



Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEL

Associação ampla UFSJ / CEFET-MG

Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico para Minimização do Corte de Carga em Microrredes Ilhadas considerando Incertezas via Transformação Unscented

Jurandir Soares de Oliveira

Orientador: Prof. Wesley Peres, D.Sc.

São João del-Rei, 08 de dezembro de 2023.

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O48f Oliveira, Jurandir Soares de.
Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico para
Minimização do Corte de Carga em Microrredes Ilhadas
considerando Incertezas via Transformação Unscented /
Jurandir Soares de Oliveira ; orientador Wesley
Peres. -- São João del-Rei, 2023.
66 p.

Dissertação (Mestrado - Engenharia Elétrica) --
Universidade Federal de São João del-Rei, 2023.

1. Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico. 2.
Transformação Unscented. 3. Microrredes Ilhadas. 4.
Minimização do Corte de Carga. 5. Incertezas. I.
Peres, Wesley, orient. II. Título.



Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEL

Associação ampla UFSJ / CEFET-MG

Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico para Minimização do Corte de Carga em Microrredes Ilhadas considerando Incertezas via Transformação Unscented

Jurandir Soares de Oliveira

Dissertação apresentada à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, associação ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Wesley Peres, D.Sc.

São João del-Rei, 08 de dezembro de 2023.

Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico para Minimização do Corte de Carga em Microrredes Ilhadas considerando Incertezas via Transformação Unscented

Jurandir Soares de Oliveira

Dissertação apresentada à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, associação ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Apresentada em 08 de dezembro de 2023:

Prof. Wesley Peres, D.Sc. (Orientador)

Universidade Federal de São João del-Rei

Prof. Thiago Jose Masseran Antunes Parreiras, D.Sc.

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Heverton Augusto Pereira, D.Sc.

Universidade Federal de Viçosa

Prof. Raphael Paulo Braga Poubel, D.Sc.

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

São João del-Rei, 08 de dezembro de 2023.

Dedico este trabalho a minha amada, Pyetra Amorim, pois sua garra muito me ensina.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, Professor Wesley, por me proporcionar uma experiência de aprendizado única e gratificante. Sua inestimável orientação deste trabalho, pela paciência, pelo estímulo e exemplo de profissionalismo, colaborativismo e companherismo, que o fazem um educador exemplar.

Agradeço aos meus pais, Jurandir e Orlinda, pelo suporte durante boa parte de minha aventura acadêmica, tal base foi essencial para que chegasse até aqui.

Aos meus amigos da Universidade Federal de São João del-Rei, em especial Pedro, que sempre foi companheiro na jornada acadêmica, desde os tempos de graduação.

A minha grande inspiração, avó Taninha, que não me deixou desistir do sonho de estudar.

Agradeço ao meu amor, Pyettra Amorim pelo incentivo e dedicação, minha sincera gratidão por todo o apoio e incentivo que tem me dado. Sua presença é um verdadeiro tesouro.

Por fim, agradeço à UFSJ, CNPq, FAPEMIG, CAPES e outras instituições de fomento pelo importante papel que desempenham na valorização da pesquisa nacional.

"Eu prefiro ter perguntas que não podem ser respondidas a ter respostas que não podem ser questionadas."

Richard Feynman

Resumo

Esse trabalho apresenta uma metodologia de fluxo de potência ótimo probabilístico para a minimização do corte de carga em microrredes ilhadas para garantir seus limites de frequência. As peculiaridades da operação ilhada de microrredes são consideradas, tais como a variação da frequência e o controle em *droop* dos geradores. A solução é feita a partir da Transformação *Unscented* que utiliza um número reduzido de amostras das variáveis incertas quando comparadas com a Simulação Monte Carlo. Resultados para as microrredes de 33 barras e 70 barras ilustram a efetividade computacional da metodologia proposta bem como a acurácia dos resultados, mostrando que a solução determinística pode não ser eficiente diante das incertezas das cargas.

Palavras-chave: Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico; Transformação *Unscented*; Microrredes Ilhadas; Minimização do Corte de Carga; Incertezas.

Abstract

This work presents a probabilistic optimal power flow methodology for minimizing load shedding in islanded microgrids to satisfy frequency limits. The peculiarities of the islanded operation of microgrids are considered, such as the frequency variation and the droop control mode of generators. The solution is made by using the Unscented Transformation, which employs a reduced number of samples of uncertain variables when compared with the Monte Carlo Simulation. Results for the 33-bus and 70-bus microgrids illustrate the computational effectiveness of the proposed methodology as well as its accuracy, showing that the deterministic solution may not be efficient in the face of uncertainties of the loads.

Keywords: Probabilistic Optimal Power Flow; Unscented Transformation; Islanded Microgrids; Load Shedding Minimization; Uncertainties.

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de Microrrede	7
2.2	Associação de geradores com controle droop em um mesmo sistema	8
2.3	Exemplo de Microrrede CC	11
2.4	Exemplo de Microrrede CA	12
3.1	Controle de <i>droop</i>	22
3.2	Fluxograma do processo de resolução do fluxo de potência ótimo determinístico via <i>fmincon</i>	26
3.3	Fluxograma do processo de resolução do fluxo de potência probabilístico baseado na Simulação de Monte Carlo através da <i>fmincon</i>	28
3.4	Sistema 2 Barras para Exemplo.	29
3.5	Fluxograma simplificado para o cálculo do fluxo de potência ótimo probabilístico via UT	30
4.1	Sistema 33 Barras	35
4.2	Magnitude das tensões nodais (sistema de 33 barras ilhado).	35
4.3	Comparação das cargas ativas em pu por barra: Carga Inicial; Carga Após o corte; Corte de carga	36
4.4	Comparação das cargas reativas em pu por barra: Carga Inicial; Carga Após o corte; Corte de carga	37
4.5	Histograma da frequência da microrrede (f_{mg})	38
4.6	Histograma para frequência da microrrede para o FPP-Ótimo via UT	40
4.7	Média e Desvio Padrão da Potência ativa gerada em cada gerador (MW).	41
4.8	Média e Desvio Padrão da Potência reativa gerada em cada gerador (Mvar).	42

4.9	Comparação Média das tensões das barras para UT e SMC.	42
4.10	Comparação do desvio padrão das tensões das barras para UT e SMC.	43
4.11	Sistema 70 Barras.	45
4.12	Magnitude das tensões nodais (sistema de 70 barras ilhado).	46
4.13	Histograma da frequência da microrrede SMC 5000 amostras Sistema 70 Barras	47
4.14	Comparação da média das tensões das barras para UT e SMC no sistema 70 barras.	48
4.15	Comparação do desvio padrão das tensões das barras para UT e SMC no sistema 70 barras.	49
4.16	Média e Desvio Padrão da Potência ativa gerada em cada gerador (MW) no Sistema 70 Barras.	49
4.17	Média e Desvio Padrão da Potência Reativa gerada em cada gerador (Mvar) no Sistema 70 Barras.	50
4.18	Comparação das cargas ativas em pu por barra: Carga Inicial; Carga Após o corte; Corte de carga (Barras 1 a 35). Azul: Carga Inicial; Amarelo: Carga Final: Vermelho: Corte de carga na barra.	52
4.19	Comparação das cargas ativas em pu por barra: Carga Inicial; Carga Após o corte; Corte de carga (Barras 35 a 70). Azul: Carga Inicial; Amarelo: Carga Final: Vermelho: Corte de carga na barra.	53
4.20	Comparação das cargas reativas em pu por barra: Carga Inicial; Carga Após o corte; Corte de carga (Barras 1 a 35). Azul: Carga Inicial; Amarelo: Carga Final: Vermelho: Corte de carga na barra.	53
4.21	Comparação das cargas reativas em pu por barra: Carga Inicial; Carga Após o corte; Corte de carga (Barras 37 a 70). Azul: Carga Inicial; Amarelo: Carga Final: Vermelho: Corte de carga na barra.	54

Lista de Tabelas

4.1	Coeficientes de droop e setpoints (frequência e tensão a vazio).	33
4.2	Limites das variáveis	34
4.3	Solução do fluxo de potência convencional Sistema 33 Barras	34
4.4	Solução do fluxo de potência ótimo determinístico	36
4.5	Solução Determinística do FPO: Montante de Cargas	37
4.6	Avaliação probabilística da solução determinística	39
4.7	Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Frequência	39
4.8	Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Potência Ativa Gerada (MW)	40
4.9	Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Potência Reativa Gerada (Mvar)	41
4.10	Resultado do FPO Probabilístico: Análise dos Montantes de Corte (MW/Mvar) Sistema 33 Barras	43
4.11	Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Frequência para diversos desvios padrão das cargas	44
4.12	Resultado do FPO Probabilístico: Análise dos Montantes de Corte (MW/Mvar)	44
4.13	Solução do fluxo de potência convencional Sistema 70 Barras	45
4.14	Solução do fluxo de potência convencional Sistema 70 Barras	46
4.15	Avaliação probabilística da solução determinística do Sistema 70 Barras	47
4.16	Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Frequência Sistema 70 Barras	50
4.17	Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Potência Ativa Gerada (MW) Sis- tema 70 Barras	51
4.18	Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Potência Reativa Gerada (Mvar) Sistema 70 Barras	51

4.19	Resultado do FPO Probabilístico: Análise dos Montantes de Corte (MW/Mvar)	
	Sistema 70 Barras	52
4.20	Resultado do FPO Probabilístico: Análise dos Montantes de Corte (MW/Mvar)	
	para variação do desvio padrão da carga no Sistema 70 Barras	54
4.21	Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Frequência da microrrede (Hz)	
	para diferentes desvios padrão das cargas	55
4.22	Tempo computacional para cada método	55

Lista de Símbolos e Siglas

P_d : Potência ativa demandada.

Q_d : Potência reativa demandada.

S_d : Potência aparente demandada.

f_{mg} : frequência da microrrede.

P_{gk} : Potência ativa gerada pelo gerador alocado na barra k .

Q_{gk} : Potência reativa gerada ou consumida pelo gerador alocado na barra k .

P_k : injeção de potência ativa na barra k .

Q_k : injeção de potência reativa na barra k .

s_{pk} : coeficiente de controle de *droop* ativo.

s_{qk} : coeficiente de controle de *droop* reativo.

f_k^* : frequência à vazio do gerador alocado na barra k .

V_k^* : tensão à vazio do gerador alocado na barra k .

Lista de Abreviações

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica.

BESS: *Battery Energy Storage System*.

CA: Corrente Alternada.

CC: Corrente Contínua.

EPE: Empresa de Pesquisa Energética.

FPO: Fluxo de Potência Ótimo.

FPP: Fluxo de Potência Probabilístico.

GDs: Geradores Distribuídos.

HVDC: *High Voltage Direct Current*.

IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.

MatLab: *Matrix Laboratory*.

MG: Microrredes.

MG-CA: Microrredes em Corrente Alternada.

PSO: *Particle Swarm Optimization*.

PCH: Pequena Central Hidrelétrica

RED: Recursos Energéticos Distribuídos.

SAE: Sistemas de Armazenamento de Energia.

SEP: Sistema Elétrico de Potência.

SMC: Simulação Monte Carlo.

UT: *Unscented Transformation*.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivo da Dissertação	2
1.2	Publicação Decorrente da Pesquisa	3
1.3	Estrutura do Texto	3
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Considerações Iniciais	5
2.2	Microrredes	5
2.2.1	Geradores Distribuídos	7
2.2.2	Sistema de Armazenamento e Cargas	8
2.2.3	Controles Avançados em Microrredes	10
2.2.4	Microrredes em Corrente Contínua	10
2.2.5	Microrredes em Corrente Alternada	11
2.3	Operação de Microrredes	12
2.3.1	Operação Conectada à Rede	12
2.3.2	Operação Ilhada	12
2.4	Vantagens das Microrredes	13
2.5	Desafios na Implantação das Microrredes	14
2.6	Metodologias de Fluxo de Potência para Microrredes	14
2.6.1	Fluxo de Potência e Fluxo de Potência Ótimo	14
2.6.2	Fluxo de Potência e Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico	16
2.7	A Transformação Unscented	17
2.7.1	Discussão Inicial	17

2.7.2	Formulação Matemática da Transformação Unscented	18
2.7.3	Fluxo de Potência Probabilístico através da Transformação Unscented	19
2.8	Corte de Carga em Microrredes	19
2.9	Considerações Parciais	20
3	Metodologia	21
3.1	Considerações Iniciais	21
3.2	Característica de Controle em <i>Droop</i>	21
3.3	Fluxo de Potência Determinístico para Microrredes Ilhadas	22
3.4	Fluxo de Potência Ótimo Determinístico	23
3.5	Fluxo de Potência Probabilístico para Microrredes Ilhadas	27
3.5.1	Fluxo de potência Probabilístico Ótimo baseado na Simulação de Monte Carlo	27
3.5.2	Definição dos <i>Sigma Points</i> no FPP via a Transformação Unscented	29
3.5.3	Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico baseado na Transformada Unscented	29
3.6	Considerações Parciais	31
4	Resultados	33
4.1	Considerações Iniciais	33
4.2	Parâmetros Gerais para os Sistemas Considerados	33
4.3	Sistema 33 Barras	34
4.3.1	Descrição do Sistema	34
4.3.2	Solução do Caso Base para o Sistema 33 Barras	34
4.3.3	Fluxo de Potência Ótimo Determinístico	36
4.3.4	Avaliação Probabilística da Solução do Fluxo de Potência Ótimo Determinístico do Sistema 33 Barras	37
4.3.5	Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico para o Sistema 33 Barras	38
4.3.6	Impacto do Desvio Padrão da Carga na Solução do FPO Probabilístico via UT para o Sistema 33 Barras	44
4.4	Sistema 70 Barras	44
4.4.1	Descrição do Sistema	44

4.4.2	Solução do Caso Base para o Sistema 70 Barras	45
4.4.3	Fluxo de Potência Ótimo Determinístico para o Sistema 70 Barras . . .	46
4.4.4	Avaliação Probabilística do Fluxo de Potência Ótimo Determinístico do Sistema 70 Barras	46
4.4.5	Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico para o Sistema 70 Barras . . .	48
4.4.6	Impacto do Desvio Padrão da Carga na Solução do FPP Ótimo via UT do Sistema 70 Barras	54
4.5	Desempenho Computacional	55
4.6	Considerações Parciais	56
5	Conclusões	57
	Referências Bibliográficas	59

Introdução

Microrredes (do inglês *Microgrids* - *MG*) são sistemas de distribuição de baixa ou média tensão em corrente alternada ou contínua que podem operar conectadas à rede principal ou desconectadas (operação ilhada). As MG são formadas por geradores distribuídos (GD), sistemas de armazenamento de energia (SAE) e cargas controláveis. Adicionalmente, os GD podem ser catalogadas por despacho controlável (isto é, consegue-se programar a quantidade de potência gerada, tal como os geradores baseados em combustíveis fósseis) ou despacho não-controlável (como os geradores baseados em fontes renováveis, como eólicos e painéis fotovoltaicos, cuja geração é intermitente e depende das condições climáticas) [1].

Quando se analisa sistemas em corrente alternada, atenção especial deve ser dada à frequência e ao gerenciamento de potência reativa (intrinsecamente associada ao controle de tensão nas barras do sistema). As MG em corrente alternada (MG-CA), operando conectadas à rede principal (sistema de grande porte), possuem sua frequência mantida no valor nominal (60 Hz): nesse caso, todos os geradores (despacháveis ou não) operam no "modo PQ", injetando potência na MG-CA e a rede principal assume as variações de perdas/cargas mantendo a frequência constante [2].

Considerando a importância do tema, diversos trabalhos da literatura têm dado enfoque em metodologias para a análise em regime permanente de microrredes, principalmente na operação ilhada. Em [3] é apresentada uma metodologia para o cálculo do máximo ponto de carregamento no contexto da estabilidade de tensão. Em [4] é apresentado um fluxo de potência ótimo para definição do mínimo corte de carga para restabelecimento da frequência. Em [5, 6] são apresentadas metodologias para alocação de unidades de GD. Metodologias para solução de MG-CA desbalanceadas também foram propostas, como em [7], em que é apresentado um fluxo de

potência trifásico ótimo para minimizar o corte de carga em microrredes desbalanceadas.

Um importante ponto a ser considerado diz respeito às incertezas de carga e geração renovável (geradores despacho não-controlável). Considerando que a carga não é precisamente conhecida é comum representá-la como uma distribuição normal padrão com média no valor nominal e desvio padrão como porcentagem do valor nominal [8]. Nesse caso, interessa-se calcular a média e a variância das variáveis de saída (gerações, tensões, correntes e frequência) da MG-CA ilhada (foco da presente dissertação). A solução probabilística é feita através do Fluxo de Potência Probabilístico (FPP) [9]. Em geral, a solução do FPP é feita através da Simulação Monte Carlo (SMC), baseada na extração da média e desvio padrão das variáveis de saída através de um elevado número de simulações determinísticas (em que diferentes valores de cargas são amostrados com base em suas médias e desvios padrões como porcentagem da média [9]). O maior gargalo da SMC é o elevado tempo computacional. Nesse sentido, métodos mais eficientes têm sido propostos na literatura. Um desses métodos é a Transformação *Unscented* (*Unscented Transformation* - UT) que amostra deterministicamente uma quantidade reduzida de pontos, aplica transformações não-lineares e calcula média e variância através de ponderações [10]. Aplicações da UT para a solução do FPP para sistemas de transmissão são encontradas em [8, 11]. Em [12] é apresentado um fluxo de potência ótimo probabilístico para a minimização de perdas via a UT e metaheurística. Em [13] é apresentada uma metodologia de fluxo de potência para microrredes ilhadas trifásicas desbalanceadas via UT.

Com base na revisão apresentada, identifica-se dois pontos incipientes de pesquisa: (i) solução do FPP via UT e (ii) desenvolvimento de metodologias para análise de MG-CA ilhadas.

1.1 Objetivo da Dissertação

Esta dissertação tem como propósito o desenvolvimento de um fluxo de potência ótimo probabilístico para a análise de microrredes ilhadas em regime permanente.

Os objetivos específicos são:

1. Aplicação da Transformação *Unscented* para a solução do fluxo de potência ótimo, que visa encontrar o mínimo valor de corte de carga (ou seja, minimizar o corte de carga necessário) para o funcionamento de microrrede ilhada.

2. Comparação dos resultados obtidos pela metodologia proposta aos obtidos pela Simulação Monte Carlo.
3. Investigação do impacto da incerteza da carga na solução do fluxo de potência ótimo.

1.2 Publicação Decorrente da Pesquisa

O seguinte trabalho foi publicado e apresentado em um evento científico ao longo do desenvolvimento desta dissertação:

- J. S. Oliveira, W. Peres, L. M. Rabelo, "**Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico para Minimização do Corte de Carga em Microrredes CA Ilhadas usando a Transformação Unscented**", nos *Anais do Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente e Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2023.

1.3 Estrutura do Texto

O presente trabalho é composto por mais quatro capítulos, além deste que apresenta a contextualização do problema. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os métodos de resolução de fluxo de potência ótimo probabilístico para a minimização do corte de carga em microrredes CA ilhadas com geradores distribuídos com controle de *droop*. O Capítulo 3 é dedicado ao desenvolvimento da metodologia proposta. O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos com a execução dos métodos em dois sistemas testes do IEEE de dimensões distintas. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo.

Revisão Bibliográfica

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são discutidos conceitos relativos ao controle de frequência em microrredes ilhadas através do corte de carga. São apresentadas fundamentações teóricas e estudos que serviram como base para o desenvolvimento desse trabalho.

Primeiramente são explorados conceitos gerais sobre microrredes, como os principais componentes, quais tipos de estruturas podem ser utilizadas e os modos de operação.

Finalmente, são apresentados os principais objetivos para o controle de frequência em microrredes operando de forma ilhada, lançando mão dos métodos de otimização existentes para a utilização do corte de carga para este fim.

2.2 Microrredes

O setor elétrico tem sofrido com vastas transformações. Devido, principalmente, às mudanças tecnológicas e sociais, como por exemplo, as preocupações com as mudanças climáticas e a demanda por fontes sustentáveis de energia. Junto disso, um conceito que vem se instalando fortemente no setor elétrico é o que diz respeito à geração distribuída (GD) [14].

A GD pode ser definida como uma forma de produção de menor proporção e mais próxima ao consumidor, a partir da utilização de fontes renováveis de energia ou até mesmo de fontes de geração convencionais de menor capacidade do que as grandes centrais elétricas [15]. O termo tem sido muito utilizado no planejamento e na análise da operação de sistemas elétricos

modernos e, com o avanço desses estudos e tecnologias, torna-se cada vez mais aprasível a formação de microrredes [16].

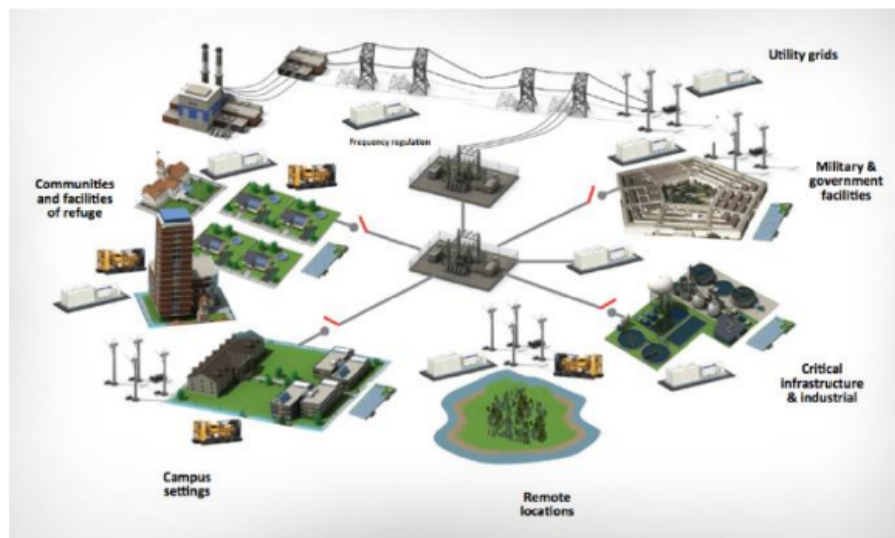
Uma microrrede pode ser determinada como uma rede de baixa ou média tensão, alimentada por recursos energéticos de geração distribuída (GDs) e sistemas de armazenamento de energia (SAEs) para o atendimento de cargas. Nesse contexto, cargas podem ser classificadas como não controláveis ou controláveis [17].

A principal característica atrativa das microrredes é que, ainda que estejam inicialmente conectadas à uma rede de energia, elas podem ser rapidamente isoladas, funcionando de forma autônoma, comumente chamada de "ilha energética", ou seja, desconectadas do sistema principal [18]. As microrredes podem operar também em conjunto com o sistema principal no modo de operação conectada à rede. Além disso, podem oferecer benefícios adicionais para a concessionária local, fornecendo energia complementar para uso em condições de pico, reduzindo ou adiando atualizações do sistema elétrico [19, 20].

As configurações das microrredes divergem muito entre si, podendo se tratar de microrredes em corrente alternada (CA) ou ainda, microrredes em corrente contínua (CC) [21, 22]. Todavia, independente da configuração, alguns elementos se fazem sempre necessários, como sistemas de geração, armazenamento e cargas a serem atendidas e equipamentos de controle [2].

Uma configuração típica de microrrede é apresentada na Figura 2.1, na qual se destacam os geradores distribuídos, fontes renováveis de geração distribuída (próximos ao centro de carga) e os Pontos de Acoplamento Comum (PAC), que fazem a conexão da microrrede com a rede de distribuição, realizando funções de ilhamento ou reconexão.

Figura 2.1: Exemplo de Microrrede. Fonte: [23]



As seções a seguir, descrevem de forma mais profunda os elementos comuns a todas as microrredes e as topologias que tais microrredes podem ter.

2.2.1 Geradores Distribuídos

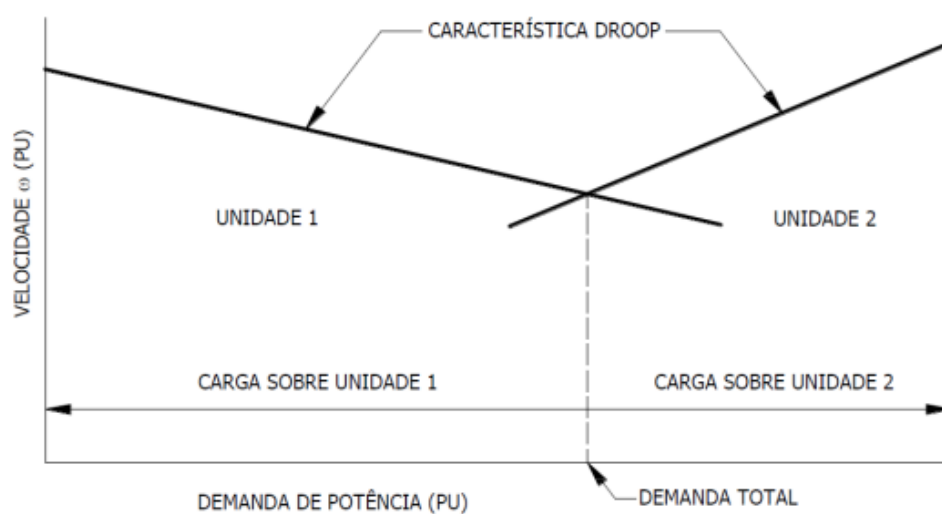
As unidades de geração distribuídas são a base das microrredes e são as responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica para as cargas alocadas na microrrede. Podem ser baseadas em diversos tipos de fontes de energia (renováveis ou não), tais como solar fotovoltaica, eólica, células de combustível e pequenas centrais hidrelétricas (PCH).

Geradores baseados em fontes renováveis possuem intermitência em sua potência de saída e, sem a consideração de sistemas de armazenamento associados à essas unidades, estas não podem ter seu despacho controlado. Define-se então que elas operam sem participar do controle de frequência [8, 12]. Nesse caso, estas podem ser modeladas como cargas negativas no sistema, variando com a disponibilidade solar ou de vento.

Em contrapartida, os geradores de despacho controlado baseados em combustíveis fósseis (que podem ser armazenados), tais como microturbinas e geradores a diesel, operam participando do controle de frequência (controle em *droop*). O controle *droop* apresenta uma característica de queda de frequência com o aumento da potência gerada. Isso é necessário porque, na operação ilhada, não existe um único gerador com elevada capacidade (como é o caso da rede principal na operação conectada): com isso, todas as variações de potência no sistema são supridas pelas unidades despacháveis operando em *droop* [2].

Nos sistemas de transmissão, o controle *droop* é uma característica de geradores síncronos dotados de controladores no seu acionamento. Nesse caso, o controlador é o Regulador de Velocidade, que efetua o controle primário de frequência baseado na redução da frequência diante o aumento de carga. A Figura 2.2 ilustra a associação paralela de duas unidades geradoras com controle em *droop* [17]. No caso das microrredes, o controle em *droop* é feito a partir dos conversores que conectam as unidades despacháveis ao sistema [2], existindo duas malhas distintas: a de frequência (associada à potência ativa) e a de tensão (associada à potência reativa).

Figura 2.2: Associação de geradores com controle droop em um mesmo sistema Fonte: [17]



2.2.2 Sistema de Armazenamento e Cargas

Os SAE estão sendo usados em redes de distribuição para lidar com a crescente popularidade da geração distribuída renovável, atraindo o interesse de pesquisadores. São utilizados na tentativa de fornecer um perfil de fornecimento compatível com a demanda das cargas [24]. As tecnologias de armazenamento são diversas e muitos fatores precisam ser considerados na escolha daquela que fornecerá os melhores resultados, pois isso inclui aspectos determinantes como densidade de energia, potência, custo, rendimento e vida útil [25].

Um exemplo de SAE comumente utilizado, são as baterias, um método tradicional de armazenamento de energia elétrica. Nos sistemas elétricos fotovoltaicos isolados, por exemplo, são comumente utilizadas as baterias chumbo-ácido e níquel-cádmio, devido a seu custo. Tais baterias são classificadas como secundárias, que através de correntes elétricas controladas, as reações químicas podem ser revertidas, ou seja, que podem ser recarregadas [26].

Essas opções de armazenamento permitem um melhor aproveitamento das GDs conectas à microrredes, atenuando a característica de discontinuidade das fontes renováveis, operando nos momentos de intermitência como fontes de potência despacháveis realizando o balanço despacho-demanda [27, 28].

Assim como ocorre com a geração, existem duas configurações de conexões de sistemas de armazenamento em microrredes, seja ela instalada de forma distribuída ou centralizada. A primeira é conectada diretamente à geração distribuída e a configuração centralizada é ligada diretamente ao barramento da microrrede.

As cargas são componentes que consomem energia e são classificadas como prioritárias ou não prioritárias. As prioritárias são aquelas cujo fornecimento de energia deve ser contínuo e seguir critérios de qualidade como alguns indicadores em regime permanente e transitório, tensão em regime permanente, fator de potência, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de frequência e tensão de curta duração [29], principalmente quando a microrrede opera de forma ilhada. As cargas não prioritárias são aquelas que, em eventuais necessidades, podem ter o fornecimento de energia descontinuado [18]. Fora isso, devem ser atendidas com os mesmos critérios de qualidade de energia e fornecimento do que as cargas ditas prioritárias.

Esta classificação permite planejar o método de operação da microrrede, otimizar sua utilização através de uma flexibilidade entre despacho-demanda e melhorar os índices de qualidade e confiabilidade da energia entregue. Ainda possibilita conhecer o intercâmbio com a rede principal quando conectada e o controle de frequência e tensão quando operando ilhada [30].

Outra classificação para cargas vem quanto ao modelo que podem ser representadas, sendo divididos entre o modelo estático e o dinâmico.

Os principais modelos estáticos para as cargas são divididos entre: (i) cargas de potência constante, onde a potência aparente (S_d) pode ser expressa a partir de suas componentes de potências ativa (P_d) e reativa (Q_d) que independem do valor da tensão; (ii) cargas de corrente constante, onde a carga não sofre alteração da corrente com respectiva variação de tensão, entretanto a potência é alterada; (iii) cargas de impedância constante, são aquelas cuja a impedância da carga é dada pela soma de sua resistência e sua reatância, que se mantém constante independente do valor de tensão; (iv) cargas ZIP (impedância, corrente e potência constantes), nas quais se tem a combinação dos três modelos apresentados e o modelo possui uma porcentagem do valor total da carga, e a soma da porcentagem desses modelos corresponde à carga total [31].

2.2.3 Controles Avançados em Microrredes

Os recursos de conversão e controle de energia são necessários para a integração entre os componentes de um sistema [27, 32].

O controle de microrredes deve garantir uma operação otimizada, com confiabilidade e possibilidade de transição entre os modos de operação de forma suave, sempre que essa operação for necessária, garantindo a conexão e desconexão sem falhas [33, 34].

O controle da microrrede ainda é responsável por manter o balanço de potência, controlando a transferência de potências ativa e reativa de forma a manter o sistema estável [2], otimizar produção de energia das fontes de energia diferentes para melhorar a participação de cada fonte no despacho de energia [20, 35].

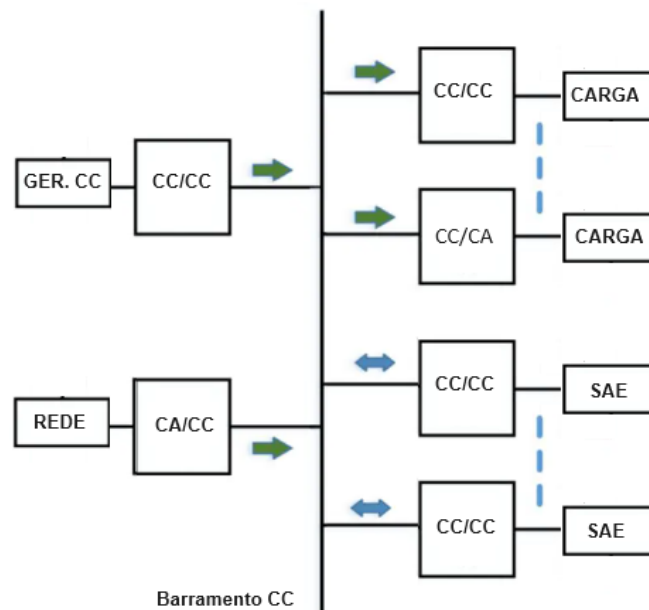
2.2.4 Microrredes em Corrente Contínua

Atualmente, discutem-se mudanças estruturais nos sistemas elétricos de potência (SEP) visando melhorias tanto da eficiência quanto da confiabilidade. Nesse contexto, os sistemas CC, em algumas aplicações, podem se apresentar como uma eficiente solução, sendo tão eficazes quanto as redes de distribuição em corrente alternada (CA) [36, 37].

Microrredes CC têm a capacidade de aderir as fontes de energia distribuídas (painéis fotovoltaicos, SAEs ou ainda, células combustíveis) mais facilmente através de um barramento CC [38, 39]. Dessa forma, a confiabilidade e a qualidade de energia podem ser melhoradas com a adição de fontes renováveis e dispositivos de armazenamento ao longo do sistema elétrico [21].

As redes CA possuem diversas vantagens, como sistemas de proteção mais robustos, regulamentação e padronização já efetivados. Por esse motivo, os sistemas CC não vem para a substituição do modelos atuais em CA, mas podem ser utilizados localmente de forma a melhorar a qualidade de energia, confiabilidade e eficiência. Sistemas como *data centers*, subestações de telecomunicações e transmissão HVDC (*High Voltage Direct Current*) interligados ao sistema atual já se utilizam desse princípio em suas operações [22, 40]. No entanto, ainda existe uma variedade de problemas relacionados à incorporação da geração distribuída, como regulamentação de sistema híbridos CA-CC [41]. A Figura 2.3 ilustra uma microrrede CC.

Figura 2.3: Tipologia de Microrrede CC. Fonte: Elaboração Própria



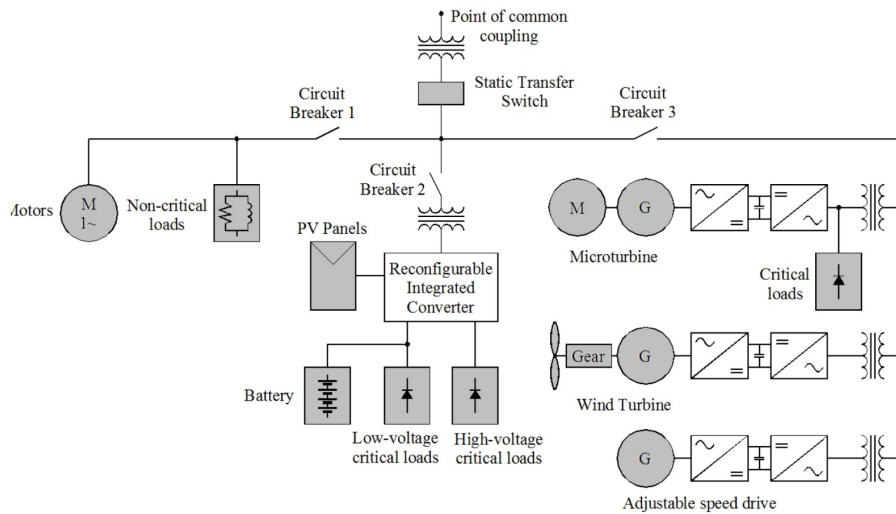
2.2.5 Microrredes em Corrente Alternada

Este tipo de microrrede possui um barramento CA comum que, geralmente, tem conectado a ele tanto cargas CA ou CC, fontes de geração distribuída e dispositivos de armazenamento [42].

A rede principal opera em corrente alternada e nas redes usuais a maioria das cargas conectadas também opera em CA, por isso existe uma maior integração da microrrede ao sistema de distribuição e essa melhor integração resulta numa melhor capacidade de atendimento à carga, controlabilidade e flexibilidade da microrrede [43].

As redes elétricas atuais podem ser facilmente reconfiguradas para um esquema de microrrede CA. Além disso, o maior número de cargas CA oferece maior integração delas com a microrrede em questão. Devido a proeminência de características de corrente alternada, faz-se necessário a utilização de um inversor CC/CA para conectar as fontes e os dispositivos de armazenamento CC, conforme pode ser visto na Figura 2.4 [42].

Figura 2.4: Exemplo de Microrrede CA. Fonte: [44]



2.3 Operação de Microrredes

2.3.1 Operação Conectada à Rede

Quando conectada à rede, a microrrede obedecerá às características do sistema principal, ou seja, ao nível de tensão e frequência da rede de distribuição [30]. Ao operar nessa configuração, a dinâmica do sistema é determinada, principalmente, pela rede principal devido ao tamanho relativamente pequeno das microrredes ao sistema principal [20]. A microrrede possui a capacidade de realizar o intercâmbio bidirecional de potência, em outras palavras, injetar ou importar potência ativa, além de oferecer suporte de potência reativa à rede principal, podendo controlar a tensão local [7, 45].

Do ponto de vista da distribuidora, a microrrede pode ser vista como uma única carga controlada adicionada à rede de distribuição, que permite à rede maior flexibilidade, controle e confiabilidade.

2.3.2 Operação Ilhada

A operação ilhada de uma microrrede pode ocorrer quando algum distúrbio ocorre e esta é desconectada da rede principal para que sejam realizados reparos necessários ou ainda, quando esta for projetada para operar de forma isolada permanentemente via gerações próprias. Nas duas ocorrências é devido garantir uma operação viável, que respeite os limites de operação como tensão e frequência e com o mínimo de perdas de potência [46, 47].

No modo ilhado, as cargas da microrrede são supridas por gerações locais (geradores síncronos, painéis fotovoltaicos, geradores eólicos) e pelo SAE (quando este estiver instalado ao sistema).

Na operação ilhada de microrredes CA, os geradores de despacho controlado operam no modo *droop*, participando do controle de frequência, que varia e pode diferir do valor nominal.

Quando a carga excede um determinado valor, conforme discutido por [4], a microrrede enfrenta problemas de subfrequência. Diante desse cenário, a definição do local e do montante de carga a ser cortada torna-se uma tarefa importante.

2.4 Vantagens das Microrredes

A geração distribuída dentro das microrredes oferece grandes vantagens e benefícios em relação as grandes usinas geradoras convencionais. Essas costumemente construídas longe dos centros de carga, se opõem ao perfil das GDs que podem ser instaladas próximo aos locais de consumo, beneficiando tanto aos consumidores quanto às distribuidoras de energia.

Esse beneficiamento pode ser classificado de acordo com aspectos econômicos, técnicos, ambientais e sociais [48].

Dentre tais benéfices podem ser destacadas:

- Uma unidade de geração distribuída, cuja classificação é tipicamente baixa (menor que 5 MW) garante um fornecimento de eletricidade confiável a um pequeno grupo de consumidores locais.
- A instalação das unidades de geração distribuída em torno dos centros de carga fornece um melhor perfil de tensão e qualidade de energia. Além disso, a integração de recursos energéticos distribuídos baseados em recursos energéticos renováveis são ecologicamente atrativos.
- O uso de geração distribuída em uma rede de distribuição reduz o estresse nos equipamentos das redes, assim esse tipo de geração pode ser mais econômico do que atualizar os componentes de uma rede.

Observa-se então os benefícios da geração local realizada nas microrredes. Cita-se ainda a contribuição social da construção de microrredes isoladas, capazes de garantir a eletrificação de

comunidades rurais e mais afastadas dos centros de carga.

2.5 Desafios na Implantação das Microrredes

Um ponto importante na implantação das microrredes é o dimensionamento e o gerenciamento da alocação de GD. Se feitos de forma não adequada, podem ocasionar problemas, como por exemplo, o aumento das perdas elétricas [46]. Além disso, são apontados outros problemas da alocação inadequada, como: violações de parâmetros de qualidade de energia, a falta de seletividade, a degradação do perfil de tensão, efeitos negativos sobre os relés de proteção devido à característica bidirecional do fluxo de potência, dificuldades relacionadas às características intermitentes de alguns tipos de GD, além da instabilidade provocada ao sistema, por meio da injeção de harmônicos na rede [49, 50].

Somado ao desafio da alocação das GDs, cita-se ainda, no caso da operação ilhada, a necessidade do correto gerenciamento das diversas fontes de energia de forma a manter a frequência e as tensões nodais dentro dos limites aceitáveis.

2.6 Metodologias de Fluxo de Potência para Microrredes

Esta seção tem por finalidade discutir as metodologias para a solução do fluxo de potência em microrredes, apresentar a formulação genérica de um fluxo de potência e apresentar metodologias para a resolução computacional do fluxo de potência. Metodologias determinísticas e probabilísticas são discutidas e revisadas.

2.6.1 Fluxo de Potência e Fluxo de Potência Ótimo

O cálculo do fluxo de potência de uma rede elétrica é definido essencialmente pela determinação do estado da rede, da distribuição dos fluxos nas linhas e de grandezas de interesse [51]. Essa é a ferramenta mais utilizada nos vários estudos feitos atualmente em SEPs. Sua execução consiste basicamente no cálculo das tensões nodais, em módulo e fase e dos fluxos de potência em sistemas elétricos, afim de encontrar o ponto de estado estacionário ou de regime permanente de operação de um SEP, levando em consideração o nível de carregamento (carga ou “mercado” do sistema), o despacho de geração ativa (que considera a otimização energética), a topologia do sistema e os parâmetros de rede [17, 52].

O fluxo de potência é utilizado tanto na operação quanto no planejamento de redes elétricas. Na operação de sistemas de transmissão, quando é feita a análise de segurança, várias simulações de fluxo de potência são realizadas de forma a obter o estado da rede após as contingências críticas. Assim, caso violações nos limites de operação da rede sejam detectados, ações de correção ou prevenção podem ser tomadas. No âmbito de planejamento, as alterações de configuração da rede são basicamente obtidas com estudos de aumento de demanda realizadas utilizando a ferramenta de fluxo de carga [53, 54].

O Fluxo de Potência Ótimo (FPO) foi proposto pela primeira vez por em 1962 [55]. Seu objetivo é o estabelecimento dos controles e a determinação do ponto operativo de um SEP que minimiza (ou maximiza) o valor de uma determinada função objetivo sujeita às restrições físicas e operacionais impostas ao problema.

Para o fluxo de potência ótimo, define-se o ponto de operação especificado com uma função objetivo e um conjunto de restrições de igualdade e desigualdade para que então seja encontrado um estado operativo calculado. O FPO pode ser descrito como um problema restrito de otimização não linear, com variáveis contínuas e discretas [56]. A maneira genérica do FPO é descrita por (2.1).

$$\begin{aligned}
 \min \quad & F(z) \\
 \text{s.a} \quad & h(z) = 0 \\
 & g(z) \geq 0 \\
 & z_{min} \leq z \leq z_{max}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Em que z representa o vetor de variáveis do problema modelado, $F(z)$ é chamada de função objetivo que será minimizada (ou maximizada), $h(z)$ são restrições de igualdade e $g(z)$ são as de desigualdade referentes às equações algébricas do fluxo de potência ou variáveis controladas em um valor fixo constante).

Nos SEPs, o FPO pode ser empregado para minimização de perdas ativas, minimização de custos de geração de potência ativa, minimização de cortes de carga, minimização de custos operacionais, maximização de carregamento, etc [57, 58].

No caso das microrredes, a análise da operação conectada pode ser realizada por metodolo-

gias convencionais de fluxo de potência e fluxo de potência ótimo, pois a barra infinita permite a manutenção da frequência em seu valor nominal. O único requerimento é a utilização de metodologias trifásicas para a análise das redes desequilibradas [59].

Quando operando ilhada, a variação da frequência e a característica de controle em *droop* devem ser consideradas. Logo, as metodologias convencionais baseadas no uso de barra infinita não são adequadas. Em [4] é apresentado uma metodologia de fluxo de potência para microrredes ilhadas balanceadas. Em [45] o fluxo de potência para microrredes balanceadas é formulado utilizando injeções de corrente. Um fluxo de potência ótimo para mínimo corte de carga em microrredes ilhadas é proposto em [4]. Para microrredes desbalanceadas, metodologias de fluxo de potência trifásico foram propostas em [60] e [7], utilizando coordenadas polares e retangulares, respectivamente.

2.6.2 Fluxo de Potência e Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico

Proposto inicialmente em 1974 [9], o fluxo de potência probabilístico (FPP) trata da solução de um problema de fluxo de potência considerando a incerteza dos dados de carga conectada as barras do sistema elétrico. Essa incerteza pode ocorrer por algum erro de medição ou ainda, por uma carga que é desconhecida ou varia dentro de certos limites conhecidos.

Os métodos para a solução do FPP e para a solução fluxo de potência probabilístico ótimo (FPP-O) podem ser classificados em numéricos, analíticos e aproximados [8, 12, 61].

Os métodos numéricos consistem em gerar uma determinada quantidade de amostras, executar a metodologia determinística para cada amostra e calcular a média e o desvio padrão de cada variável de saída (tensão, corrente, etc). Uma das metodologias numéricas mais utilizadas para a solução de FPP e FPO-P é a Simulação de Monte Carlo [62, 63].

A Simulação de Monte Carlo (SMC) é um método computacional que utiliza estatística para resolver problemas. O método é um procedimento numérico baseado na geração de valores para cada distribuição de probabilidades dentro de um modelo com o objetivo de produzir possíveis cenários [64].

A SMC oferece muitas vantagens, nas quais destacam-se as distribuições das variáveis do modelo não precisam ser aproximadas, as correlações e outras interdependências podem ser modeladas, o nível de precisão da simulação pode ser melhorado através de um simples aumento do número de interações calculadas além de que a validade da teoria da SMC é amplamente

reconhecida, o que permite que seus resultados sejam facilmente aceitos. As alterações no modelo podem ser feitas rapidamente e os novos resultados podem ser comparados com os anteriores. A desvantagem da SMC é o esforço computacional exacerbado quando os sistemas estudados são de grande porte [61–63].

Por fim, os métodos aproximados são baseados no uso de transformações não lineares aplicados às variáveis de entrada (por exemplo, cargas incertas) para o cálculo das variáveis de saída (tensões, gerações, etc.). Esses métodos se destacam pelo cálculo determinístico de poucas amostras, requerendo um esforço computacional reduzido quando comparado com os métodos numéricos. Entretanto, alguns trabalhos da literatura investigaram que esses métodos podem sofrer de imprecisão na estimação do desvio padrão das variáveis de saída diante de um número elevado de variáveis de entrada. Um exemplo de método atualmente utilizada trata-se da Transformação *Unscented*, investigada por [8, 12, 13, 65].

2.7 A Transformação Unscented

2.7.1 Discussão Inicial

Proposta por [66], a Transformação *Unscented* tem como princípio obter um conjunto de vetores denominados de *sigma points*, deterministicamente definidos, que capturam a média e a covariância das variáveis de entrada incertas concatenadas em \mathbf{x} . Os *sigma points* são então aplicados na função não-linear $g(\mathbf{x})$ para a estimação da média e covariância das variáveis de saída concatenadas em \mathbf{y} . No problema de FPP, \mathbf{x} é o vetor com as cargas, $g(\mathbf{x})$ o conjunto de equações que compõem o fluxo de potência ou fluxo de potência ótimo, e \mathbf{y} denota a solução do fluxo de potência (tensões, gerações, etc).

Nesse estudo as cargas ativas e reativas (P_{dk} e Q_{dk}) são modeladas por variáveis probabilísticas definidas por (2.2):

$$\mathbf{x} \sim N(\mathbf{x}_m, \mathbf{P}_x) \quad (2.2)$$

em que:

- N denota a distribuição normal;
- \mathbf{x} é o vetor de cargas ativas e reativas ($n \times 1$) ($n = 2 \times nb$, sendo nb o número de barras);

- \mathbf{x}_m é o vetor com a média das variáveis (valor nominal das cargas);
- \mathbf{P}_x é a matriz covariância ($n \times n$), usada na modelagem da incerteza da carga. Não se considera a correlação entre as variáveis.

Deseja-se calcular a média e a variância das variáveis do sistema através de (2.3), sabendo que as cargas seguem a distribuição normal descrita em (2.2).

$$\mathbf{y} = g(\mathbf{x}) \quad (2.3)$$

2.7.2 Formulação Matemática da Transformação Unscented

Inicialmente, deve-se definir um conjunto de $2n + 1$ *sigma points* χ_i (vetores coluna de ordem $n \times 1$) e seus respectivos pesos W_i (existem $2n + 1$ pesos, um para cada χ_i). O número de variáveis incertas (elementos de \mathbf{x}) é denotado por n . Os vetores χ_i são definidos em (2.4) a (2.6).

$$\chi_1 = \mathbf{x}_m \quad (2.4)$$

$$\chi_{i+1} = \mathbf{x}_m + \mathbf{u}_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.5)$$

$$\chi_{i+n+1} = \mathbf{x}_m - \mathbf{u}_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.6)$$

em que \mathbf{u}_i é um vetor linha da matriz \mathbf{U} obtido a partir da fatoração de Cholesky como apresentado em (2.7).

$$\mathbf{U}^T \mathbf{U} = (n + \kappa) \mathbf{P}_x \quad (2.7)$$

No trabalho proposto por [67], discute-se que o parâmetro κ é escolhido empiricamente para reduzir os erros de estimação da média e covariância. No presente trabalho, de forma similar ao feito por [8], adota-se $\kappa = 2$, que é um valor comumente empregado na literatura e que apresentou bons resultados quando comparados aos da SMC.

Os pesos W_i são calculados conforme (2.8)-(2.10).

$$W_1 = \frac{\kappa}{n + \kappa} \quad (2.8)$$

$$W_{i+1} = (2(n + \kappa))^{-1}, i = 1, \dots, n \quad (2.9)$$

$$W_{i+n+1} = (2(n + \kappa))^{-1}, i = 1, \dots, n \quad (2.10)$$

Uma vez calculados os $2n + 1$ vetores y_i pode-se estimar a média e a covariância para cada variável de interesse conforme (2.11) e (2.12).

$$y_m = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i y_i \quad (2.11)$$

$$P_y = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i [(y_i - y_m)(y_i - y_m)^T] \quad (2.12)$$

2.7.3 Fluxo de Potência Probabilístico através da Transformação Unscented

A Transformação *Unscented* é uma metodologia recente que tem sido investigada para a solução do problema de fluxo de potência. A primeira aplicação, no contexto de sistemas de transmissão, foi proposta em [8], considerando incertezas de carga e geração eólica.

No contexto de microrredes ilhadas em corrente alternada, um fluxo de potência ótimo para microrredes balanceadas para a minimização de perdas foi proposto em [12]. Em [13] foi proposto um fluxo de potência para microrredes trifásicas desequilibradas considerando as incertezas das cargas e da geração eólica. Uma metodologia para a análise de microrredes híbridas (CA/CC) conectadas foi proposta em [65].

2.8 Corte de Carga em Microrredes

As ações de gerenciamento da carga são atividades de tempo real voltadas para lidar com qualquer deficiência de geração, transmissão ou transformação em que a carga a ser atendida supere a capacidade de suprimento/atendimento da área afetada resultando, portanto, em re-

manejamentos ou cortes de carga previamente estabelecidos para garantia da integridade do sistema.

O gerenciamento de carga visa também mitigar os riscos para a segurança do sistema e contribuir para a manutenção da qualidade de energia, para o controle da frequência e/ou tensão do sistema ou corte manual de carga em face de deficiência de geração, transmissão ou transformação [68].

As ações de gerenciamento de carga são realizadas de forma manual ou automática, em função de limites de tensão, frequência, déficit de geração ou carregamento de equipamentos ou linhas de transmissão [6, 46].

As ações de gerenciamento de carga podem ter curta ou longa duração em função de contingências na rede de operação ou de déficit energético no sistema.

2.9 Considerações Parciais

No desenvolvimento deste capítulo, foram abordados temas importantes associados a microrredes. Além disso, foram abordadas questões de regulamentação e políticas que afetam a implantação e operação de microrredes, bem como os avanços tecnológicos recentes. A interconexão de microrredes maiores e sua integração em redes de energia de maior escala também são tópicos relevantes a serem considerados.

Metodologia

3.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta os conceitos básicos da metodologia proposta para o planejamento de funcionamento de sistema de distribuição ilhado, de forma a minimizar o corte de carga para que o sistema ilhado trabalhe com todas as variáveis dentro dos limites aceitáveis, principalmente a frequência da microrrede (f_{mg}). Utiliza-se o *software* MatLab para a resolução de fluxos de potência através da Transformação *Unscented* (UT) e compara-se com a Simulação de Monte Carlo.

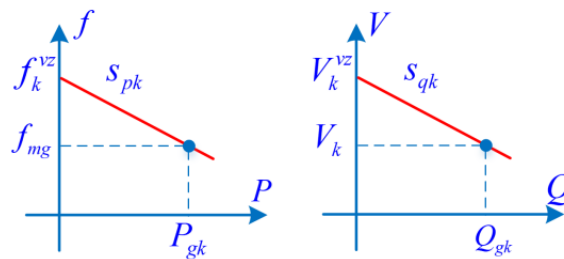
3.2 Característica de Controle em *Droop*

Na operação ilhada de microrredes em corrente alternada, os geradores podem operar de duas formas distintas, caracterizadas da seguinte forma:

- Geradores de despacho controlável: são aqueles baseados em combustíveis fósseis (microturbinas, por exemplo) que operam no modo *grid-forming*, para gerar a referência de tensão senoidal e, participando do controle de frequência (controle em *droop*);
- Geradores de despacho não-controlável: são os geradores baseados em fontes renováveis variáveis, tais como eólica e fotovoltaica. Quando não considerados sistemas de armazenamento associados à essas unidades, estas não podem participar do controle de frequência [12]. Nesse caso, como discutido por [8], estas podem ser modeladas como cargas negativas no sistema, variando com a disponibilidade do recurso renovável, como solar ou de vento.

A Figura 3.1 apresenta a característica de *droop* $P - f$ e $Q - V$. Esse controle é empregado nas unidades de geração de despacho controlável para a participação no controle de frequência da microrrede. Observa-se que na malha $P - f$ a frequência da microrrede f_{mg} é reduzida com o aumento da potência P_{gk} . O mesmo pode ser observado na malha $Q - V$, em que a tensão terminal da unidade k , V_k , é reduzida com o aumento da potência Q_{gk} . O equacionamento do controle em *droop* será apresentado nas próximas subseções.

Figura 3.1: Controle de *droop* Fonte: Elaboração Própria.



Vale ressaltar que no presente estudo a dependência da carga do barramento com a tensão nodal e frequência da microrrede não é considerada [17].

3.3 Fluxo de Potência Determinístico para Microrredes Ilhadas

A formulação do fluxo de potência determinístico para microrredes ilhadas com geradores em controle *droop*, apresentada por [4, 12], é definida em (3.3) a (3.5). O balanço de potência é garantido pelas restrições (3.1)-(3.2). O controle em *droop* de frequência e tensão nos geradores com despacho controlável é modelado conforme (3.3)-(3.4). A referência de fase é definida por (3.5).

$$P_{gk} - P_{dk} - P_k = 0, k \in \Omega_B \quad (3.1)$$

$$Q_{gk} - Q_{dk} - Q_k = 0, k \in \Omega_B \quad (3.2)$$

$$P_{gk} - \frac{1}{S_{pk}}(f_k^* - f_{mg}) = 0, k \in \Omega_G \quad (3.3)$$

$$Q_{gk} - \frac{1}{S_{qk}}(V_k^* - V_k) = 0, k \in \Omega_G \quad (3.4)$$

$$\theta_k^{ref} = 0 \quad (3.5)$$

em que:

- Ω_B e Ω_G são os conjuntos de barras e geradores da microrrede;
- P_{gk} e Q_{gk} são as potências ativa e reativa geradas na barra k . Na ausência de unidade geradora na barra k , $P_{gk} = Q_{gk} = 0$;
- P_{dk} e Q_{dk} são as potências ativa e reativa demandadas na barra k ;
- P_k e Q_k são as injeções de potência ativa e reativa na barra k calculadas com base nas tensões complexas nodais e na matriz admitância de barras, conforme demonstrado por [69];
- f_{mg} é a frequência da microrrede;
- V_k é a magnitude da tensão nodal na barra k ;
- f_k^* e V_k^* são os valores à vazão de frequência e tensão do controle em *droop* na Figura 3.1. Esses valores são fixos;
- s_{pk} e s_{qk} são os valores dos coeficientes da curva de *droop* na Figura 3.1. Esses valores são fixos.

A solução do fluxo de potência determinístico define o cenário inicial do sistema apresentado (potências demandadas). Determina-se os valores iniciais para as tensões nas barras, as potências geradas e a frequência da microrrede. Dessa forma, pode se optar por modificar o sistema de acordo com as necessidades encontradas, a fim de que sua operação ilhada possa ocorrer.

3.4 Fluxo de Potência Ótimo Determinístico

O Fluxo de Potência Ótimo (FPO) foi proposto pela primeira vez em 1962 e tem por finalidade o estabelecimento dos controles e a determinação do estado operativo de um SEP que minimiza (ou maximiza) o valor de uma determinada função objetivo sujeita às restrições físicas e operacionais impostas ao problema [55].

A formulação do Fluxo de Potência Ótimo Determinístico (FPO-D) é definida em (3.6)-(3.16). A função objetivo é dada em (3.6), que define o somatório dos fatores de corte de carga ponderados pela carga ativa [4]. O balanço de potência ativa e reativa em cada barra fica garantido por (3.7) e (3.8). O modelo matemático do controle em *droop* da Figura 3.1 é apresentado através de (3.9) e (3.10). A restrição de referência angular da microrrede é definida em (3.11) e os limites das variáveis do problema de otimização são apresentados em (3.12)-(3.16).

$$\min \quad F(z) = \sum_{k \in \Omega_B} \gamma_k P_{dk} \quad (3.6)$$

$$P_{gk} - (1 - \gamma_k)P_{dk} - P_k = 0, k \in \Omega_B \quad (3.7)$$

$$Q_{gk} - (1 - \gamma_k)Q_{dk} - Q_k = 0, k \in \Omega_B \quad (3.8)$$

$$P_{gk} - \frac{1}{s_{pk}}(f_k^* - f_{mg}) = 0, k \in \Omega_G \quad (3.9)$$

$$Q_{gk} - \frac{1}{s_{qk}}(V_k^* - V_k) = 0, k \in \Omega_G \quad (3.10)$$

$$\theta_k^{ref} = 0 \quad (3.11)$$

$$\text{sa} \quad f_{min} \leq f_{mg} \leq f_{max} \quad (3.12)$$

$$V_{kmin} \leq V_k \leq V_{kmax}, k \in \Omega_B \quad (3.13)$$

$$P_{gkmin} \leq P_{gk} \leq P_{gkmax}, k \in \Omega_G \quad (3.14)$$

$$Q_{gkmin} \leq Q_{gk} \leq Q_{gkmax}, k \in \Omega_G \quad (3.15)$$

$$0 \leq \gamma_k \leq 1, k \in \Omega_B \quad (3.16)$$

em que:

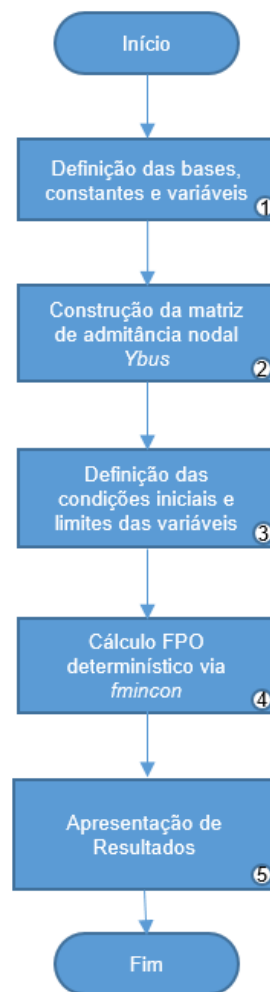
- os índices *min* e *max* denotam os limites mínimo e máximo de cada variável;
- $F(z)$ denota a função objetivo;
- z denota o vetor de variáveis de otimização composto por: potências geradas, tensões nodais, frequência da microrrede e coeficientes/fatores de corte de carga.

As demais notações descritas nas equações que formulam o FPO-D foram apresentadas anteriormente.

O fluxograma apresentado na Figura 3.2 detalha o processo de resolução do FPO-D através de um algoritmo desenvolvido para a utilização da ferramenta *fmincon* do *software* Matlab®. O *fmincon* é um *solver* da biblioteca de otimização, que resolve problemas de natureza contínua não-linear. Ele permite que o usuário formule o problema (fornecendo a função objetivo e as restrições de igualdade e desigualdade), sem se preocupar com o cálculo das derivadas de primeira e segunda ordem, o que é feito numericamente pelo *fmincon* durante o processo de solução. O algoritmo de otimização empregado é o Método dos Pontos Interiores.

As etapas do fluxograma serão descritas a seguir para um melhor entendimento da metodologia proposta.

Figura 3.2: Fluxograma do processo de resolução do fluxo de potência ótimo determinístico via *fmincon*. Fonte: Elaboração Própria



O Bloco 1 do fluxograma (3.2) define os valores das bases de potência, tensão e frequência, além das constantes como frequência a vazio, tensão a vazio, os coeficientes de *droop* e demais variáveis.

O Bloco 2 constrói a matriz de admitância nodal para o sistema estudado, crucial para a resolução do fluxo de potência. Com mesma objetividade o Bloco 3 define as condições iniciais necessárias através de um vetor x_0 que recebe as informações iniciais para o processo de otimização realizado pela ferramenta *fmincon*. Para melhor entendimento um exemplo é demonstrado em (3.17).

$$x_0 = [P_{G0} \quad Q_{G0} \quad V_0 \quad \theta_0 \quad f_{mg0}] \quad (3.17)$$

A seguir, no Bloco 4 são realizadas as buscas por respostas ótimas através da ferramenta

fmincon do *software* MatLab®, uma ferramenta de otimização muito utilizada que se baseia no método de pontos interiores para determinação de pontos ótimos.

Por fim, o Bloco 5 apresenta os resultados encontrados para a análise crítica do operador.

3.5 Fluxo de Potência Probabilístico para Microrredes Ilhadas

3.5.1 Fluxo de potência Probabilístico Ótimo baseado na Simulação de Monte Carlo

A Simulação Monte Carlo trata-se de uma técnica matemática usada para a estimação das variáveis estatísticas de saída (média e desvio padrão, por exemplo) conhecendo-se as variáveis estatísticas de entrada e a função que relaciona a saída com a entrada.

As ferramentas de resolução baseadas na Simulação de Monte Carlo baseam-se nas seguintes etapas.

- Identificar as variáveis dependentes a serem calculadas e as variáveis independentes (variáveis de entrada, que norteiam a predição dos resultados simulados);
- Especificação do tipo de distribuição de probabilidade das variáveis independentes;
- Execução repetida de simulações, gerando valores aleatórios das variáveis investigadas.

No presente estudo, define-se como as variáveis dependentes a serem calculadas, as tensões nas barras, as potências geradas, a frequência da microrrede e o corte mínimo de carga. Todas baseadas nas variáveis definidas pelas cargas ativas e reativas em cada barra do sistema (P_{dk} e Q_{dk}), descritas como uma distribuição normal.

A execução do método é realizada repetidas vezes, calculando se as variáveis dependentes para amostragens distintas, até que se obtenha resultados suficientes para compor uma amostra representativa do número quase infinito de combinações possíveis.

Após essa definição, efetua-se o FPP-ótimo descrito anteriormente, com as modificações realizadas. Uma forma de representar essa sequência de ações é a partir do fluxograma apresentado na Figura 3.3.

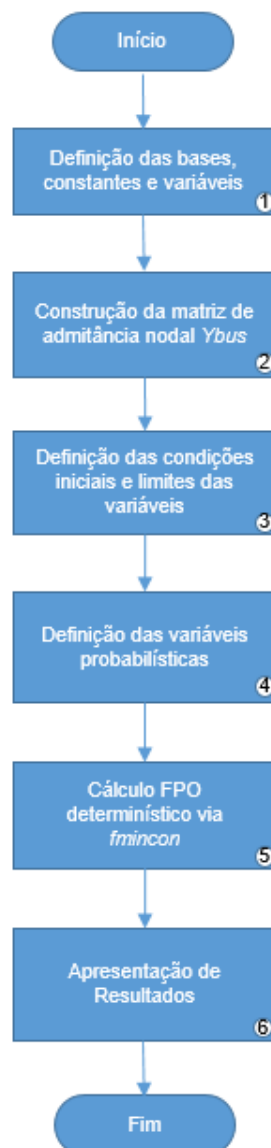
Os Blocos de 1 a 3 tem por objetivo as mesmas funções apresentadas na Seção 3.4. Essas informações serão usadas no Bloco 4 na formulação das variáveis necessárias para a Simulação de Monte Carlo: gera-se uma matriz cujas colunas representam um vetor de cargas ativas e

reativas obtidas a partir da distribuição normal. O número de colunas é o número de amostras a serem empregadas na SMC.

No Bloco 5 executa-se o fluxo de potência ótimo determinístico da Seção 3.4 para cada amostra, isto é, para cada coluna da matriz gerada no Bloco 4. Os resultados para as tensões, gerações e frequência são salvos para cada amostra.

No Bloco 6 calcula-se a média e o desvio padrão de cada variável e apresenta-se os resultados para que o operador possa tomar decisões sobre os dados apresentados.

Figura 3.3: Fluxograma do processo de resolução do fluxo de potência probabilístico baseado na Simulação de Monte Carlo através da *fmincon*. Fonte: Elaboração Própria



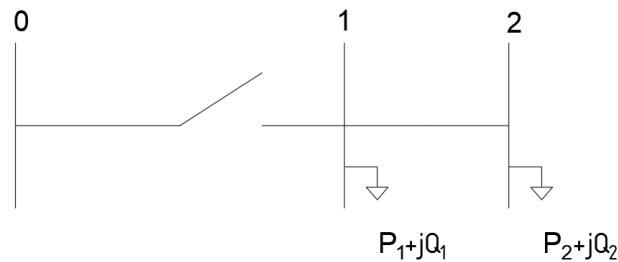
Nas simulações realizadas nesse trabalho utilizou-se números pseudo-aleatórios gerados pela função $normrnd(media, desviopadrão)$ para compor o vetor de cargas que representa

cada amostra, sendo *media* o vetor de médias (tomado como sendo o vetor com cargas ativas e reativas nominais) e *desviopadrão* o vetor de desvios padrão (tomado como sendo uma porcentagem do vetor de médias). A função *normrnd* está disponível no MatLab®.

3.5.2 Definição dos *Sigma Points* no FPP via a Transformação Unscented

O Fluxo de Potência Probabilístico baseado na Transformação *Unscented* (FPP-O via UT) utiliza-se da Seção 2.7 para a sua solução. Para o maior esclarecimento da estrutura dos *sigma points* da UT, um exemplo ilustrativo para um sistema de 2 barras com cargas ativas e reativas é apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4: Sistema 2 Barras para Exemplo. Fonte: Elaboração Própria



Para esse sistema, o número de *sigma points* está associado às variáveis incertas, neste caso, as cargas ativas e reativas P_1 , Q_1 , P_2 , Q_2 . O sistema opera ilhado a partir da abertura da chave entre as barras 0 e 1.

Assim, o número de variáveis incertas n , será igual à 4, enquanto o conjunto de *sigma points* será igual à $2n + 1 = 2 \times 4 + 1 = 9$. Importante mencionar que tem-se então uma matriz de amostras deterministicamente calculadas de ordem 4×9 , sendo cada coluna um *sigma point* que representa um vetor de cargas que alimentará o fluxo de potência determinístico.

3.5.3 Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico baseado na Transformada Unscented

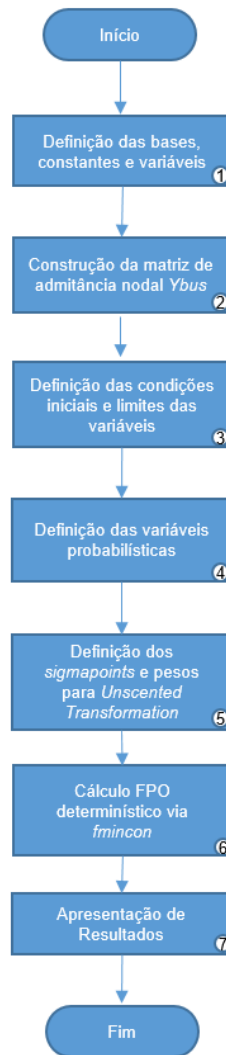
O Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico FPO-P baseado na Transformação *Unscented*, tem como objetivo a utilização do número reduzido de amostras deterministicamente calculadas (*sigma points*) para a minimização do corte de carga em microrredes ilhadas.

Considera-se que as cargas nos barramentos são modeladas conforme uma distribuição normal com média e variância conhecidas. As restrições de igualdade contemplam o balanço de potência nos barramentos e o controle de *droop* das malhas $P - f$ e $Q - V$ dos geradores ope-

rando em *grid-forming*. As restrições de desigualdade estão associadas ao limites das variáveis conforme anteriormente mencionado.

A Figura 3.5 mostra o fluxograma simplificado para a resolução do FPP-O via UT. As etapas do fluxograma serão descritas a seguir para um melhor entendimento da metodologia proposta.

Figura 3.5: Fluxograma simplificado para o cálculo do fluxo de potência ótimo probabilístico via Unscented Transformation. Fonte: Elaboração Própria



É importante mencionar que cada *sigma point* χ_i representa um vetor coluna ($n \times 1$) com os valores de carga ativa e reativa nos barramentos ($n = 2 \times nb$). Para cada χ_i , aplica-se a função não linear $\mathbf{y}_i = g(\chi_i)$, sendo \mathbf{y}_i o vetor com as grandezas de interesse e $g(\chi_i)$ o fluxo de potência ótimo determinístico.

As etapas realizadas nos Blocos 1 e 3 do fluxograma da Figura 3.5 realizam a mesma função anteriormente apresentada na Seção 3.4.

O Bloco 4 define as variáveis P_{dk} e Q_{dk} como probabilísticas, criando uma função normal

distribuída em torno do valor inicial de carga e com desvio padrão de 10% desse valor. Após essa modificação, o Bloco 5 realiza o cálculo dos *sigma points* e dos pesos W_i inerentes ao processo da UT (veja a Subseção 2.7.2).

Para cada *sigma point* executa-se o fluxo de potência ótimo determinístico da Seção 3.4 no Bloco 5. Por fim, no Bloco 6, o cálculo da média e desvio padrão das variáveis desejadas é realizado e os resultados obtidos apresentados.

3.6 Considerações Parciais

Esse capítulo apresenta as metodologias propostas para o corte de carga em microrredes alimentadas por máquinas geradoras operando no modo *grid-forming* visando a adequação do perfil de tensão nodal e adequação da frequência da microrrede quando operando de forma ilhada. Tanto metodologias determinísticas e probabilísticas foram apresentadas, sendo as últimas baseadas na Simulação Monte Carlo e na Transformação *Unscented* (principal contribuição deste trabalho).

Resultados

4.1 Considerações Iniciais

Esta seção apresenta os resultados obtidos pelas metodologias propostas para dois sistemas (33 e 70 barras), operando ilhados. Os resultados obtidos serão avaliados do ponto de vista do corte mínimo de carga e do esforço computacional.

4.2 Parâmetros Gerais para os Sistemas Considerados

Os coeficientes de *droop* e *setpoints* (frequência a vazio f_k^* e tensão a vazio V_k^*) são apresentados na Tabela 4.1. Como os parâmetros da malha $P - f$ são iguais para as máquinas geradoras, o montante de potência ativa gerada por cada unidade será o mesmo, uma vez que a frequência da microrrede (f_{mg}) é única.

Tabela 4.1: Coeficientes de *droop* e *setpoints* (frequência e tensão a vazio).

s_{pk} (pu)	s_{qk} (pu)	f_k^* (Hz)	V_k^* (pu)
0,002	0,002	60	1,01

A Tabela 4.2 apresenta os dados dos limites das variáveis utilizados nos estudos de fluxo de potência apresentados nesse trabalho.

Tabela 4.2: Limites das variáveis

Variável	min	max
f_{mg} (Hz)	59,9	60,1
P_{gk} (MW)	0	1,5
Q_{gk} (Mvar)	-2,0	2,0
V_k (pu)	0,9	1,1

4.3 Sistema 33 Barras

4.3.1 Descrição do Sistema

O sistema radial 33 barras foi proposto originalmente em 1989 [70] e possui 32 ramos. O ilhamento do sistema ocorre mediante a desconexão das barras 33 (subestação) e 1, como demonstrado na Figura 4.1. Quando a operação é ilhada, a referência angular adotada é a barra 01. O sistema possui um ponto de operação nominal com carga atendida de 3,715 MW e 2,3 Mvar. As bases de potência, tensão e frequência adotadas são 1 MVA, 12,66 kV e 60 Hz, respectivamente.

Para fins deste trabalho, as unidades geradoras são alocadas nas barras 02, 12 e 29. Com essa configuração tem-se os menores valores de perdas para esse sistema [5].

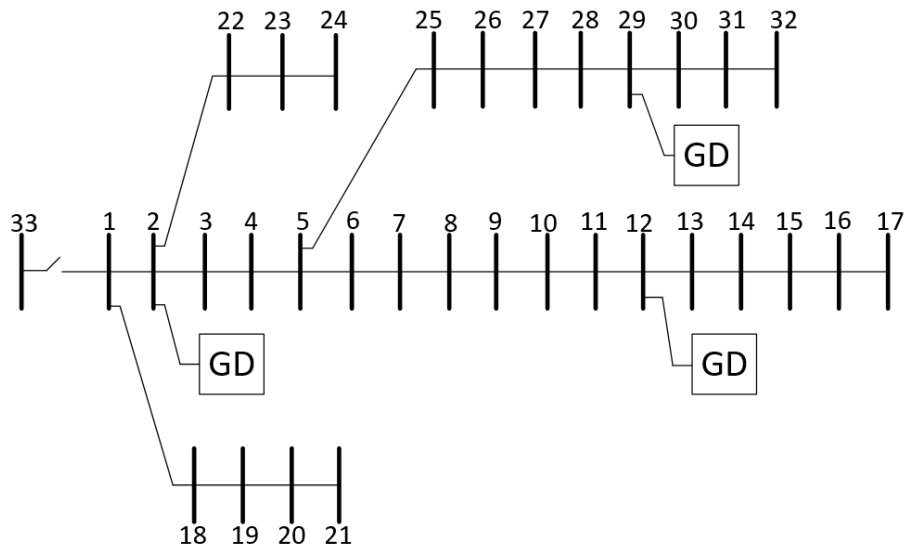
4.3.2 Solução do Caso Base para o Sistema 33 Barras

A primeira análise refere-se ao sistema operando com carga nominal, ou seja, demonstra qual o ponto de operação o sistema inicialmente opera. Para isso, executa-se o fluxo de potência determinístico da Seção 3.3 levando-se em consideração as características de controle de *droop*.

Tabela 4.3: Solução do fluxo de potência convencional Sistema 33 Barras

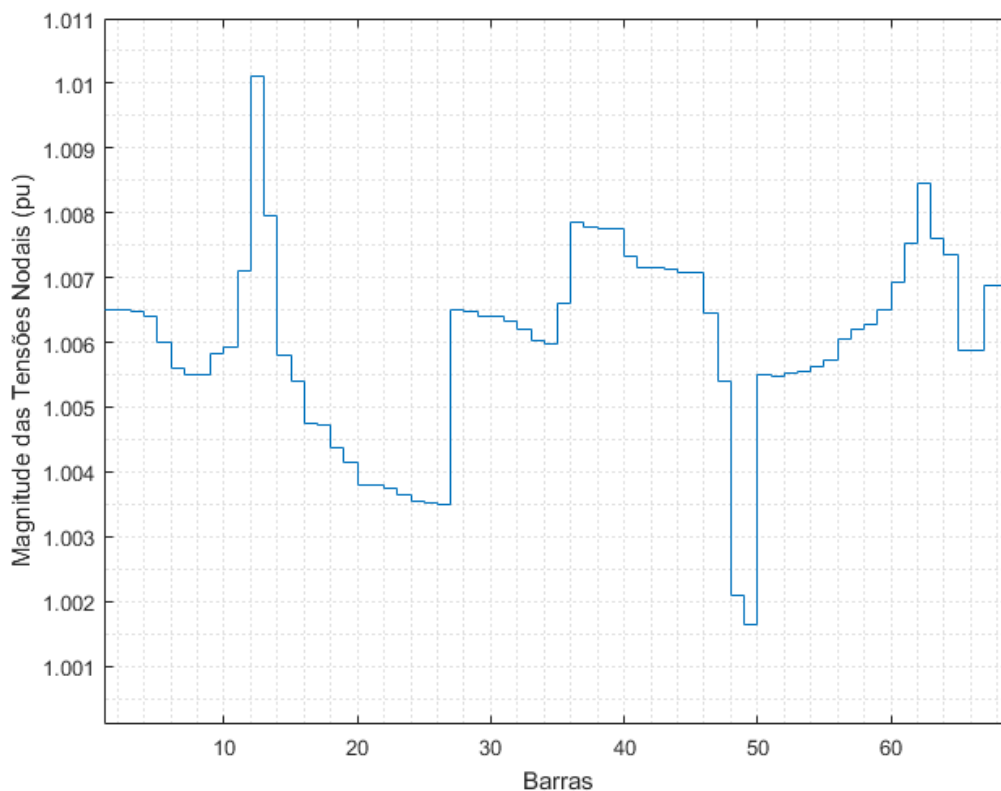
Variável	Valor	Variável	Valor
P_{g2} (MW)	1,2555	Q_{g2} (Mvar)	1,8506
P_{g12} (MW)	1,2555	Q_{g12} (Mvar)	-0,1930
P_{g29} (MW)	1,2555	Q_{g29} (Mvar)	0,6801
V_{min} (pu)	0,9930	V_{max} (pu)	1,0104
f_{mg} (Hz)	59,8490	-	-

Figura 4.1: Sistema 33 Barras. Fonte: [13].



A partir dessa análise, foi identificado que os valores das gerações, demonstrados na Tabela 4.3 e o perfil de tensão nas barras, apresentado na Figura 4.2, se apresentam dentro da faixa permitida pelos limites da Tabela 4.2, porém, a frequência da microrrede f_{mg} é igual a 59,849 Hz, não respeitando o limite mínimo. Dessa forma, um procedimento de corte de carga ótimo deve ser realizado.

Figura 4.2: Magnitude das tensões nodais (sistema de 33 barras ilhado). Fonte: Elaboração Própria



4.3.3 Fluxo de Potência Ótimo Determinístico

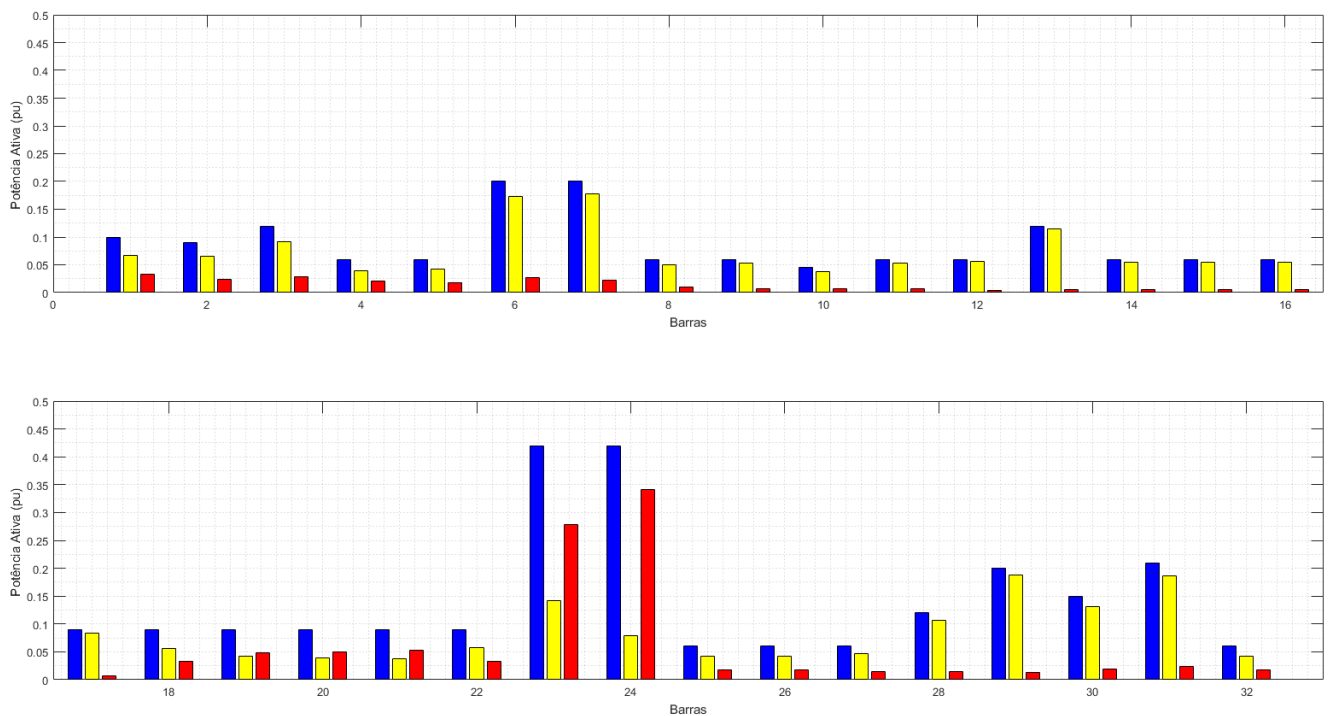
A partir do fluxo de potência ótimo determinístico da Seção 3.4, faz se possível a busca de acomodar a frequência da microrrede dentro dos limites aceitáveis. Resolvendo o FPO determinístico com a função de minimizar o corte de carga, é determinado o novo ponto de operação do sistema, uma vez que a partir do corte de carga determinado, espera-se um novo ponto de operação, onde todas as variáveis estudadas estão dentro dos limites determinados.

Tabela 4.4: Solução do fluxo de potência ótimo determinístico

Variável	Valor	Variável	Valor
P_{g2} (MW)	0,8373	Q_{g2} (Mvar)	0,6982
P_{g12} (MW)	0,8373	Q_{g12} (Mvar)	0,1442
P_{g29} (MW)	0,8373	Q_{g29} (Mvar)	0,8532
V_{min} (pu)	1,0032	V_{max} (pu)	1,0097
f_{mg} (Hz)	59,90	-	-

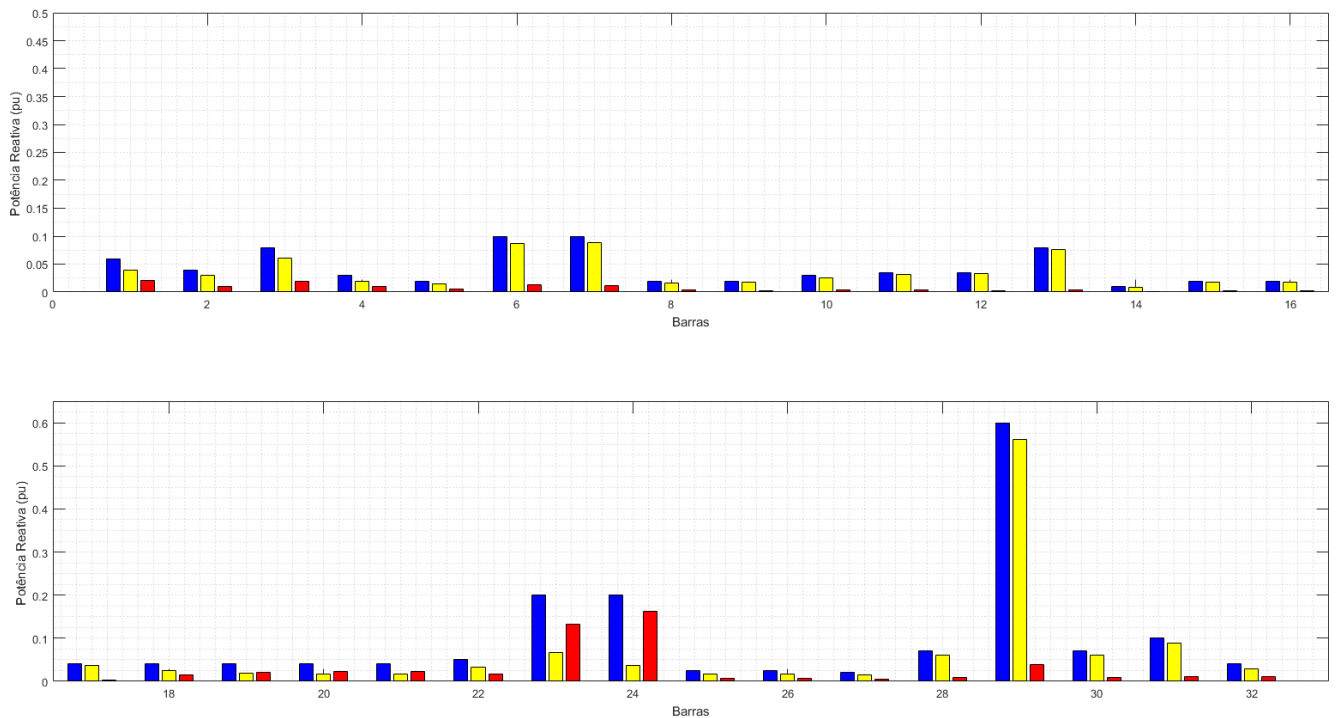
As Figuras 4.3 e 4.4 mostram as cargas P_{dk} e Q_{dk} conectadas ao sistema, comparando as cargas iniciais, cargas após o corte e também a carga cortada para que a f_{mg} atenda os limites de frequência.

Figura 4.3: Comparação das cargas ativas em pu por barra: Carga Inicial; Carga Após o corte; Corte de carga. Azul: Carga Inicial; Amarelo: Carga Final; Vermelho: Corte de carga na barra. Fonte: Elaboração Própria



A Tabela 4.5 apresenta o montante de carga cortada a partir da solução determinística do

Figura 4.4: Comparação das cargas reativas em pu por barra: Carga Inicial; Carga Após o corte; Corte de carga. Azul: Carga Inicial; Amarelo: Carga Final; Vermelho: Corte de carga na barra. Fonte: Elaboração Própria



FPO. Para essa solução do FPO 32,62% da carga ativa é cortada. O corte de carga ocorre de forma proporcional à carga conectada em cada barra do sistema.

Tabela 4.5: Solução Determinística do FPO: Montante de Cargas

Variável	Valor Absoluto	Porcentagem (%)
Corte em MW (%)	1,2120	32,62
Restante em MW (%)	2,5030	67,38
Corte em Mvar (%)	0,6117	26,60
Restante em Mvar (%)	1,6883	73,40

4.3.4 Avaliação Probabilística da Solução do Fluxo de Potência Ótimo Determinístico do Sistema 33 Barras

Uma das análises a serem realizadas trata-se de identificar como se comporta a solução determinística (frequência elétrica) diante da incerteza da carga. Para isso, o Fluxo de Potência Probabilístico baseado na Simulação Monte Carlo (SMC) da Seção 3.5.1 será utilizado (sendo que no Bloco 5 da Figura 3.3 utiliza-se o fluxo de potência determinístico da Seção 3.3). Ao final, calcula-se a média e o desvio padrão da frequência e das demais variáveis de interesse. As

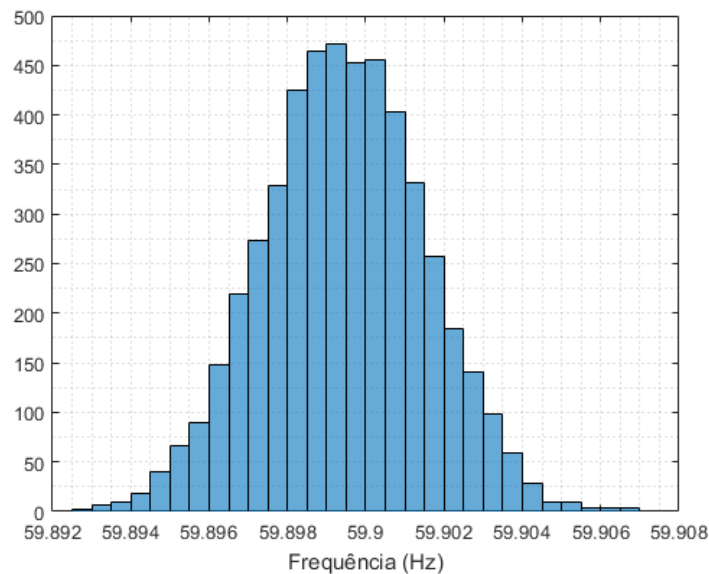
cargas ativa e reativa são modeladas com média igual ao valor após o montante de carga cortada através do método determinístico e um desvio padrão igual à 10% da média.

A forma mais efetiva de analisar esses resultados é calcular a probabilidade de satisfação aos limites, conforme discutido por [12], o que será feito somente para a frequência a partir dos valores estatísticos calculados. A probabilidade é apresentada em (4.1), que é um valor relativamente baixo, mostrando que o FPO determinístico pode não ser eficiente (como não foi nesse caso).

$$P_r \{59,90 \leq f_{mg} \leq 60,10\} = 39.42\% \quad (4.1)$$

O fluxograma apresentado na Figura 4.5 demonstra essa baixa probabilidade, com amostras de frequência fora do intervalo de interesse para a microrrede.

Figura 4.5: Histograma frequência da microrrede (f_{mg}). Fonte: Elaboração Própria



A Tabela 4.6 apresenta os resultados da Simulação Monte Carlo considerando 5000 amostras de carga.

4.3.5 Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico para o Sistema 33 Barras

Nessa seção aplica-se o Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico proposto na Seção 3.5. São definidos números distintos de amostras da SMC, variando-se entre 1000 amostras a 5000 amostras. Para a UT é definido um número de 129 *sigma points*. Esse número foi definido

Tabela 4.6: Avaliação probabilística da solução determinística

Variável	Média	Desvio Padrão
f_{mg} (Hz)	59,89900	0,0020817
P_{g2} (MW)	0,83799	0,017348
P_{g12} (MW)	0,83799	0,017348
P_{g29} (MW)	0,83799	0,017348
Q_{g2} (Mvar)	0,6982	0,026275
Q_{g12} (Mvar)	0,1442	0,0242
Q_{g29} (Mvar)	0,8532	0,057838

considerando as 64 variáveis incertas (32 cargas ativas e 32 reativas): o número de amostras da UT é, portanto, $2 \times n + 1 = 2 \times 64 = 129$.

Comparando os resultados obtidos e apresentados na Tabela 4.7, de modo a avaliar os valores de média e desvio padrão das variáveis de interesse, nota-se que ambas as metodologias fornecem resultados próximos quando comparadas as médias das variáveis probabilísticas e ainda é possível identificar uma diferença mais acentuada para o desvio padrão.

Para a f_{mg} , quando comparadas às respostas encontradas via SMC, nota-se uma sobrestimação da probabilidade de satisfação aos limites. Tal discrepância pode ser reduzida pela calibração do parâmetro κ (vide equação 2.7).

Ao contrário do FPO determinístico, a metodologia probabilística apresenta uma solução com boa probabilidade de satisfação aos limites de frequência. Entretanto, recorda-se que os coeficientes de corte de carga são probabilísticos (caracterizados por média e desvio padrão), cabendo o operador selecionar os casos mais promissores e realizar as validações correspondentes.

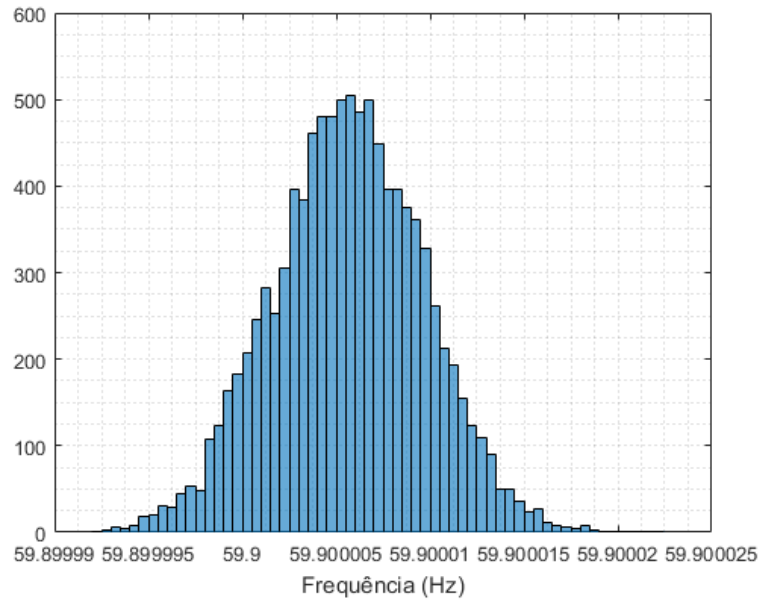
Tabela 4.7: Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Frequência

	UT		SMC	
Nº de amostras	129	1000	3000	5000
Média	59,9000	59,9000	59,9000	59,9000
Desvio Padrão ($\times 10^{-5}$)	0,4018	0,8133	0,7539	0,8133
Probabilidade (%)	92,0510	82,9167	84,1102	82,9167

Uma comparação válida a ser realizada refere-se a probabilidade de encontrar respostas do fluxo de potência dentro dos limites permitidos. Essa probabilidade de atender aos critérios

quando analisado a incerteza da carga pode ser vista na Figura 4.6, um histograma referente à frequência da microrrede f_{mg} com base na solução via UT.

Figura 4.6: Histograma frequência da microrrede para o FPP-Ótimo via UT. Fonte: Elaboração Própria



A Tabela 4.8 apresenta a média e desvio padrão para P_{gk} (que é o mesmo para todas unidades geradoras), comparando a resolução do FPO probabilístico para os dois métodos apresentados, UT com 129 *sigma points* e SMC para 1000 amostras, 3000 amostras e 5000 amostras.

Tabela 4.8: Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Potência Ativa Gerada (MW)

		UT		SMC	
Nº de amostras		129	1000	3000	5000
Média (MW)	P_{g2}	0,8373	0,8373	0,8373	0,8373
	P_{g12}	0,8373	0,8373	0,8373	0,8373
	P_{g29}	0,8373	0,8373	0,8373	0,8373
Desvio Padrão ($\times 10^{-3}$) (MW)	P_{g2}	0,1244	0,2470	0,2290	0,2470
	P_{g12}	0,1281	0,2553	0,2365	0,2553
	P_{g29}	0,1257	0,2502	0,2320	0,2502

A comparação da potência reativa gerada Q_{gk} em cada máquina é apresentada na Tabela 4.9, onde pode-se notar que para a média dos resultados encontrados, existe uma pequena diferença nos valores quando resolvidos através da metodologia baseada na UT como também

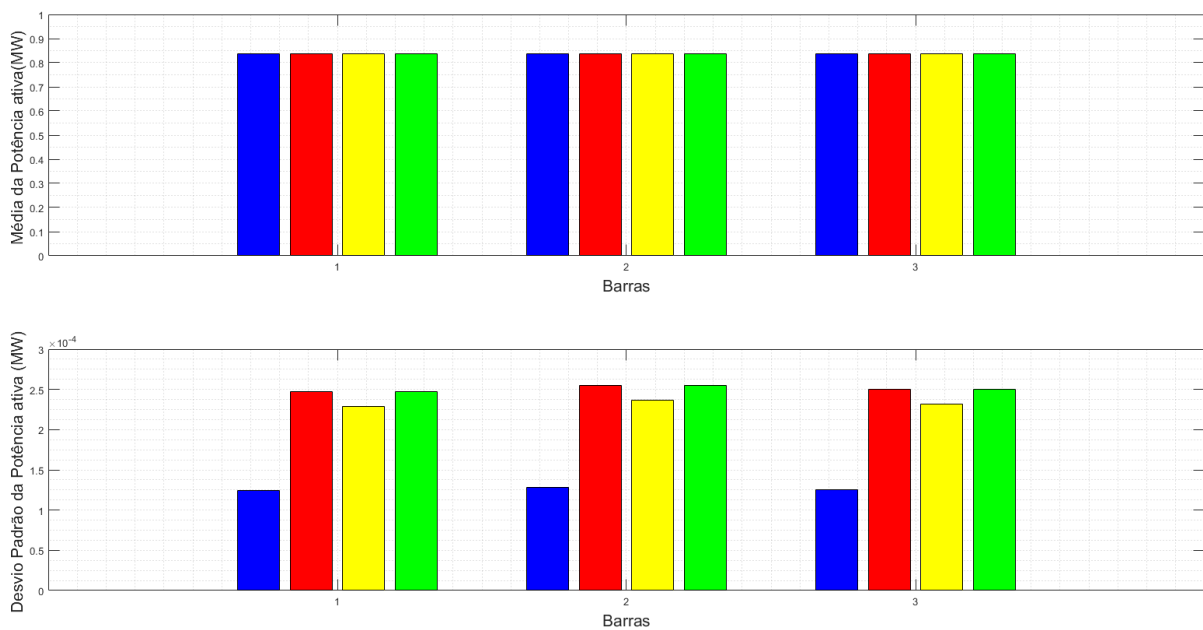
para a baseada na SMC. Pode-se perceber que há uma maior diversidade de resultados, quando comparados para os desvios padrão.

Tabela 4.9: Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Potência Reativa Gerada (Mvar)

Nº de amostras		UT		SMC	
		129	1000	3000	5000
	Q_{g2}	0,6845	0,7017	0,7009	0,7017
Média	Q_{g12}	0,1544	0,1443	0,1457	0,1443
(Mvar)	Q_{g29}	0,8599	0,8475	0,8502	0,8475
	Q_{g2}	0,0516	0,0786	0,0729	0,0786
Desvio Padrão	Q_{g12}	0,0340	0,0479	0,0442	0,0479
(Mvar)	Q_{g29}	0,0626	0,0676	0,0667	0,0676

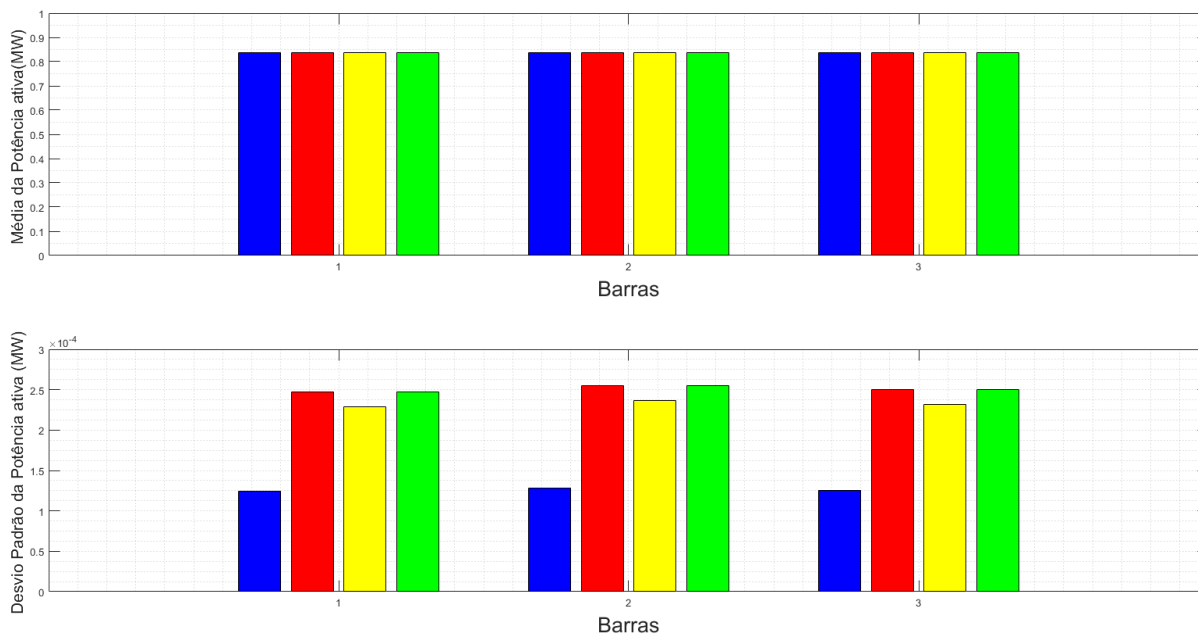
A Figura 4.7 ilustra os valores de potência ativa (média e desvio padrão) gerada em cada máquina conforme cada método probabilístico utilizado.

Figura 4.7: Média e Desvio Padrão da Potência ativa gerada em cada gerador (MW). Azul: UT; Vermelho: SMC 1000 amostras; Amarelo: SMC 3000 amostras; Verde: SMC 5000 amostras. Fonte: Elaboração Própria



A Figura 4.8 ilustra, através de um gráfico de barras, a diferença entre os desvios padrão para as potências reativas geradas.

Figura 4.8: Média e Desvio Padrão da Potência reativa gerada em cada gerador (Mvar). Azul: UT; Vermelho: SMC 1000 amostras; Amarelo: SMC 3000 amostras; Verde: SMC 5000 amostras. Fonte: Elaboração Própria



Outra análise importante a ser realizada é sobre o resultado das tensões nodais no sistema para as metodologias aplicadas. As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam respectivamente a comparação das médias e dos desvios padrões.

Figura 4.9: Comparação Média das tensões das barras para UT e SMC. Azul: UT; Vermelho: SMC 1000 amostras; Amarelo: SMC 3000 amostras; Verde: SMC 5000 amostras. Fonte: Elaboração Própria

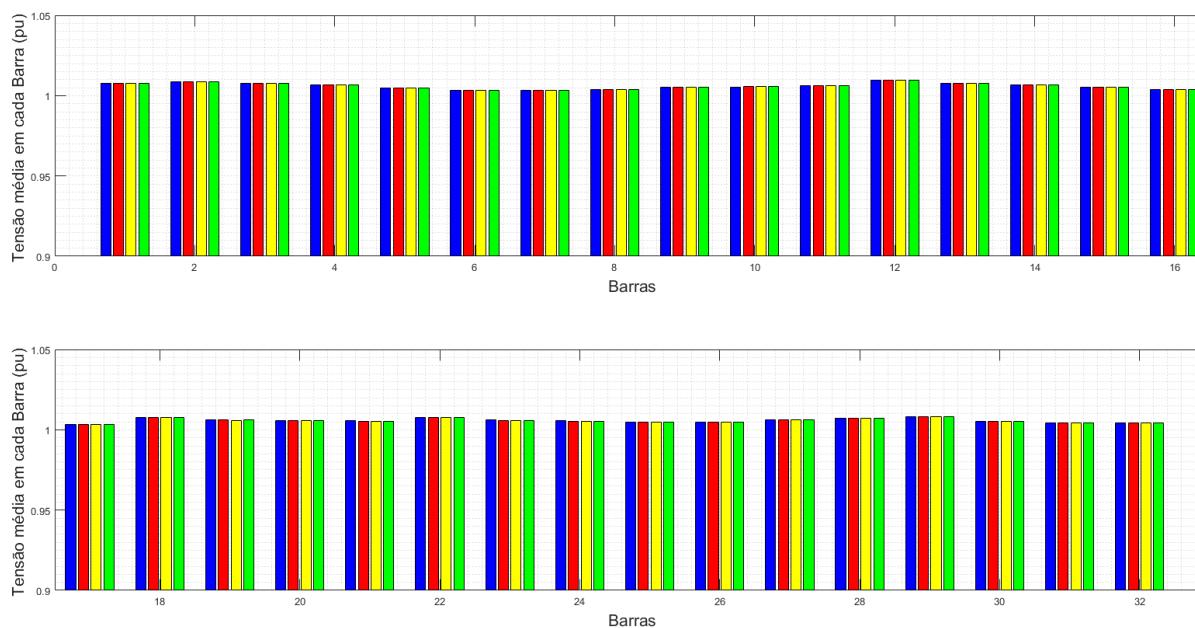
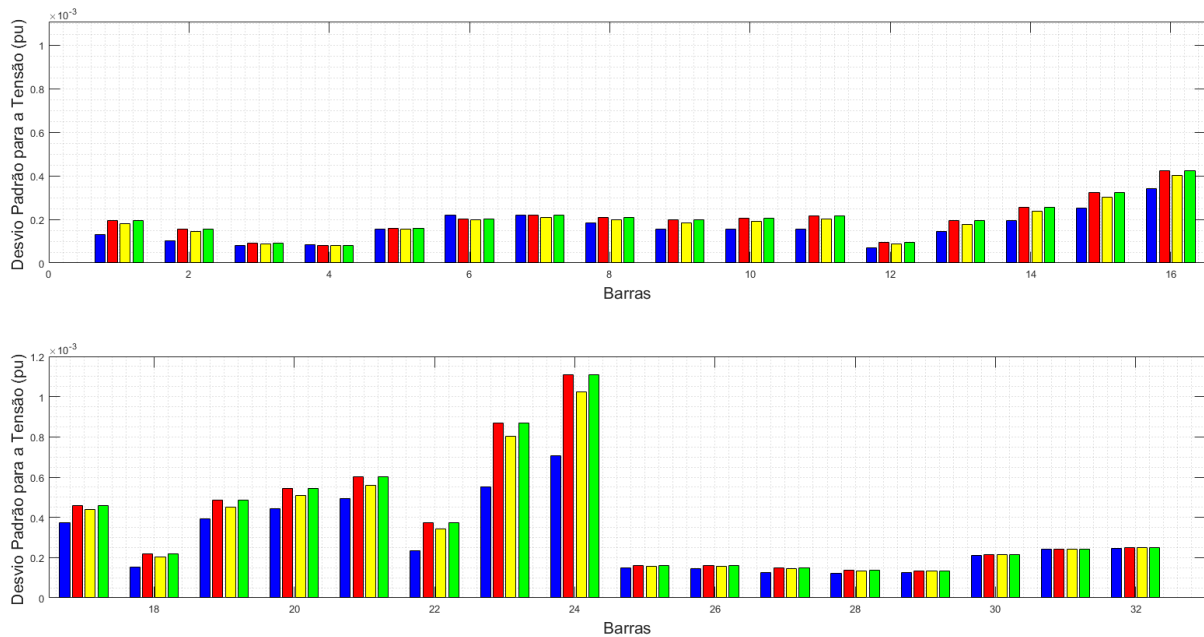


Figura 4.10: Comparação do desvio padrão das tensões das barras para UT e SMC. Azul: UT; Vermelho: SMC 1000 amostras; Amarelo: SMC 3000 amostras; Verde: SMC 5000 amostras. Fonte: Elaboração Própria



A Tabela 4.10 apresenta o montante de carga cortado, evidenciando a continuidade no padrão das análises, mostrando baixa ou nenhuma variação para as médias, e um desvio padrão levemente diferente.

Tabela 4.10: Resultado do FPO Probabilístico: Análise dos Montantes de Corte (MW/Mvar) Sistema 33 Barras

		UT		SMC	
Nº de amostras		129	1000	3000	5000
Potência Ativa (MW)	Média	1,2117	1,2154	1,2143	1,2154
	Desvio Padrão	0,0833	0,0820	0,0837	0,0820
Potência Reativa (Mvar)	Média	0,6083	0,6114	0,6105	0,6114
	Desvio Padrão	0,0357	0,0378	0,0378	0,0378

4.3.6 Impacto do Desvio Padrão da Carga na Solução do FPO Probabilístico via UT para o Sistema 33 Barras

Nessa parte avalia-se o comportamento da solução do FPP-O via UT diante da incerteza da carga. Ao modificar o desvio padrão de P_{dk} e Q_{dk} , para $\sigma=5\%$ e $\sigma=15\%$ do valor da média μ , percebe-se a não ocorrência de modificações consideráveis para a frequência da microrrede após o procedimento do corte de carga. A Tabela 4.21 apresenta o comparativo da f_{mg} nos três cenários estudados.

Tabela 4.11: Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Frequência para diversos desvios padrão das cargas

	$\sigma = 5\%$	$\sigma = 10\%$	$\sigma = 15\%$
Média (Hz)	59,9000	59,9000	59,9000
Desvio Padrão ($\times 10^{-5}$) (Hz)	0,52344	0,4018	0,5965
Probabilidade (%)	87,49	92,0510	87,61

A Tabela 4.12 apresenta o comparativo entre os montantes de corte com a modificação do desvio padrão para o modelo de carga probabilístico resolvido via UT.

Tabela 4.12: Resultado do FPO Probabilístico: Análise dos Montantes de Corte (MW/Mvar) para variação do desvio padrão da carga

		$\sigma = 5\%$	$\sigma = 10\%$	$\sigma = 15\%$
Potência Ativa (MW)	Média	1,2118	1,2117	1,2121
	Desvio Padrão	0,041577	0,0833	0,12483
Potência Reativa (Mvar)	Média	0,6068	0,6083	0,6195
	Desvio Padrão	0,0219	0,0357	0,05644

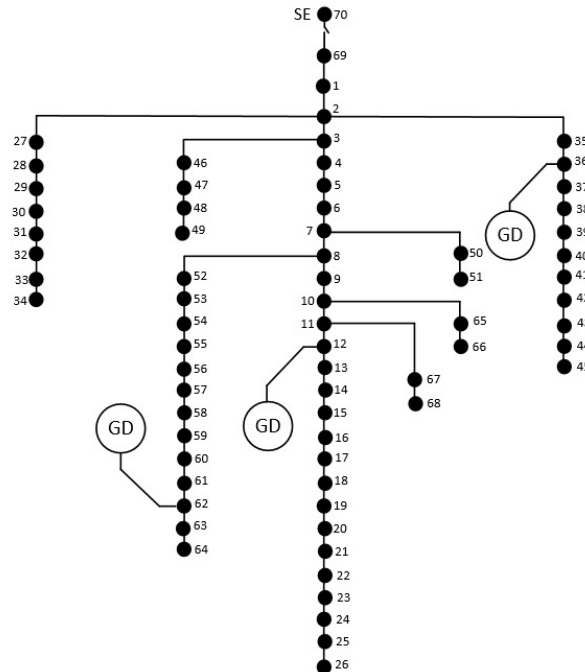
4.4 Sistema 70 Barras

4.4.1 Descrição do Sistema

O sistema radial 70 barras opera conectado ao sistema principal e possui 69 ramos e foi proposto por [71]. O ilhamento do sistema ocorre mediante a desconexão das barras 70 (subestação) e 69, como demonstrado na Figura 4.11. Quando à operação ilhada, a referência angular adotada é a barra 01 (é importante mencionar que qualquer barra da microrrede pode ser tomada como referência). No ponto de operação nominal tem-se uma carga atendida de 3,8022 MW e 2,6946 Mvar [71]. As bases de potência, tensão e frequência adotadas são 1 MVA, 12,66

kV e 60 Hz, respectivamente. Para fins deste trabalho, as unidades geradoras são alocadas nas barras 12, 36 e 62, que são as barras para a ótima alocação das unidades geradoras de modo a minimizar as perdas nas linhas do sistema como demonstrado por [5].

Figura 4.11: Sistema 70 Barras. Fonte: [13]



4.4.2 Solução do Caso Base para o Sistema 70 Barras

Como visto anteriormente, na Seção 4.3 o primeiro passo é a solução do caso base do sistema, ou seja, faz-se a execução do fluxo de potência determinístico. A Tabela 4.13 apresenta a solução do fluxo de potência determinístico. Observa-se que a f_{mg} é inferior ao limite de 59,9 Hz, indicando a necessidade do corte ótimo de carga.

Tabela 4.13: Solução do fluxo de potência convencional Sistema 70 Barras

Variável	Valor	Variável	Valor
P_{g12} (MW)	1,2888	Q_{g12} (Mvar)	-0,5322
P_{g36} (MW)	1,2888	Q_{g36} (Mvar)	1,1933
P_{g62} (MW)	1,2888	Q_{g62} (Mvar)	2,0649
V_{min} (pu)	1,0003	V_{max} (pu)	1,0111
f_{mg} (Hz)	59,8453	-	-

4.4.3 Fluxo de Potência Ótimo Determinístico para o Sistema 70 Barras

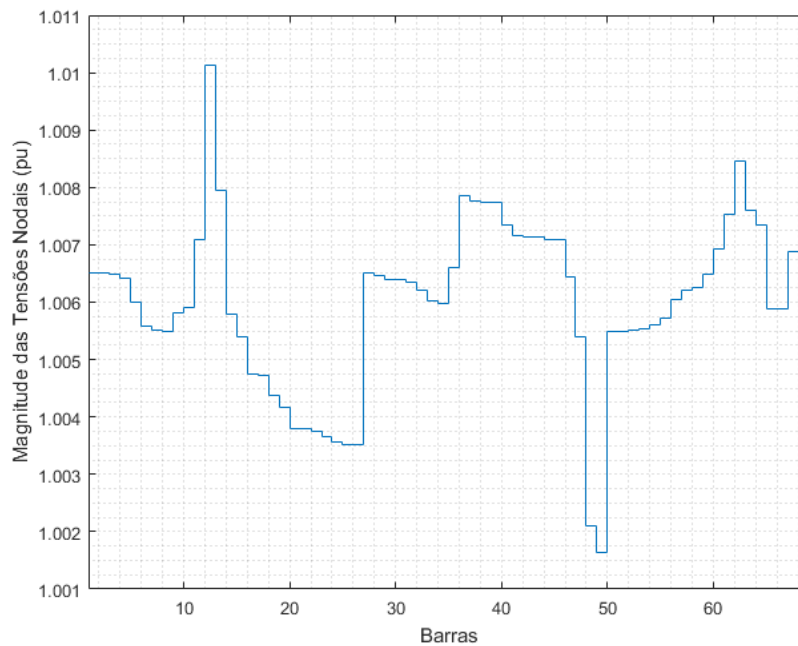
A Tabela 4.13 apresenta os resultados da solução do FPO-determinístico, as potências ativa e reativa fornecida pelas máquinas geradores, a tensão nodal dos barramentos e a frequência da microrrede estudada f_{mg} .

Tabela 4.14: Solução do fluxo de potência convencional Sistema 70 Barras

Variável	Valor	Variável	Valor
P_{g12} (MW)	0,8365	Q_{g12} (Mvar)	-0,0594
P_{g36} (MW)	0,8365	Q_{g36} (Mvar)	1,0669
P_{g62} (MW)	0,8365	Q_{g62} (Mvar)	0,7694
V_{min} (pu)	1,0021	V_{max} (pu)	1,0101
f_{mg} (Hz)	59,900	-	-

As tensões nas barras do sistema apresentam um comportamento em torno de 1 p.u e são apresentadas de forma gráfica pela Figura 4.12.

Figura 4.12: Magnitude das tensões nodais (sistema de 70 barras ilhado). Fonte: Elaboração Própria



4.4.4 Avaliação Probabilística do Fluxo de Potência Ótimo Determinístico do Sistema 70 Barras

A análise que deve ser realizada é como se comporta a solução determinística (frequência e coeficientes de corte de carga) diante da incerteza da carga, modelada com valores de média e de desvio padrão. Para a solução probabilística, P_{dk} e Q_{dk} são atualizados a partir dos coeficientes

de corte de carga calculados pelo FPO-Determinístico. Para a análise, o Fluxo de Potência Probabilístico baseado na Simulação Monte Carlo (SMC) da Seção 3.5.1 será utilizado (sendo que no Bloco 5 da Figura 3.3 utiliza-se o fluxo de potência determinístico da Seção 3.3).

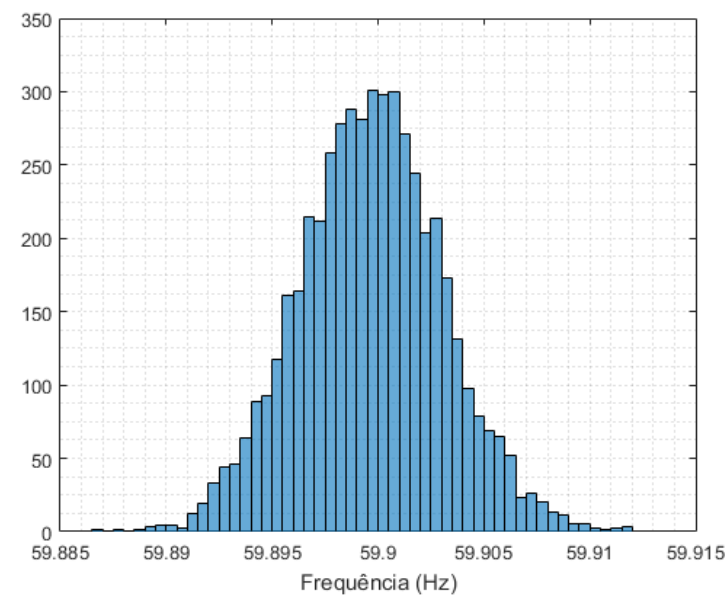
A Tabela 4.15 apresenta a média e o desvio padrão para as variáveis de interesse resultantes do fluxo de potência probabilístico determinístico baseado na SMC com um conjunto de 5000 amostras para as ativas e reativas.

Tabela 4.15: Avaliação probabilística da solução determinística do Sistema 70 Barras

Variável	Média	Desvio Padrão
f_{mg} (Hz)	59,8996	0,0034
P_{g12} (MW)	0,8367	0,0283
P_{g36} (MW)	0,8367	0,0283
P_{g62} (MW)	0,8367	0,0283
Q_{g12} (Mvar)	-0,0590	0,0637
Q_{g36} (Mvar)	1,0680	0,0625
Q_{g62} (Mvar)	0,7690	0,1005

O histograma, apresentado na Figura 4.13, demonstra o comportamento da f_{mg} quando se considerada a incerteza das cargas. Uma porcentagem das respostas encontram-se visualmente fora dos limites (59,9 a 60,1 Hz).

Figura 4.13: Histograma da frequência da microrrede SMC 5000 amostras Sistema 70 Barras Fonte: Elaboração Própria



A probabilidade de satisfação aos limites é apresentada em (4.2), demonstrando que a análise determinística, quando validada a partir da incerteza da carga, pode ser ineficaz, visto a baixa probabilidade de obtenção de resultados dentro dos limites válidos.

$$P_r \{59,90 \leq f_{mg} \leq 60,10\} = 45,30\% \quad (4.2)$$

4.4.5 Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico para o Sistema 70 Barras

Inicialmente, definiu-se um número de amostras da SMC para resolução do sistema 70 Barras como 1000, 3000 e 5000 amostras. Em seguida, para a UT, calculou-se o número de 277 *sigma points*. O número de amostras da UT é fixo e depende do número de variáveis incertas (nesse caso 138, sendo 69 cargas ativas e 69 cargas reativas): $2 \times n + 1 = 2 \times 138 + 1 = 277$.

A Figura 4.14 apresenta a comparação da média das tensões encontradas em cada barra do sistema, já a Figura 4.15 expõe o desvio padrão para o mesmo conjunto de barras. Comparando os resultados obtidos pela execução dos FPP-O, nota-se que ambas as metodologias fornecem resultados próximos. Como observado para o sistema 33 barras, ocorre uma diferença mais acentuada para o desvio padrão.

Figura 4.14: Comparação da média das das tensões das barras para UT e SMC no sistema 70 barras. Azul: UT; Vermelho: SMC 1000 amostras; Amarelo: SMC 3000 amostras; Verde: SMC 5000 amostras.
Fonte: Elaboração Própria

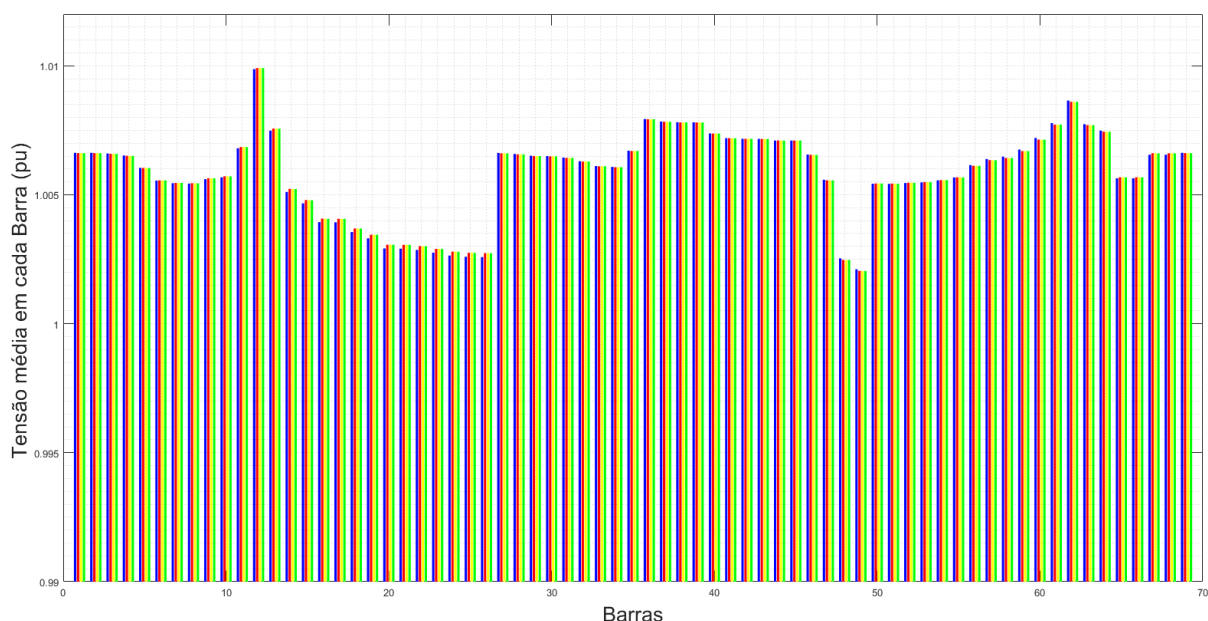
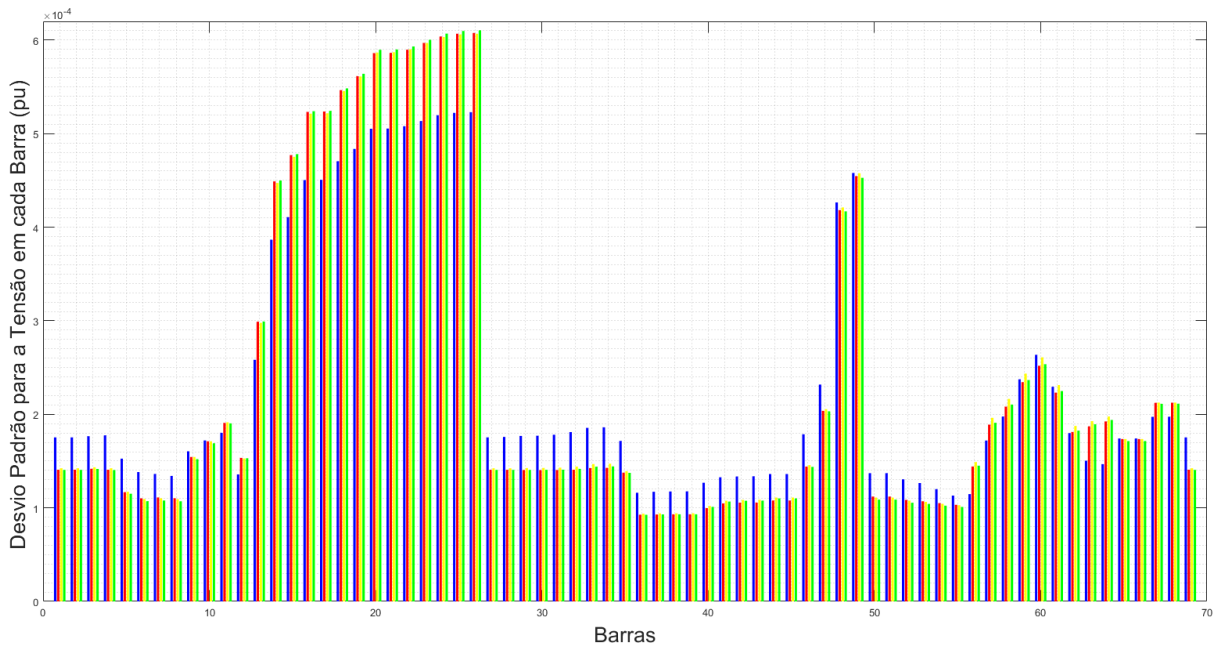


Figura 4.15: Comparação do desvio padrão das tensões das barras para UT e SMC no sistema 70 barras. Azul: UT; Vermelho: SMC 1000 amostras; Amarelo: SMC 3000 amostras; Verde: SMC 5000 amostras.

Fonte: Elaboração Própria



A comparação entre as potências ativas e reativas geradas são apresentadas de forma gráfica através das Figuras 4.16 e 4.17.

Figura 4.16: Média e Desvio Padrão da Potência ativa gerada em cada gerador (MW) no Sistema 70 Barras. Azul: UT; Vermelho: SMC 1000 amostras; Amarelo: SMC 3000 amostras; Verde: SMC 5000 amostras. Fonte: Elaboração Própria

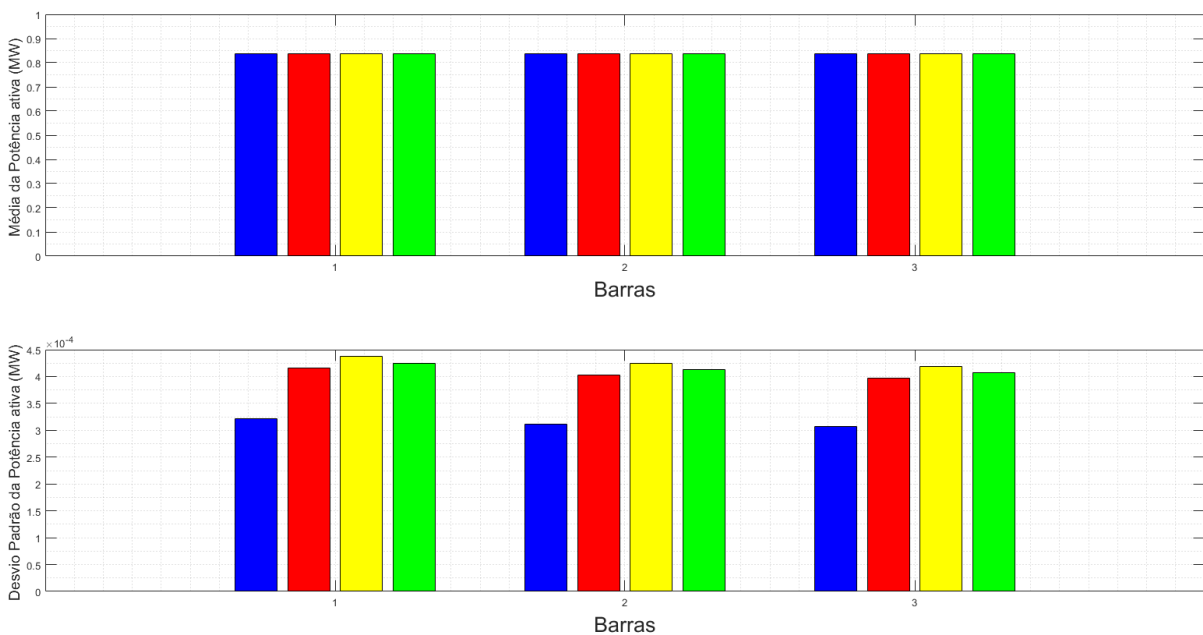
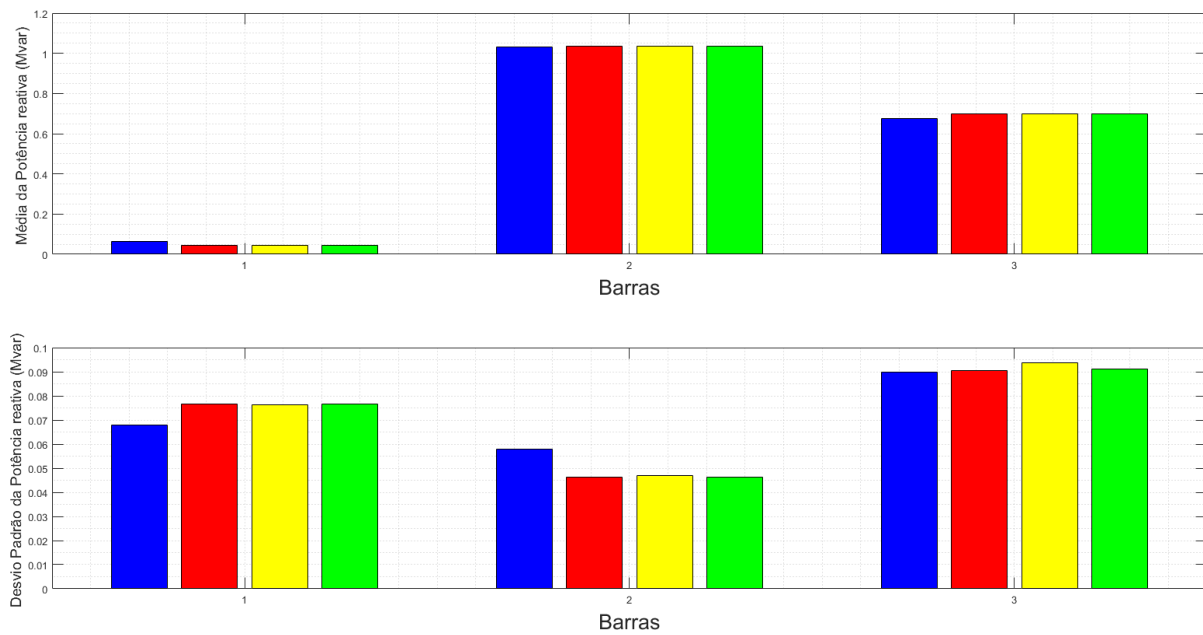


Figura 4.17: Média e Desvio Padrão da Potência reativa gerada em cada gerador (Mvar) no Sistema 70 Barras. Azul: UT; Vermelho: SMC 1000 amostras; Amarelo: SMC 3000 amostras; Verde: SMC 5000 amostras. Fonte: Elaboração Própria



A Tabela 4.16 compara os valores encontrados em ambos métodos para a f_{mg} do sistema 70 barras. De mesmo modo, as Tabelas 4.17 e 4.18 apresentam respectivamente a análise para as potências ativas e reativas geradas.

Tabela 4.16: Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Frequência Sistema 70 Barras

	UT		SMC	
Nº de amostras	277	1000	3000	5000
Média (Hz)	59,900	59,900	59,900	59,900
Desvio Padrão ($\times 10^{-5}$) (Hz)	1,0226	1,4089	1,5398	1,4703
Probabilidade (%)	86,6693	85,9942	84,0189	84,85

Tabela 4.17: Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Potência Ativa Gerada (MW) Sistema 70 Barras

Nº de amostras		UT		SMC	
		277	1000	3000	5000
Média (MW)	P_{g12}	0,8371	0,8370	0,8370	0,8370
	P_{g36}	0,8372	0,8370	0,8370	0,8370
	P_{g62}	0,8372	0,8370	0,8370	0,8370
Desvio Padrão ($\times 10^{-4}$) (MW)	P_{g12}	0,3211	0,4157	0,4377	0,4257
	P_{g36}	0,3109	0,4032	0,4251	0,4126
	P_{g62}	0,3067	0,3976	0,4189	0,4069

Tabela 4.18: Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Potência Reativa Gerada (Mvar) Sistema 70 Barras

Nº de amostras		UT		SMC	
		277	1000	3000	5000
Média (Mvar)	Q_{g12}	0,0654	0,044	0,0447	0,0451
	Q_{g36}	1,032	1,0358	1,0363	1,0363
	Q_{g62}	0,675	0,6977	0,70	0,6980
Desvio Padrão (Mvar)	Q_{g12}	0,0679	0,0767	0,0764	0,0765
	Q_{g36}	0,058	0,0463	0,0469	0,0463
	Q_{g62}	0,0899	0,0906	0,0938	0,0912

Por fim, são apresentados na Tabela 4.19 o montante de corte de potência ativa e reativa no sistema 70 barras ilhado para que a frequência da microrrede seja estabelecida dentre os limites permitidos.

Ainda faz se a comparação das cargas alimentadas antes e após o corte de carga ótimo através das Figuras 4.18 e 4.19 para as cargas ativas e das Figuras 4.20 e 4.21 para as cargas reativas.

Tabela 4.19: Resultado do FPO Probabilístico: Análise dos Montantes de Corte (MW/Mvar) Sistema 70 Barras. Fonte: Elaboração Própria

		UT		SMC	
Nº de amostras		277	1000	3000	5000
Potência Ativa (MW)	Média	1,3019	1,3068	1,3026	1,3053
	Desvio Padrão	0,1408	0,1405	0,1412	0,1422
Potência Reativa (Mvar)	Média	0,9309	0,9234	0,9219	0,9227
	Desvio Padrão	0,0553	0,0744	0,0754	0,0753

Figura 4.18: Comparação das cargas ativas em pu por barra: Carga Inicial; Carga Após o corte de carga (Barras 1 a 35). Azul: Carga Inicial; Amarelo: Carga Final; Vermelho: Corte de carga na barra. Fonte: Elaboração Própria

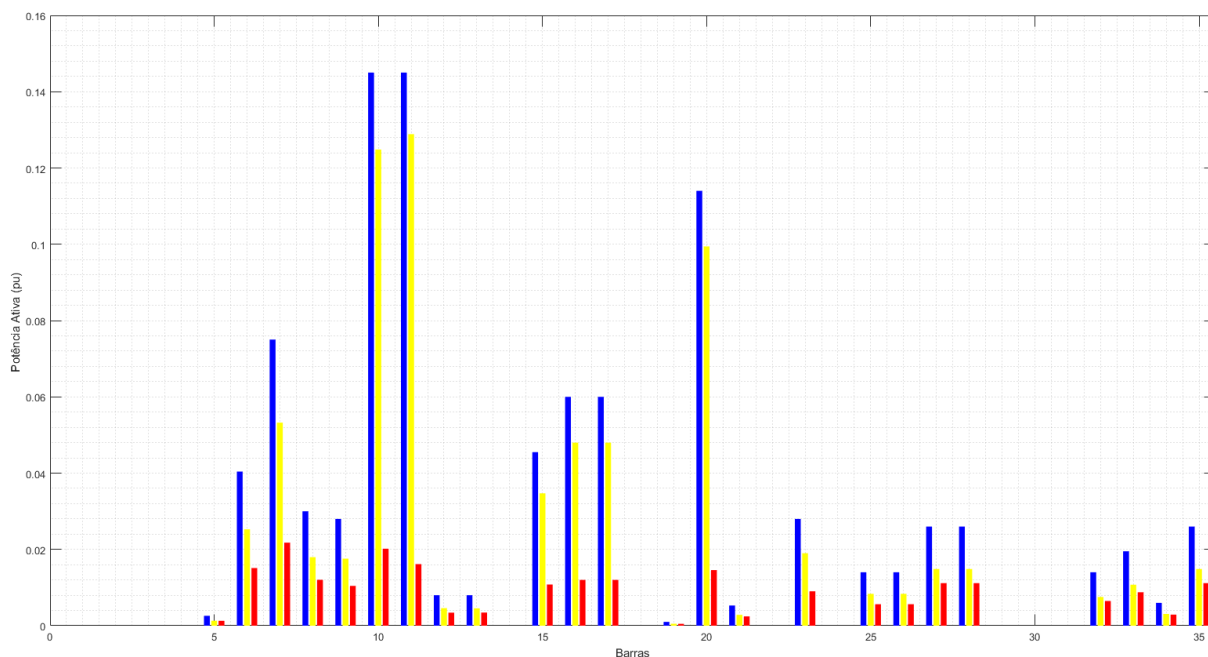


Figura 4.19: Comparação das cargas ativas em pu por barra: Carga Inicial; Carga Após o corte; Corte de carga (Barras 35 a 70). Azul: Carga Inicial; Amarelo: Carga Final; Vermelho: Corte de carga na barra.

Fonte: Elaboração Própria

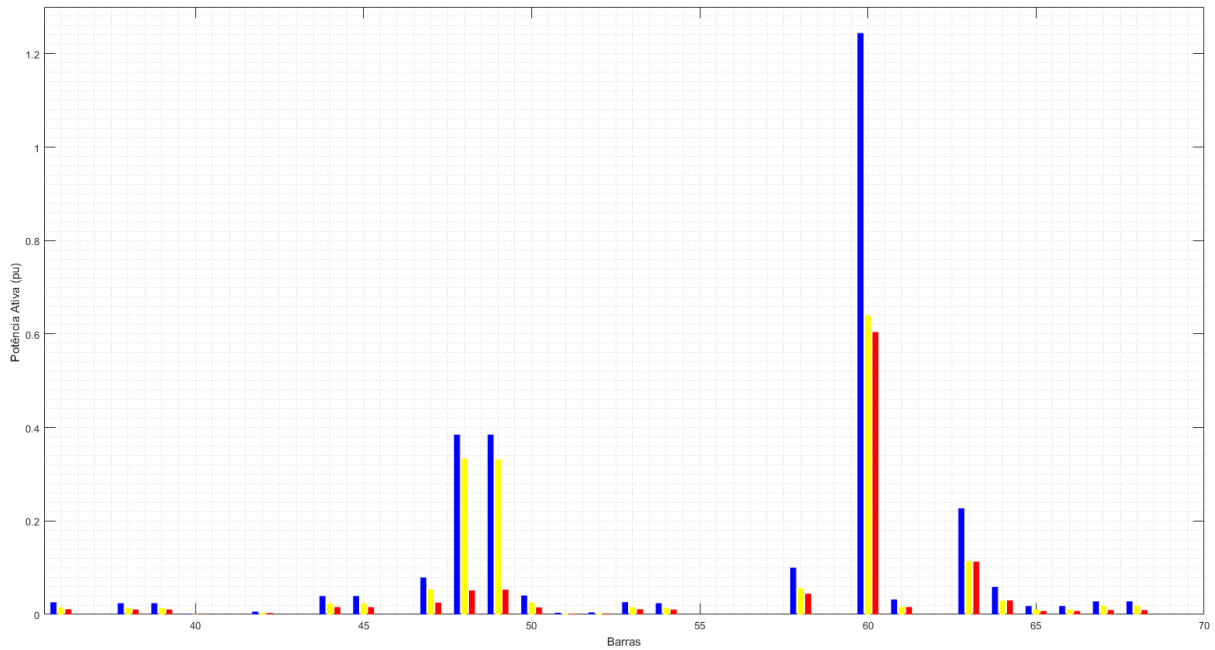


Figura 4.20: Comparação das cargas reativas em pu por barra: Carga Inicial; Carga Após o corte; Corte de carga (Barras 1 a 35). Azul: Carga Inicial; Amarelo: Carga Final; Vermelho: Corte de carga na barra. Fonte: Elaboração Própria

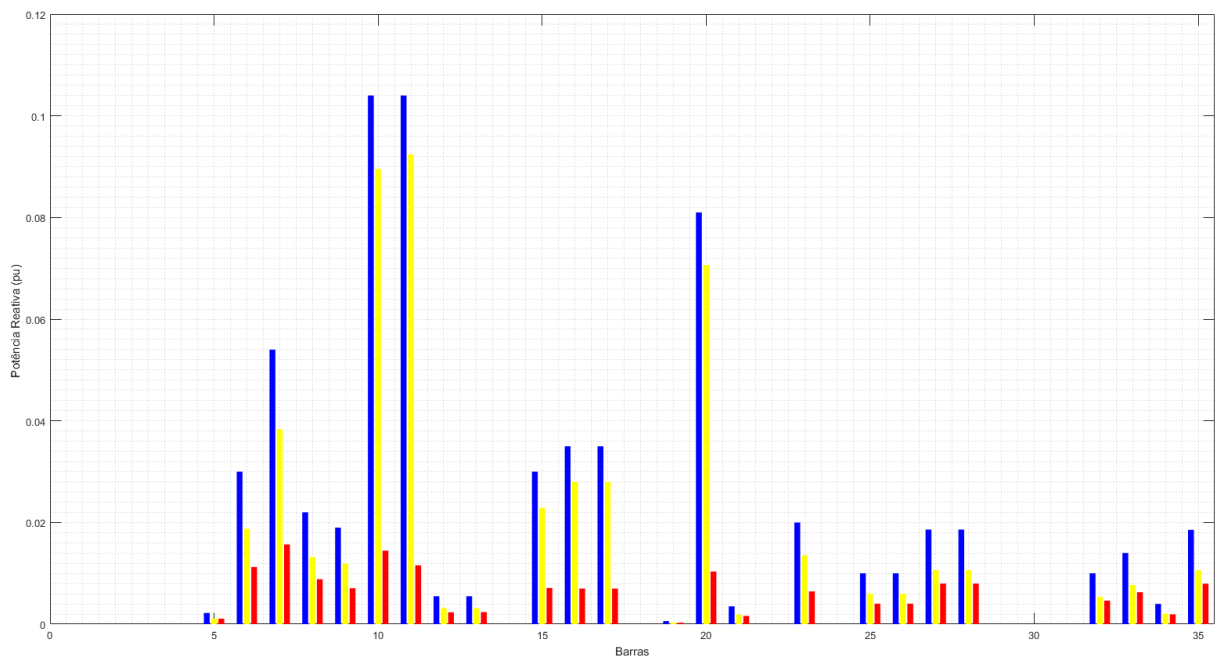
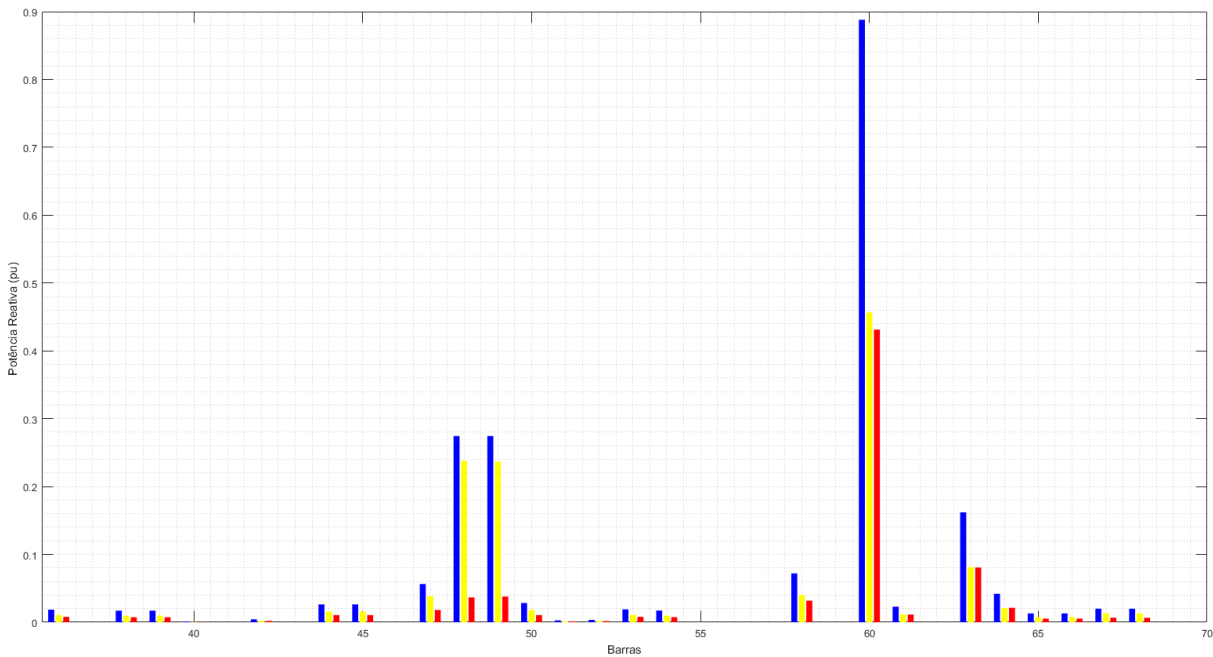


Figura 4.21: Comparação das cargas reativas em pu por barra: Carga Inicial; Carga Após o corte; Corte de carga (Barras 37 a 70). Azul: Carga Inicial; Amarelo: Carga Final; Vermelho: Corte de carga na barra. Fonte: Elaboração Própria



4.4.6 Impacto do Desvio Padrão da Carga na Solução do FPP Ótimo via UT do Sistema 70 Barras

No intuito de avaliar o comportamento aleatório que um perfil de carga probabilístico possui, modifica-se o valor de desvio padrão das cargas P_{dk} e Q_{dk} para 5% e 15% da média respectivamente, e assim, recalcula-se a solução do FPP-O via UT. A Tabela 4.20 apresenta os montantes de carga cortada para cada desvio padrão. A mesma comparação é feita para a f_{mg} na Tabela 4.21.

Tabela 4.20: Resultado do FPO Probabilístico: Análise dos Montantes de Corte (MW/Mvar) para variação do desvio padrão da carga no Sistema 70 Barras. Fonte: Elaboração Própria

		$\sigma = 5\%$	$\sigma = 10\%$	$\sigma = 15\%$
Potência Ativa (MW)	Média	1,3022	1,3019	1,3022
	Desvio Padrão	0,0706	0,1408	0,2115
Potência Reativa (Mvar)	Média	0,9257	0,9309	0,9329
	Desvio Padrão	0,0431	0,0553	0,0826

Tabela 4.21: Resultado do FPO Probabilístico: Análise da Frequência da microrrede (Hz) para diferentes desvios padrão das cargas

	$\sigma = 5\%$	$\sigma = 10\%$	$\sigma = 15\%$
Média	59,9000	59,9000	59,9000
Desvio Padrão ($\times 10^{-5}$)	1,1738	1,0226	1,1558
Probabilidade (%)	87,84	86,67	87,53

4.5 Desempenho Computacional

Os tempos computacionais para a resolução dos estudos propostos são apresentados na Tabela 4.22. Utilizou-se um computador AMD Ryzen 5 5600X 6-Core Processor 3.70 GHz, 16 GB of RAM com Windows 11 Pro 22H2.

Para a resolução do fluxo de potência ótimo probabilístico via UT para o sistema 33 barras, o tempo computacional é de apenas alguns minutos, bem mais rápido do que a SMC, onde o menor tempo de resolução foi superior a uma hora.

Quando avalia-se o esforço computacional para o sistema 70 barras, a resolução através da metodologia da UT ocorre em torno de trinta minutos, enquanto para SMC pode chegar a mais de 7 horas (com maior quantidade de amostras).

Tabela 4.22: Média do tempo computacional para cada método. Fonte: Elaboração Própria.

33 Barras				
	UT		SMC	
Nº de amostras	129	1000	3000	5000
Tempo de simulação (min)	10,49	72,6	223,32	322,74
Tempo de simulação (horas)	0,18	1,21	3,72	5,38
Razão entre os esforços computacionais	-	6,72	20,66	29,89
UT / SMC				
70 Barras				
	UT		SMC	
Nº de amostras	277	1000	3000	5000
Tempo de simulação (min)	26,09	87,33	273,30	434,435
Tempo de simulação (horas)	0,43	1,45	4,55	7,24
Razão entre os esforços computacionais	-	3,37	10,58	16,84
UT / SMC				

4.6 Considerações Parciais

Este capítulo apresentou um estudo de caso para dois sistemas da literatura operando de forma ilhada. Através do desenvolvimento da metodologia proposta foi verificado que a resolução do FPP-O baseado na metodologia da Transformação *Unscented* garante soluções com o mesmo grau de acurácia do FPP-O baseado na SMC, porém com um tempo computacional reduzido.

Conclusões

Esta dissertação abordou uma questão fundamental no contexto das microrredes elétricas, que é foco nas incertezas de carga, inerentes a sistemas elétricos contemporâneos. A análise do impacto da imprecisão na previsão da carga é um desafio que pode ser enfrentado por meio de abordagens probabilísticas, em que a carga é representada como uma distribuição normal padrão, com média e desvio padrão conhecidos.

Nessa pesquisa concentrou-se em calcular a média e o desvio padrão das variáveis de saída de uma microrrede em corrente alternada (MG-CA) com geração distribuída em um ambiente ilhado, o que inclui gerações, tensões e frequência. Para abordar essa problemática, utilizou-se o Fluxo de Potência Probabilístico (FPP) e o Fluxo de Potência Probabilístico Ótimo (FPP-O) como ferramentas de análise.

Enquanto o método tradicional de Simulação Monte Carlo (SMC) é amplamente utilizado para resolver o FPP, sua principal desvantagem reside no alto custo computacional, uma vez que requer um grande número de simulações para estimar médias e desvios padrões com precisão. No entanto, nesta pesquisa, apresentou-se e explorou-se uma alternativa mais eficiente - a Transformação *Unscented* (*Unscented Transformation* - UT). A UT permite amostrar deterministicamente um número reduzido de pontos, aplicar transformações não-lineares e calcular médias e desvio padrão por meio de ponderações.

A principal vantagem observada na metodologia baseada na Transformação *Unscented* é uma expressiva redução do esforço computacional quando comparada a metodologia utilizando a Simulação Monte Carlo.

Resultados obtidos para as microrredes de 33 e 70 barras indicaram que o corte de carga determinístico pode não ser eficiente quando se considera a incerteza nas cargas, levando à sa-

tisfação aos limites de frequência a ter baixa probabilidade. Ao se utilizar o Fluxo de Potência Probabilístico Ótimo, maiores probabilidades de satisfação aos limites foram observadas. Adicionalmente, a UT permitiu uma redução no tempo computacional de até 96,65% (considerando 5000 amostras da SMC), com boa precisão para as médias estimadas e reduzida discrepância para os desvios padrões.

O uso da UT para abordar o FPP em sistemas de microrredes representa um avanço significativo na pesquisa de sistemas de potência e confirma sua viabilidade em situações de sistemas elétricos complexos e incertos. As aplicações bem-sucedidas da UT nesta dissertação e sua referência na literatura para sistemas de transmissão em larga escala indicam o potencial dessa abordagem para melhorar a eficiência computacional na análise de sistemas elétricos.

No entanto, deve-se notar que as incertezas e desafios em sistemas de energia elétrica estão em constante evolução. Portanto, pesquisas futuras podem se concentrar na adaptação da UT em microrredes trifásicas ou híbridas.

Assim, esta dissertação não apenas contribuiu para o entendimento e a resolução de problemas relacionados à incerteza em microrredes elétricas, mas também lançou as bases para futuras pesquisas que buscam tornar os sistemas de energia mais eficientes e adaptáveis em face de desafios em constante mudança.

Referências Bibliográficas

- [1] J. A. Neto, A. Z. De Souza, E. V. De Lorenci, T. P. Mendes, P. M. Dos Santos, e B. D. N. Nascimento, “Static voltage stability analysis of an islanded microgrid using energy function,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 201 005–201 014, 2020.
- [2] J. Lopes, C. Moreira, e A. Madureira, “Defining control strategies for microgrids islanded operation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 916–924, 2006.
- [3] B. de Nadai Nascimento, A. Zambroni de Souza, J. da Silva Neto, J. Sarmiento, e C. Alvez, “Load-margin assessments in microgrids and the influence of power electronic converter operation mode,” *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 32, pp. 203–213, 2021.
- [4] P. O. La Gatta, J. A. Passos Filho, e J. L. R. Pereira, “Tools for handling steady-state under-frequency regulation in isolated microgrids,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 4, pp. 609–617, 2019.
- [5] F. C. Gonçalves, W. Peres, F. A. Assis, F. C. Coelho, B. C. Ferreira, e R. P. Poubel, “Alocação ótima de geradores distribuídos em microrredes ilhadas considerando controle droop de frequência,” in *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI*, vol. 1, no. 1, 2021.
- [6] Y. Gupta, S. Doolla, K. Chatterjee, e B. C. Pal, “Optimal dg allocation and volt–var dispatch for a droop-based microgrid,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 1, pp. 169–181, 2021.

- [7] G. de Oliveira Alves, J. L. R. Pereira, e J. A. Passos Filho, “A new unbalanced three-phase governor power flow formulation based on the current injections method,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 123, p. 106184, 2020.
- [8] M. Aien, M. Fotuhi-Firuzabad, e F. Aminifar, “Probabilistic load flow in correlated uncertain environment using unscented transformation,” *IEEE Transactions on Power systems*, vol. 27, no. 4, pp. 2233–2241, 2012.
- [9] B. Borkowska, “Probabilistic load flow,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, no. 3, pp. 752–759, 1974.
- [10] S. J. Julier e J. K. Uhlmann, “Unscented filtering and nonlinear estimation,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 3, pp. 401–422, 2004.
- [11] J. D. F. Canon e S. Jafarzadeh, “Improved probabilistic load flow using unscented transformations,” in *2017 North American Power Symposium (NAPS)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [12] W. Peres, “Probabilistic optimal power flow for balanced islanded microgrids,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 21, no. 1, pp. 167–174, 2023.
- [13] —, “A probabilistic load flow for unbalanced three-phase islanded microgrids using unscented transformation,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 155, pp. 1–10, 2024.
- [14] T. Ackermann, G. Andersson, e L. Söder, “Distributed generation: a definition,” *Electric power systems research*, vol. 57, no. 3, pp. 195–204, 2001.
- [15] A. Hirsch, Y. Parag, e J. Guerrero, “Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues,” *Renewable and sustainable Energy reviews*, vol. 90, pp. 402–411, 2018.
- [16] N. Hatziargyriou, *Microgrids: architectures and control*. John Wiley & Sons, 2014.
- [17] P. S. Kundur e O. P. Malik, *Power system stability and control*. McGraw-Hill Education, 2022.
- [18] R. H. Lasseter, “Microgrids,” in *2002 IEEE power engineering society winter meeting. Conference proceedings (Cat. No. 02CH37309)*, vol. 1. IEEE, 2002, pp. 305–308.

- [19] D. J. Cox, “Microgrid infrastructure modeling for residential microgrids,” in *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. IEEE, 2007, pp. 1–6.
- [20] F. Mumtaz e I. S. Bayram, “Planning, operation, and protection of microgrids: An overview,” *Energy Procedia*, vol. 107, pp. 94–100, 2017.
- [21] H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, e R. Uchida, “Dc voltage control of the dc micro-grid for super high quality distribution,” in *2007 Power Conversion Conference-Nagoya*. IEEE, 2007, pp. 518–525.
- [22] D. J. Becker e B. Sonnenberg, “Dc microgrids in buildings and data centers,” in *2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. IEEE, 2011, pp. 1–7.
- [23] D. de Almeida Ortiz e J. Antônio Sary Araujo, “Preposições de controle de Microrredes.” Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Paraná, 2019.
- [24] L. Maeyaert, L. Vandeveldel, e T. Döring, “Battery storage for ancillary services in smart distribution grids,” *Journal of Energy Storage*, vol. 30, p. 101524, 2020.
- [25] A. Gallo, J. Simões-Moreira, H. Costa, M. Santos, e E. M. Dos Santos, “Energy storage in the energy transition context: A technology review,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 65, pp. 800–822, 2016.
- [26] J. Moura e J. Copetti, “Caracterização de baterias automotivas para uso solar fotovoltaico,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1996.
- [27] M. Soshinskaya, W. H. Crijns-Graus, J. M. Guerrero, e J. C. Vasquez, “Microgrids: Experiences, barriers and success factors,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 40, pp. 659–672, 2014.
- [28] A. Nagarajan e R. Ayyanar, “Design and strategy for the deployment of energy storage systems in a distribution feeder with penetration of renewable resources,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 1085–1092, 2014.
- [29] P. d. D. ANEEL, “Prodlist, módulo 8—qualidade da energia elétrica,” 2020.

- [30] N. Lidula e A. Rajapakse, “Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 186–202, 2011.
- [31] N. Kagan, C. C. B. De Oliveira, e E. J. Robba, *Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica*. Editora Blucher, 2021.
- [32] Y. Wang, K. Tan, X. Y. Peng, e P. L. So, “Coordinated control of distributed energy-storage systems for voltage regulation in distribution networks,” *IEEE transactions on power delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 1132–1141, 2015.
- [33] D. E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A. H. Etemadi, C. A. Cañizares, R. Iravani, M. Kazerani, A. H. Hajimiragha, O. Gomis-Bellmunt, M. Saeedifard, R. Palma-Behnke *et al.*, “Trends in microgrid control,” *IEEE Transactions on smart grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, 2014.
- [34] O. Palizban, K. Kauhaniemi, e J. M. Guerrero, “Microgrids in active network management—part i: Hierarchical control, energy storage, virtual power plants, and market participation,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 36, pp. 428–439, 2014.
- [35] N. N. A. Bakar, M. Y. Hassan, M. F. Sulaima, M. Na’im Mohd Nasir, e A. Khamis, “Microgrid and load shedding scheme during islanded mode: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, pp. 161–169, 2017.
- [36] H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, e R. Uchida, “Dc micro-grid for super high quality distribution—system configuration and control of distributed generations and energy storage devices,” in *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*. IEEE, 2006, pp. 1–7.
- [37] C. Xu e K. W. E. Cheng, “A survey of distributed power system—ac versus dc distributed power system,” in *2011 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications*. IEEE, 2011, pp. 1–12.
- [38] J. Lago e M. L. Heldwein, “Operation and control-oriented modeling of a power converter for current balancing and stability improvement of dc active distribution networks,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 877–885, 2011.

- [39] E. L. Cesar, “Modelagem e análise da dinâmica de microrredes de distribuição de energia elétrica,” Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina., 2010.
- [40] J. Moia, J. Lago, A. J. Perin, e M. L. Heldwein, “Comparison of three-phase pwm rectifiers to interface ac grids and bipolar dc active distribution networks,” in *2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. IEEE, 2012, pp. 221–228.
- [41] V. Maryama, V. Zeni, C. Q. Pica, M. S. Ortmann, e M. L. Heldwein, “Unified hybrid (ac/dc) active distribution networks droop-based load-sharing strategy,” in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*. IEEE, 2014, pp. 1–6.
- [42] Y. Yoldaş, A. Önen, S. Muyeen, A. V. Vasilakos, e I. Alan, “Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 205–214, 2017.
- [43] X. Zhu, X.-q. Han, W.-p. Qin, e P. Wang, “Past, today and future development of microgrids in china,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 1453–1463, 2015.
- [44] R. Rizzo, P. Tricoli, e I. Spina, “An innovative reconfigurable integrated converter topology suitable for distributed generation,” *Energies*, vol. 5, no. 9, pp. 3640–3654, 2012.
- [45] G. O. Alves, J. Pereira, P. O. La Gatta, J. Passos Filho, e M. Tomim, “A new governor power flow formulation based on the current injections method,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 104, pp. 705–715, 2019.
- [46] M. H. Hemmatpour, M. Mohammadian, e A. A. Gharaveisi, “Optimum islanded microgrid reconfiguration based on maximization of system loadability and minimization of power losses,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 78, pp. 343–355, 2016.
- [47] C. Concordia, L. H. Fink, e G. Poullikkas, “Load shedding on an isolated system,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 1467–1472, 1995.
- [48] M. A. Hossain, H. R. Pota, M. J. Hossain, e F. Blaabjerg, “Evolution of microgrids with converter-interfaced generations: Challenges and opportunities,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 109, pp. 160–186, 2019.

- [49] A. Colmenar-Santos, C. Reino-Rio, D. Borge-Diez, e E. Collado-Fernández, “Distributed generation: A review of factors that can contribute most to achieve a scenario of dg units embedded in the new distribution networks,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 1130–1148, 2016.
- [50] A. R. Jordehi, “Allocation of distributed generation units in electric power systems: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 893–905, 2016.
- [51] J. J. Grainger e W. D. Stevenson Jr, *Power system analysis*. McGraw-Hill series in electrical and computer engineering, 1994.
- [52] A. J. Monticelli e A. Garcia, *Introdução a sistemas de energia elétrica*. Ed Unicamp, 1999.
- [53] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, e G. B. Sheblé, *Power generation, operation, and control*. John Wiley & Sons, 2013.
- [54] C. Balu e D. Maratukulam, *Power system voltage stability*. MCGraw-hill New York, NY, USA, 1994.
- [55] J. Carpentier, “Contribution a l’etude du dispatching économique,” *Bulletin de la Société Française des électriciens*, vol. 3, no. 1, pp. 431–447, 1962.
- [56] A. P. d. Godoi, “Um modelo de fluxo de potência ótimo descontínuo e não suave com restrições de segurança pós-contingências,” Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2020.
- [57] Z. Hasan e M. E. El-Hawary, “Optimal power flow by black hole optimization algorithm,” in *2014 IEEE Electrical Power and Energy Conference*. IEEE, 2014, pp. 134–141.
- [58] M. Gomez-Gonzalez, A. López, e F. Jurado, “Optimization of distributed generation systems using a new discrete pso and opf,” *Electric power systems research*, vol. 84, no. 1, pp. 174–180, 2012.
- [59] P. Garcia, J. Pereira, S. Carneiro, V. da Costa, e N. Martins, “Three-phase power flow calculations using the current injection method,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 508–514, 2000.

- [60] M. M. A. Abdelaziz, H. E. Farag, E. F. El-Saadany, e Y. A.-R. I. Mohamed, “A novel and generalized three-phase power flow algorithm for islanded microgrids using a newton trust region method,” *IEEE transactions on power systems*, vol. 28, no. 1, pp. 190–201, 2012.
- [61] V. Singh, T. Moger, e D. Jena, “Uncertainty handling techniques in power systems: A critical review,” *Electric Power Systems Research*, vol. 203, 2 2022.
- [62] Z. Q. Xie, T. Y. Ji, M. S. Li, e Q. H. Wu, “Quasi-Monte Carlo Based Probabilistic Optimal Power Flow Considering the Correlation of Wind Speeds Using Copula Function,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 2, 2018.
- [63] M. Abdelaziz, “GPU-OpenCL accelerated probabilistic power flow analysis using Monte-Carlo simulation,” *Electric Power Systems Research*, vol. 147, 2017.
- [64] R. L. Harrison, “Introduction to monte carlo simulation,” in *AIP conference proceedings*, vol. 1204, no. 1. American Institute of Physics, 2010, pp. 17–21.
- [65] X. Lin, T. Shu, J. Tang, Y. Yang, F. Liu, J. Zheng, e S. Peng, “An unscented transformation based probabilistic power flow for autonomous hybrid ac/dc microgrid with correlated uncertainty sources,” in *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [66] S. J. Julier e J. K. Uhlmann, “Unscented filtering and nonlinear estimation,” in *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 3, 3 2004, pp. 401–422.
- [67] G. Valverde e V. Terzija, “Unscented Kalman filter for power system dynamic state estimation,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 5, no. 1, pp. 29–37, 1 2011.
- [68] S. Chopra, G. M. Vanaprasad, G. D. A. Tinajero, N. Bazmohammadi, J. C. Vasquez, e J. M. Guerrero, “Power-flow-based energy management of hierarchically controlled islanded ac microgrids,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 141, p. 108140, 2022.
- [69] A. Gómez-Expósito, A. J. Conejo, e C. Cañizares, *Electric energy systems: analysis and operation*. CRC press, 2018.

- [70] M. E. Baran e F. F. Wu, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,” *IEEE Transactions on Power delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1407, 1989.
- [71] M. Baran e F. Wu, “Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 1, pp. 735–743, 1989.