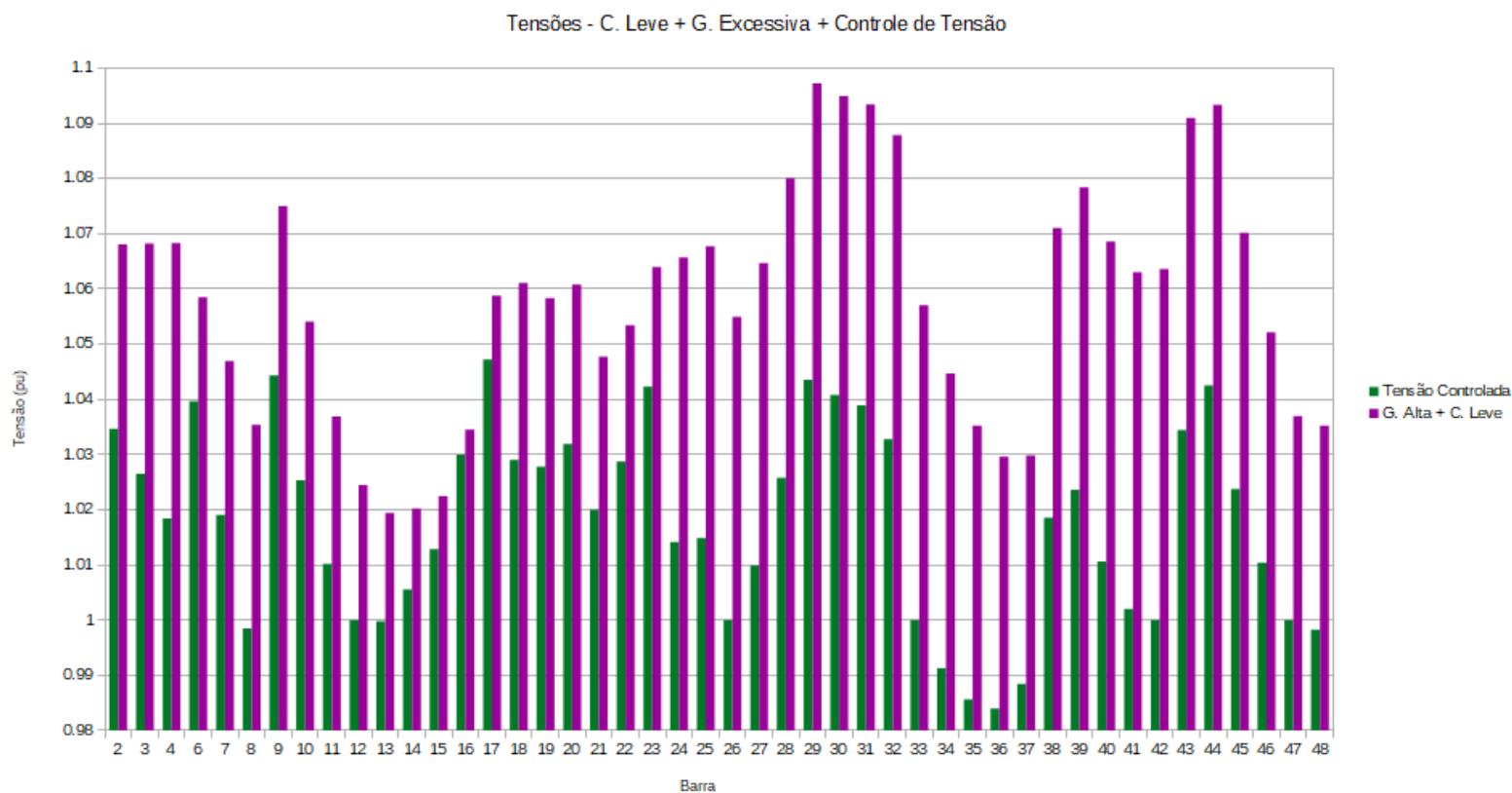


Figura 28: Teste 4.5.3 - Tensões para o caso com Tensões Controladas

Fonte: autor

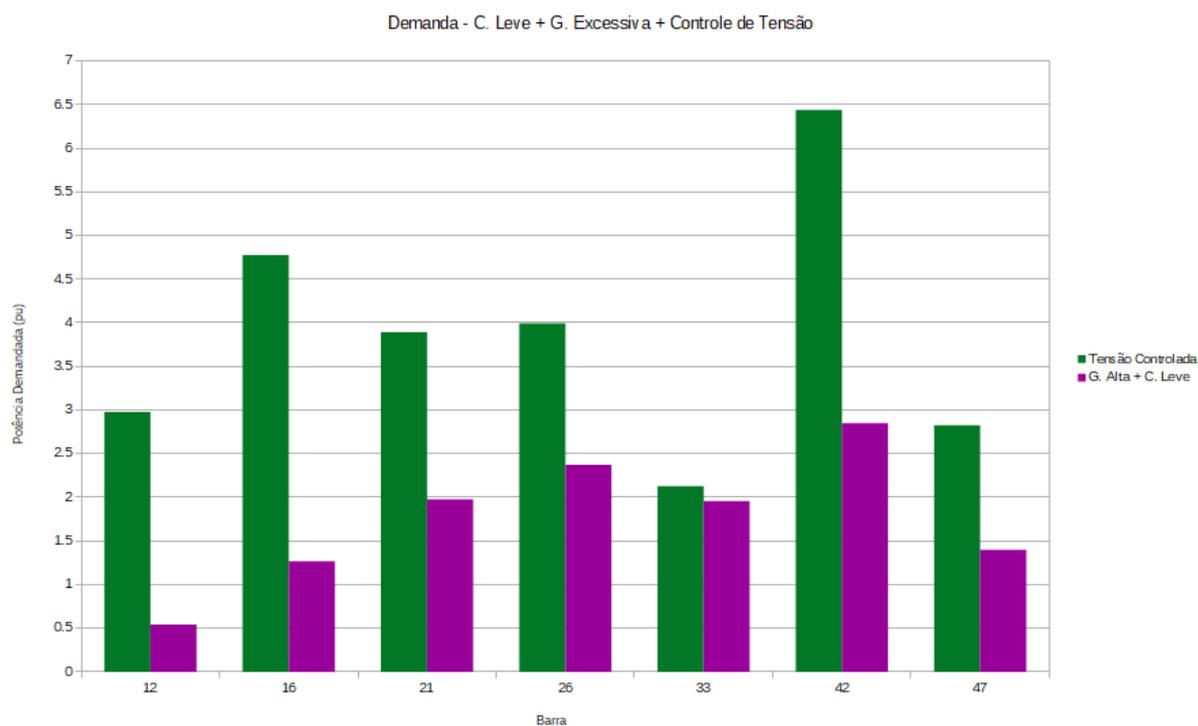


Figura 29: Teste 4.5.3 - Demandas para o caso com Tensões Controladas

Fonte: autor

Os dois últimos testes envolvem a microgrid conectada à rede através das duas conexões. No primeiro caso, tenta-se melhorar as tensões de barra da microgrid com excesso de carga e geração reduzida aumentando as tensões dos terminais de conexão, ambas com uma tensão de 1,05 pu. Os resultados obtidos estão mostrados na figura 30.

Pode-se observar que todas as tensões ficaram acima do nominal para este caso, embora as perdas tenham aumentado para 0,805270 pu.

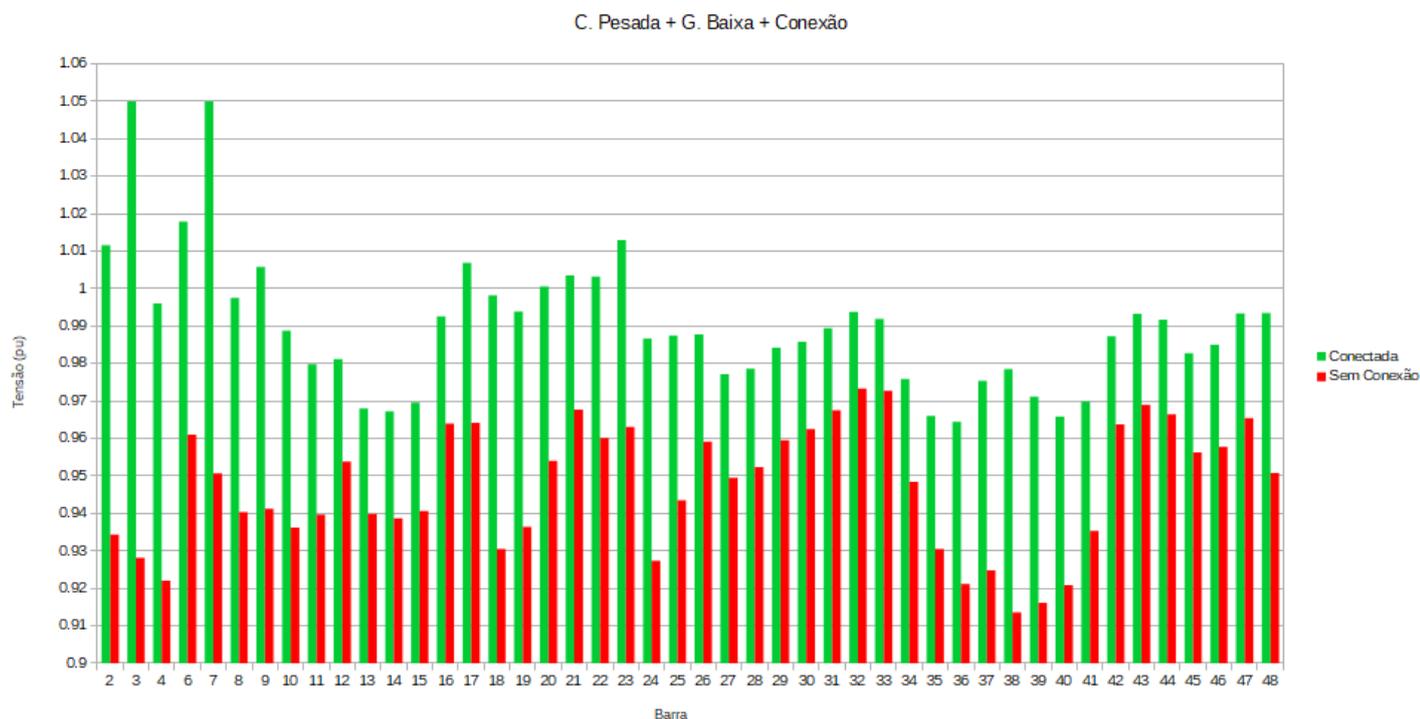


Figura 30: Teste 4.5.4 - Caso com Carga Pesada + Geração Reduzida conectada à Rede

Fonte: autor

Para o outro extremo (Carga Leve + Geração Excessiva), ajustou-se as tensões de conexão para 0,95 pu. Neste caso, os resultados de tensão obtidos estão mostrados na figura 31. Podemos notar que houve uma melhora no panorama, embora algumas barras continuassem violando o limite de 1,05 pu.

Já as perdas totais do sistema aumentaram para 1,173399 pu.

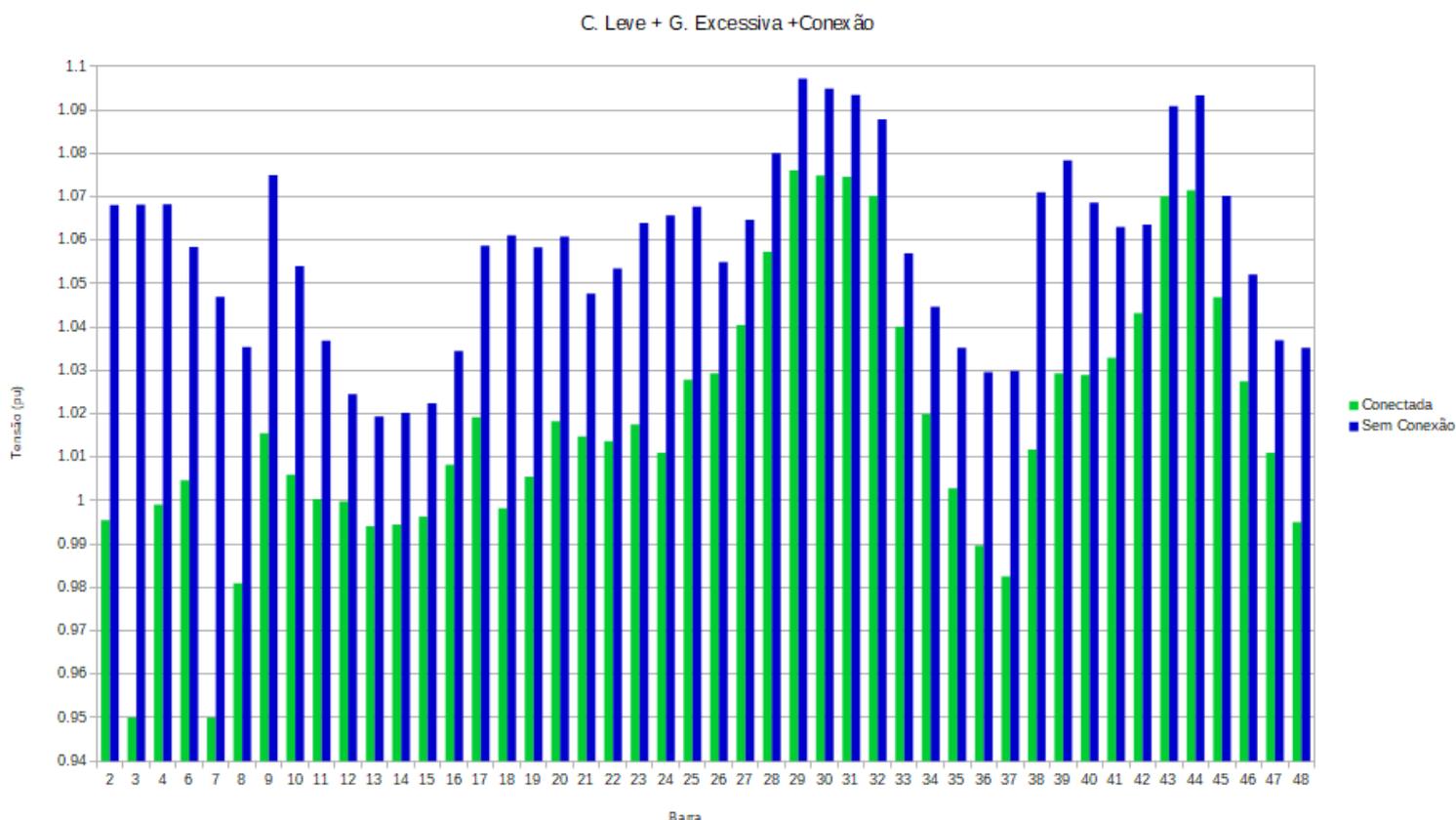


Figura 31: Teste 4.5.4 - Caso com Carga Leve + Geração Alta conectada à Rede

Fonte: autor

4.5 DISCUSSÃO DO MÉTODO (ALGORITMO) DESENVOLVIDO

A respeito do algoritmo criado, o principal aspecto de que se pode chamar atenção é a sua validação, uma vez que foi capaz de retornar os valores previstos pela teoria para um dado conjunto de informações de entradas, levando em conta os limites de tolerância dos métodos iterativos.

Isso refletiu em sua capacidade de avaliar inúmeros cenários de diferentes sistemas de potência em corrente contínua, desde sistemas de transmissão de alta-tensão até microgrids com patamares de tensão próximas aos níveis de consumo.

Em termos de desempenho, o algoritmo apresentou desempenho adequado, tendo levado 4 iterações para chegar ao resultado no pior cenário estudado.

Deve-se levar em conta que aprimoramentos no algoritmo são possíveis. Um exemplo é o fato de, a cada iteração, a matriz de derivadas ser efetivamente invertida (sabe-se que é possível usar decomposição de matrizes para se obter um desempenho computacional ainda melhor).

E por fim, pode-se destacar o fato do algoritmo ser desenvolvido em uma plataforma gratuita e open-source (GNU Octave), dispensando a necessidade de aquisição de uma licença para seu uso regular.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho se propôs a realizar um estudo sobre sistemas de potência em corrente contínua.

Neste sentido, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o panorama das redes de corrente contínua. Foi visto que as duas principais frentes das redes de potência nesse sentido são os sistemas de transmissão malhados em HVDC (*meshed HVDC*) e as *microgrids* em corrente contínua.

Em seguida, o foco do trabalho voltou-se ao problema de fluxo de potência, onde estudamos a formulação do problema clássico de fluxo de potência. Foi visto que este caso apresenta uma limitação em sistemas onde não existe uma barra de geração forte, capaz de manter sempre uma mesma tensão constante em seus terminais.

Dado este problema, partiu-se para a estratégia utilizando o controle droop. Esta abordagem permitiu eliminar a necessidade de uma barra de folga com tensão constante, permitindo criar simulações mais fiéis aos casos com microgrids operando de forma independente (“ilhadas”).

Em seguida, buscou-se implementar um método computacional capaz de receber os dados de um sistema elétrico em corrente contínua, processá-los utilizando o equacionamento estudado na revisão bibliográfica, resolvê-los através de uma abordagem matemática e retornar os resultados do problema de fluxo de potência. No tocante à abordagem matemática para resolução do sistema não-linear de equações, optou-se pelo método iterativo de Newton-Raphson.

Este método computacional foi implementado através da plataforma Octave.

Em seguida, utilizando como base resultados conhecidos, realizou-se simulações a fim de validar o funcionamento da ferramenta computacional.

Com o programa validado, avaliou-se o comportamento de diferentes cenários de redes CC, como contingências, variações de carga, variações de geração fixa e topologias. Na avaliação destes cenários, foram realçados diversos problemas que podem acontecer na operação de uma rede de corrente contínua. Destaca-se que o algoritmo desenvolvido mostrou-se sempre capaz de identificar essas condições operativas inadequadas, sendo muito útil também para avaliar ações corretivas que buscassem amenizar ou mesmo eliminar seus impactos.

Sendo assim, conclui-se que o objetivo geral deste trabalho foi atingido.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ROUZBEHI, Kumars; CANDELA, J. Ignacio; GHAREHPETIAN, Gevork B.; HARNEFORS, Lennart; LUNA, Alvaro; RODRIGUEZ, Pedro. “Multiterminal DC grids: Operating analogies to AC power systems”. ScienceDirect, 2016.

CALLAVIK, Magnus; BJÖRKLUND, Peter L. J. H. H.; DUGAL, Munaf R. F.. “Evolution of HVDC Light”. ABB, 2018.

WANG, Peng; GOEL, Lalit; LIU, Xiong; CHOO, Fook H.. “Harmonizing AC and DC”. IEEE, 2013.

FRANCK, Christian M.. “HVDC Circuit Breakers: A Review Identifying Future Research Needs”. IEEE, 2011.

HÄFNER, Jürgen; JACOBSON, Björn. “Proactive Hybrid HVDC Breakers - A key innovation for reliable HVDC grids”. The electric power system of the future - Integrating supergrids and microgrids International Symposium, 2011.

BARNES, Mike; HERTEM, Dirk Van; TEEUWSEN, Simon P.; CALLAVIK, “Magnus. HVDC Systems in Smart Grids”. IEEE, 2017.

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.

GOWTHAM, K.; HARIPRASATH, P.; SIVARAMADURAI, C. V.; INDURANI, B.. “A Management of power flow for DC Microgrid with Solar and Wind Energy Sources”. IEEE, 2018.

MONTOYA, Oscar D.; GONZÁLEZ, Gil; GARCÉS, Alejandro. “Optimal Power Flow on DC Microgrids: A Quadratic Convex Approximation”. IEEE, 2018.

LI, Chendan; CHAUDHARY, Sanjay K.; DRAGICEVIC, Tomislav; VASQUEZ, Juan C.; GUERRERO, Josep M.. “Power Flow analysis for DC voltage droop controlled DC Microgrids”. IEEE, 2014.

MONTICELLI, Alcir; GARCIA, Ariovaldo. “Introdução a Sistemas de Energia Elétrica”. Campinas - SP, 2ª edição, Ed. UNICAMP, 2011.

ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O.. “Fundamentos de Circuitos Elétricos”. Porto Alegre - RS, Bookman, 2003.

APÊNDICE A - SISTEMA HVDC: DADOS DE BARRA

Barra	Tipo	Geração	Demanda	Condutância Shunt	Tensão	V_{ref_droop}	R_{droop}
1	V	-	0	0	1,01	-	-
2	P	0	0,6	0	-	-	-
3	P	0	2	0	-	-	-
4	P	0	2,2	0	-	-	-
5	P	0	0	0	-	-	-
6	V	-	0	0	1,01	-	-
7	P	0	1,6	0	-	-	-
8	P	0	0	0	-	-	-
9	P	0	0	0	-	-	-
10	P	0	0	2	-	-	-
11	P	0	1	0	-	-	-
12	P	0	2,4	0	-	-	-
13	V	-	0	0	1,01	-	-
14	P	0	0	0	-	-	-
15	P	0	0	10	-	-	-
16	P	0	0	0	-	-	-
17	V	-	0	0	1,01	-	-
18	P	0	4	0	-	-	-
19	P	0	0	0	-	-	-
20	V	-	0	0	1,01	-	-
21	P	0	2	0	-	-	-
22	P	0	1,6	0	-	-	-
23	P	0	1,4	0	-	-	-
24	P	0	2	0	-	-	-
25	P	0	0	0	-	-	-
26	P	0	2	0	-	-	-
27	P	0	2,4	0	-	-	-
28	P	0	1,6	0	-	-	-
29	P	0	2,6	0	-	-	-
30	P	0	0	0,8	-	-	-
31	V	-	0	0	1,01	-	-

32	D	-	0	0	-	1	0,001
33	V	-	0	0	1,01	-	-
34	P	0	0	0	-	-	-
35	P	0	0	4	-	-	-
36	D	-	0	0	-	1	0,001
37	P	0	0	0	-	-	-
38	V	-	0	0	1,01	-	-
39	P	0	2,2	0	-	-	-
40	P	0	0	2	-	-	-
41	D	-	0	0	-	1	0,001
42	P	0	1	0	-	-	-
43	P	0	2	0	-	-	-
44	P	0	0	0	-	-	-
45	V	0	0	0	1,01	-	-

Valores de tensão, potência e resistência estão em pu.

Legenda:

P – Barra de Potência Constante

V – Barra de Tensão Constante

D – Barra Droop

APÊNDICE B - SISTEMA HVDC: DADOS DE LINHA

Índice	De	Para	R(pu)
1	1	2	0,00001
3	2	3	0,010021
4	3	4	0,012934
5	3	7	0,004684
6	3	11	0,006025
7	4	5	0,003730
9	4	11	0,003223
10	5	6	0,00001
11	5	12	0,004561
13	7	8	0,002074
14	7	14	0,007474
16	8	9	0,002425
17	8	15	0,004546
18	8	23	0,003534
19	9	10	0,002848
20	9	15	0,003596
21	10	11	0,005646
22	10	15	0,003273
23	10	27	0,005163
24	11	16	0,006447
25	12	18	0,004203
26	12	19	0,003445
27	13	14	0,00001
28	14	22	0,002515
29	15	23	0,004159
30	15	25	0,00235
31	15	27	0,003662
32	16	17	0,00001
33	16	28	0,005093
34	18	19	0,002872
35	18	29	0,006145
37	18	30	0,004003

38	19	20	0,00001
39	21	22	0,003987
40	22	23	0,005512
41	22	24	0,004239
42	23	25	0,003322
43	24	26	0,0073
44	24	34	0,006867
45	25	27	0,003392
46	26	32	0,004271
47	26	37	0,003811
48	27	28	0,004278
49	29	30	0,004221
50	29	32	0,005325
51	30	31	0,00001
52	33	34	0,00001
53	34	35	0,00723
54	35	36	0,003037
55	36	37	0,001977
56	37	38	0,00001
57	37	39	0,005224
58	39	40	0,002716
59	40	41	0,001578
60	40	42	0,002072
62	42	43	0,002717
63	43	44	0,002162
64	44	45	0,00001
65	16	27	0,003102
68	28	29	0,005542
69	26	25	0,001974
Obs: o sistema original possui mais linhas, as quais não foram utilizadas neste teste e estão omitidas nesta tabela. Entretanto, a indexação original foi mantida, o que explica alguns índices omissos (ex: 61, 66, 67...).			

APÊNDICE C - MICROGRID DC: DADOS DE BARRA

Barra	Tipo	Geração	Demanda	Tensão	V_{ref_droop}	R_d
1	V	-	0	1,01	-	-
2	P	0	0	-	-	-
3	P	0	0	-	-	-
4	P	0	0	-	-	-
5	V	-	0	1,01	-	-
6	P	0	0	-	-	-
7	P	0	0	-	-	-
8	P	0	0	-	-	-
9	P	2,5	0,4	-	-	-
10	P	0	0,64	-	-	-
11	P	0	0,8	-	-	-
12	D	-	0,8	-	1,01	0,02
13	P	0	0,96	-	-	-
14	P	0	0,24	-	-	-
15	P	0	1,6	-	-	-
16	D	-	0,64	-	1,01	0,02
17	P	2,5	1,04	-	-	-
18	P	0	0,72	-	-	-
19	P	0	0,88	-	-	-
20	P	1,5	0,48	-	-	-
21	D	-	1,2	-	1,01	0,02
22	P	0	0,8	-	-	-
23	P	1,5	0,4	-	-	-
24	P	0	0,8	-	-	-
25	P	1,6	0,8	-	-	-
26	D	0	0,4	-	1,01	0,02
27	P	0	0,96	-	-	-
28	P	0	0,32	-	-	-
29	P	2	0,72	-	-	-
30	P	0	0,16	-	-	-
31	P	0,5	0,32	-	-	-

32	P	2,5	0,8	-	-	-
33	D	-	0,4	-	1,02	0,02
34	P	-	0,48	-	-	-
35	P	0	0,64	-	-	-
36	P	0	0,96	-	-	-
37	P	0	0,88	-	-	-
38	P	0	0,8	-	-	-
39	P	2	1,2	-	-	-
40	P	0	0,72	-	-	-
41	P	0	1,04	-	-	-
42	D	-	1,2	-	1,01	0,02
43	P	2,4	0,64	-	-	-
44	P	2,5	0,72	-	-	-
45	P	0	0,88	-	-	-
46	P	0	0,48	-	-	-
47	D	-	0,24	-	1,01	0,02
48	P	0	0,32	-	-	-

APÊNDICE D - MICROGRID DC: DADOS DE LINHA

Ramo	De	Para	R (pu)
1	3	1	0
2	3	2	0,02
3	3	4	0,02
4	7	5	0
5	7	6	0,02
6	7	8	0,02
7	2	9	0,01
8	2	18	0,01
9	4	24	0,01
10	4	38	0,01
11	6	17	0,01
12	6	23	0,01
13	8	37	0,01
14	8	48	0,01
15	9	10	0,01
16	10	11	0,01
17	11	12	0,01
18	12	13	0,01
19	13	14	0,01
20	14	15	0,01
21	15	16	0,01
22	16	17	0,01
23	18	19	0,01
24	19	20	0,01
25	20	21	0,01
26	21	22	0,01
27	22	23	0,01
28	24	25	0,01
29	25	26	0,01
30	26	27	0,01
31	27	28	0,01
32	28	29	0,01

33	29	30	0,01
34	30	31	0,01
35	31	32	0,01
36	32	33	0,01
37	33	34	0,01
38	34	35	0,01
39	35	36	0,01
40	36	37	0,01
41	38	39	0,01
42	39	40	0,01
43	40	41	0,01
44	41	42	0,01
45	42	43	0,01
46	43	44	0,01
47	44	45	0,01
48	45	46	0,01
49	46	47	0,01
50	47	48	0,01