Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEL

Associação ampla UFSJ / CEFET-MG

# Aplicação da Transformação *Unscented* para a Solução do Fluxo de Potência em Microrredes de Corrente Contínua

Renata Gomes dos Santos Brandi

**Orientador:** Prof. Wesley Peres, D.Sc.

**Coorientadora:** Profa. Cristiane Geralda Tarôco, D.Sc.

São João del-Rei, 18 de junho de 2024.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEL

Associação ampla UFSJ / CEFET-MG

# Aplicação da Transformação *Unscented* para a Solução do Fluxo de Potência em Microrredes de Corrente Contínua

Renata Gomes dos Santos Brandi

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.

**Coorientadora:** Profa. Cristiane Geralda Tarôco, D.Sc.

São João del-Rei, 18 de Junho de 2024.

inserindo a ficha catológráfica em pdf

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)

G818a

Gomes dos Santos Brandi, Renata.
Aplicação da Transformação Unscented para a Solução do Fluxo de Potência em Microrredes de Corrente Contínua / Renata Gomes dos Santos Brandi ; orientador Wesley Peres; coorientadora Cristiane Geralda Târoco. -- São João del-Rei, 2024.
84 p.

Dissertação (Mestrado - Engenharia Elétrica) -- Universidade Federal de São João del-Rei, 2024.

1. Microrredes CC. 2. Fluxo de Potência Probabilístico. 3. Transformação Unscented. 4. Geração Distribuída. 5. Curva de Carga. I. Peres, Wesley, orient. II. Târoco, Cristiane Geralda, co-orient. III. Título.

# Aplicação da Transformação *Unscented* para a Solução do Fluxo de Potência em Microrredes de Corrente Contínua

Renata Gomes dos Santos Brandi

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 18 de junho de 2024:

---

Prof. Wesley Peres, D.Sc. (Orientador)
Universidade Federal de São João del-Rei

---

Prof. Cristiane Geralda Tarôco, D.Sc. (Coorientadora)
Universidade Federal de São João del-Rei

---

Profa. Lane Maria Rabelo, D.Sc.
Universidade Federal de São João del-Rei

---

Profa. Isabela Miranda de Mendoça, D.Sc.
Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

São João del-Rei, 18 de Junho de 2024.

*Dedico este trabalho aos meus filhos Heitor, Lorena e Carolina.*

# Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor Wesley Peres e Professora Cristiane Tarôco, pela orientação, apoio e amizade, que, com suas inestimáveis contribuições foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. Demonstro aqui toda a minha gratidão e respeito.

Agradeço também à minha família, principalmente ao meu esposo Rafael Brandi, pelo amor e paciência, e à minha mãe, pelo apoio e incentivo, sem os quais eu não teria conseguido finalizar essa dissertação. Agradeço também às minhas irmãs, Roberta e Roseane, pelo exemplo de dedicação e estudo.

Aos professores da Universidade Federal de São João del-Rei, que de alguma forma contribuíram para a minha formação, em especial ao Professor Marco Aurélio Schroeder e a Professora Lane Rabelo. Aos amigos do Grupo de Otimização, Controle e Estabilidade de Sistemas Elétricos (GOCES).

Por último, agradeço ao IF Sudeste MG, UFSJ, CNPq, FAPEMIG, CAPES e outras instituições de fomento da pesquisa acadêmica.

*"Acima da nuvem, com sua sombra, fica a estrela, com sua luz."*

Pitágoras

# Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia de fluxo de potência ótimo probabilístico em microrredes de corrente contínua utilizando a Transformação *Unscented*. O objetivo é minimizar as perdas de potência ativa ajustando o despacho das unidades de geração distribuída, respeitando os limites operacionais de tensão. Dentro deste propósito, a alocação ótima na geração distribuída disponível é verificada no trabalho ao confrontar os resultados obtidos com o não uso da Geração Distribuída com aqueles nas quais a Geração Distribuída possui valor fixo e com aqueles em que são utilizados valores ótimos de Geração Distribuída. A metodologia foi testada em microrredes de corrente contínua do sistema IEEE de 10 barras e 33 barras. Adicionalmente, também foi utilizada uma curva de carga horária com dados de 24 horas para o sistema IEEE de 33 barras.

Nas simulações probabilísticas considera-se que as cargas ativas são modeladas considerando a distribuição normal com média igual ao valor nominal e desvio padrão igual à 10% da média. Foram utilizadas 2 métodos para a abordagem probabilística, um método numérico, denominado Simulação Monte Carlo, e outro método de aproximação, denominado Transformação *Unscented*. Para a Simulação Monte Carlo foram consideradas 10 mil amostras e para a Transformação *Unscented* tem-se que a quantidade de amostras varia conforme o número de variáveis incertas. O método proposto de uso da Transformação *Unscented* demonstrou alta precisão e eficiência computacional, já que mantém a qualidade das soluções ao mesmo tempo em que demanda um tempo computacional bastante reduzido quando comparado aos resultados obtidos através da Simulação Monte Carlo.

**Palavras-chave:** Microrredes CC; Fluxo de Potência Probabilístico; Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico; Incertezas; Transformação *Unscented*, Geração Distribuída, Curva de Carga.

# Abstract

This work presents a probabilistic optimal power flow methodology in direct current microgrids using the Unscented Transformation. The objective is to minimize active power losses by adjusting the dispatch of distributed generation units, respecting operational voltage limits. Within this purpose, the optimal allocation in available distributed generation is performed in this work by comparing the results obtained when Distributed Generation is not used with those obtained with use of Distributed Generation as fixed values and also considering optimal values of Distributed Generation. The methodology has been tested on direct current microgrids of the IEEE system of 10 buses and 33 buses. Additionally, an hourly load curve with 24-hour data for the 33-bus IEEE system has also been used. In the probabilistic simulations, active loads are modeled by considering the normal distribution with a mean equal to the nominal value of load and standard deviation equals to 10% of the mean. Two methods have been used for the probabilistic approach: a numerical method, called Monte Carlo Simulation, and another approximation method, called Unscented Transformation. Ten thousand samples are considered in Monte Carlo Simulation while Unscented Transformation uses a number of samples that varies according to the number of uncertain variables. The proposed method demonstrated high accuracy and computational efficiency, since solution quality is preserved while demanding significantly smaller computional effort when compared to those of Monte Carlo Simulation.

**Keywords:** DC Microgrids; Probabilistic Power Flow; Probabilistic Optimal Power Flow; Uncertainties; Unscented Transformation, Distributed Generation; Load Curve.

# Lista de Figuras

# Lista de Tabelas

# Lista de Símbolos e Siglas

$x$: variáveis incertas de entrada.

$g(x)$: função não-linear.

$y$: variáveis incertas de saída.

$n$: número de variáveis.

$nb$: número de barramentos.

$x_i$: *sigma points* da UT.

$W_i$: pesos da UT.

$U$: matriz obtida através da fatoração de Cholesky.

$u_i$: vetor linha da matriz U.

$y_i$: vetor das grandezas de interesse.

$g(x_i)$: ferramenta de fluxo de potência determinístico.

$y_m$: média da variável de interesse.

$P_y$: covariância da variável de interesse.

$X$ e $Y$: variáveis aleatórias contínuas.

$\mu_X$, $\mu_Y$: média de X e Y

$\sigma_X$, $\sigma_Y$: desvio padrão de X e Y.

$\Omega_L$, $\Omega_B$ e $\Omega_G$: conjuntos de ramos, barras e geradores.

$P_{gk}$: potência gerada na barra *k*.

$P_{dk}$: potência demandada na barra *k*.

$P_k$: potência injetada na barra *k*.

$V^{\text{espec}}$ : tensão na barra especificada.

$V^{\text{slack}}$ : tensão na barra de referência.

# Lista de Abreviações

MG: Microrredes.

CA: Corrente Alternada.

CC: Corrente Contínua.

GD: Geração Distribuída.

SAE: Sistemas de Armazenamento de Energia.

MG-CC: Microrredes de Corrente Contínua.

MG-CA: Microrredes de Corrente Alternada.

FP: Fluxo de Potência.

FPD: Fluxo de Potência Determinístico.

FPO: Fluxo de Potência Ótimo.

FPP: Fluxo de Potência Probabilístico.

FPOP: Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico.

SMC: Simulação Monte Carlo.

UT: Transformação *Unscented*.

IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.

MatLab: *Matrix Laboratory*.

# Sumário

CAPÍTULO 1

# Introdução

As microrredes (MG) são definidas como sendo sistemas de distribuição de baixa ou média tensão em corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC) que podem operar conectadas ou desconectadas à rede principal, conforme está descrito em [1]. As microrredes que operam desconectadas à rede principal têm o seu funcionamento denominado por operação ilhada.

As Microrredes são geralmente formadas por geradores distribuídos (GD), sistemas de armazenamento de energia (SAE) e cargas controláveis. Adicionalmente, os GD podem ser despacháveis, quando se consegue programar de forma antecipada a quantidade de potência gerada tal como os baseados em combustíveis fósseis, ou não-despacháveis, como os geradores que são baseados em fontes renováveis (e.g. eólicos e painéis fotovoltaicos) cuja geração é variável e depende das condições climáticas.

Quando se analisa sistemas em corrente alternada, atenção especial deve ser dada à frequência e ao gerenciamento de potência reativa, que é intrinsecamente associada ao controle de tensão nas barras do sistema.

Existem dois tipos de microrredes: as de corrente alternada e as de corrente contínua, conforme revisado por [2]. As microrredes em corrente contínua (MG-CC) são uma alternativa às microrredes em corrente alternada (MG-CA) e suas aplicações estão crescendo recentemente, conforme relatado em diversos trabalhos da literatura [3]. A principal vantagem está associada à inexistência de gerenciamento de potência reativa e frequência. De forma similar às MG-CA, as MG-CC podem operar conectadas à rede principal utilizando um grande conversor CA-CC, ou ainda trabalharem de forma ilhada. Outra vantagem está associada a ferramentas de análise em regime permanente que são focadas na modelagem CC da rede.

Uma das ferramentas mais utilizadas para a análise de MG-CC é o Fluxo de Potência (FP)

e o Fluxo de Potência Ótimo (FPO). Em [4] apresenta-se uma formulação de fluxo de potência não-iterativa a partir da expansão das equações em série de Taylor. Um trabalho posterior [5] propõe uma ferramenta de fluxo de potência resolvida pelo método do ponto fixo. Uma metodologia de fluxo de potência ótimo resolvido pelo método da Programação Quadrática Sequencial foi proposta por [6]. [7] propuseram um fluxo de potência ótimo resolvido através de aproximações convexas quadráticas. As metodologias anteriormente descritas são determinísticas, isto é, não consideram a incerteza da carga. Proposto em meados da década de setenta por [8], o FP Probabilístico (FPP) permite a estimação da média e desvio padrão das variáveis de saída (tensões, gerações, etc.) a partir da média e desvio padrão das variáveis de entrada (cargas e potência das unidades de geração baseadas em fontes renováveis). Uma classe de métodos para a solução do FPP ou FPO Probabilístico (FPOP) é a de métodos numéricos baseados em amostras, que engloba a Simulação Monte Carlo (SMC). Aplicações da SMC para solução do FPP e FPOP foram propostas por [9, 10]. A SMC apresenta bons resultados e são frequentemente utilizados como *benchmark* para validação de outras técnicas. Entretanto, devido à grande quantidade de amostras requeridas, o tempo computacional necessário para o uso deste método pode ser impeditivo. De forma a buscar um equilíbrio entre tempo computacional e qualidade dos resultados, métodos alternativos foram propostos na literatura. Dentre tais métodos encontra-se a Transformação Unscented (*Unscented Transformation* - UT), proposta por [11]. Trata-se de uma transformação não linear para propagar a média e covariância de variáveis de entrada através de uma função não linear. A transformação é baseada no uso de um número reduzido de amostras deterministicamente calculadas, chamadas de pontos sigma (ou *sigma points*), que capturam de forma adequada a informação sobre a distribuição estatística das variáveis incertas. Sendo relativamente fácil de implementar, pode-se utilizar um número reduzido de amostras de forma que a UT apresente resultados de boa qualidade com baixo esforço computacional. [12] aplicou a UT para a solução do FPP para sistemas de transmissão. [13] propuseram um FPP para microrredes CA/CC. [14] apresentou um FPOP para a minimização de perdas em microrredes CA ilhadas.

## 1.1 Objetivos da Dissertação

Esta dissertação tem o propósito de analisar os potenciais ganhos computacionais utilizando a Transformação *Unscented* para solucionar o Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico aplicado à minimização de perdas de potência ativa em Microrredes de Corrente Contínua.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Propor a Solução do Fluxo de Potência Probabilístico, convencional e ótimo, para uma Microrrede de Corrente Contínua via Transformação *Unscented*.
- Minimização de perdas considerando as incertezas das cargas.
- Solução do Fluxo de Potência e Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico considerando uma curva de carga.
- Validação das soluções obtidas utilizando a Simulação Monte Carlo, aferindo-se a precisão e desempenho computacional.

## 1.2 Publicações Decorrentes da Dissertação

Foram confeccionados dois trabalhos para congresso ao longo do desenvolvimento dessa dissertação. O trabalho brevemente descrito em 1.2.1 foi publicado no SBSE/SBAI que ocorreu em 2023 na cidade de Manaus. O trabalho em 1.2.2 foi submetido ao CBA que ocorrerá em 2024, na cidade do Rio de Janeiro.

### 1.2.1 Publicação 1 (SBSE/SBAI 2023)

- R. G. dos Santos Brandi, W. Peres, C. G. Taroco, "**Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico para Minimização de Perdas em Microrredes CC**," nos *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente e do X Simpósio Brasileiro de Sistemas de Elétricos*, 2023, Manaus.

Este artigo, apresentado no Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos na edição X, que ocorreu no ano de 2023 em Manaus, discorre sobre uma metodologia de fluxo de potência ótimo probabilístico para minimizar as perdas de potência em microrredes de corrente contínua utilizando a Transformação *Unscented*.

### 1.2.2 Publicação 2 (CBA 2024) - Submetido

- R. G. dos Santos Brandi, W. Peres, C. G. Taroco, B. C. Ferreira, J. N. N. Costa, R. P. B. Poubel, "**Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico para Microrredes CC considerando Curva de Carga**.

Este trabalho foi submetido ao XXV Congresso Brasileiro de Automática e introduz uma abordagem para o fluxo de potência ótimo probabilístico em microrredes de corrente contínua utilizando a Transformação *Unscented* em uma abordagem horária.

## 1.3 Estrutura do Texto

O desenvolvimento do trabalho se dará ao longo de 5 capítulos. Este capítulo, que foi nomeado como Introdução, apresenta uma contextualização das microrredes de corrente contínua e dos problemas relacionados às mesmas.

O capítulo 2, nomeado Revisão Bibliográfica, apresenta uma revisão bibliográfica sobre as Microrredes CC e a Transformação *Unscented*.

O capítulo 3, nomeado Metodologia, apresenta a descrição do modelo referente à metodologia proposta no trabalho, que é referente a minimização de perdas de potência ativa em microrredes de corrente contínua utilizando a Transformação *Unscented*.

O capítulo 4, nomeado Resultados, apresenta e discute os resultados obtidos executando os métodos obtidos no trabalho e descritos anteriormente. Serão apresentados resultados obtidos em dois sistemas, um com 10 e outro com 33 barras.

Por fim, o capítulo 5, nomeado Conclusões, apresenta as conclusões dos estudos realizados ao longo deste trabalho.

CAPÍTULO 2

# Revisão Bibliográfica

## 2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica referente ao tema de microrredes elétricas, abordando-se FP e FPO no contexto probabilístico, revisando os diversos métodos de solução, além de trazer um contexto histórico sobre a Transformação *Unscented*, método de grande importância na modelagem do presente trabalho.

## 2.2 Microrredes Elétricas

Conforme introduzido no capítulo anterior, as Microrredes (ou do inglês *Microgrids* - MG) são extremamente importantes no processo de modernização dos sistemas elétricos, que vêm passando por um processo de descarbonização através do aumento da penetração de recursos renováveis visando à redução da emissão de gases poluentes que agravam o efeito estufa. Conforme o trabalho de [15], entre os potenciais benefícios das MG cita-se:

(*i*) redução e estabilização dos preços de energia;

(*ii*) melhoria na continuidade do suprimento;

(*iii*) integração de fontes renováveis;

(*iv*) aumento na qualidade de energia e resiliência diante de perturbações no sistema principal; e

(*v*) serviços ancilares para suporte de frequência e tensão aos sistemas nos quais estão conectadas.

Compostas por unidades de geração (renováveis ou baseadas em combustíveis fósseis), sistemas de armazenamento de energia, cargas (de atendimento prioritário ou não) e sistemas de monitoramento e controle, as MG possuem diversas aplicações: (*i*) campus MG, (*ii*) comercial ou industrial MG, (*iii*) MG para comunidades urbanas e rurais, (*iv*) MG ilhadas ou *off-grid* (que possuem papel fundamental na eletrificação de regiões remotas impulsionando o fornecimento de energia e contribuindo para a redução das desigualdades sociais). A capacidade de geração da MG define o seu porte como discutido por [15]: (*i*) pequeno porte (até 10 MW), (*ii*) médio porte (entre 10 a 100 MW) e (*iii*) grande porte (maior que 100 MW), sendo que MG de médio e grande portes são adequadas para aplicações industriais.

Conforme discutido por [16], as microrredes podem operar conectadas ou ilhadas (na ocorrência de faltas no sistema principal ou quando são projetadas para operar nessa configuração). Apesar da maior parte das aplicações de microrredes no mundo ser de Corrente Alternada (MGCA), problemas de sincronização com o sistema principal, suporte de tensão e frequência são observados (principalmente na operação ilhada). Nesse contexto, surgem as MG de Corrente Contínua (MGCC).

As MGCC possuem a vantagem de não enfrentarem problemas de regulação de frequência e de suporte de potência reativa para a melhoria do fator de potência. Ademais, tais microrredes empregam um menor número de conversores CA/CC ou CC/CA no processo de fornecimento ou geração de energia para unidades em CC (reduzindo as perdas e aumentando a eficiência). Entretanto, problemas relacionados à proteção são citados na literatura. A Figura 2.1 ilustra uma MGCC com os os conversores (CA/CC e CC/CC), cargas e unidades de geração de diferentes tipos, sistemas de armazenamento e *links* de comunicação.

A geração distribuída dentro das microrredes oferece grandes vantagens e benefícios em relação as grandes usinas geradoras convencionais. Essas costumeiramente construídas longe dos centros de carga, se oponhem 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 [17]. Dentre tais benécies 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;

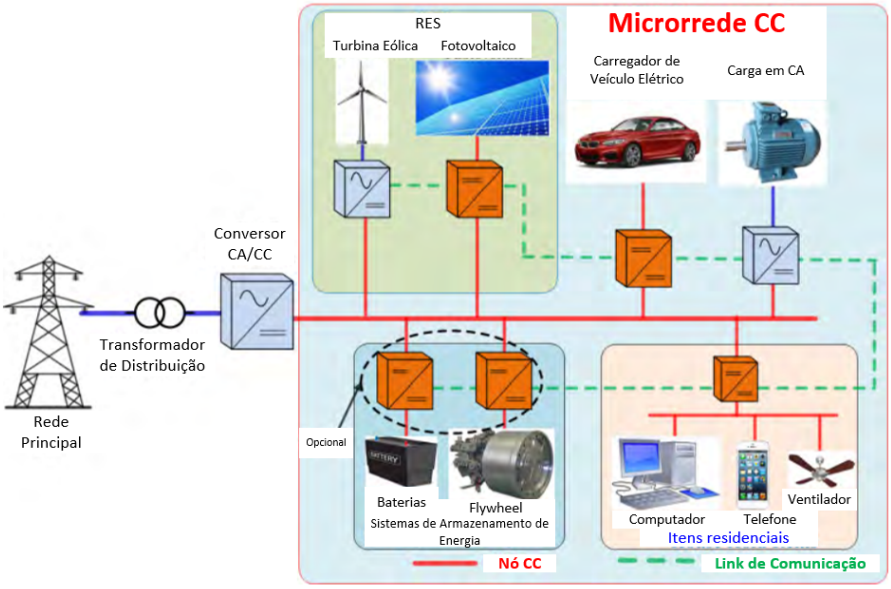


Figura 2.1: Ilustração de uma Microrrede CC.

- 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 contrução de microrredes isoladas, capazes de garantir a eletrificação de comunidades rurais e mais afastadas dos centros de carga.

## 2.3 Fluxo de Potência e Fluxo de Potência Ótimo para Microrredes CC

O trabalho de revisão apresentado em [15] cita o desenvolvimento de ferramentas de Fluxo de Potência (FP) e de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) para os diferentes tipos de microrredes como um dos desafios na área técnica. Nesse contexto, diferentes trabalhos da literatura têm focado nessa tarefa.

Em [4] é apresentada uma formulação de fluxo de potência não-iterativa a partir da expansão das equações em série de Taylor. [5] propuseram uma ferramenta de fluxo de potência resolvida

pelo método do ponto fixo. Uma metodologia de fluxo de potência ótimo resolvido pelo método da Programação Quadrática Sequencial foi proposta por [6]. Finalmente, foi proposto um fluxo de potência ótimo resolvido através de aproximações convexas quadráticas por [7].

## 2.4 Fluxo de Potência Probabilístico

As metodologias anteriormente descritas são determinísticas, isto é, não consideram a incerteza da carga. Proposto em meados da década de setenta por [8], o Fluxo de Potência Probabilístico permite a estimação da média e desvio padrão das variáveis de saída (tensões, gerações, etc.) a partir da média e desvio padrão das variáveis de entrada (cargas e potência das unidades de geração baseadas em fontes renováveis).

### 2.4.1 Revisão Geral de Métodos de Solução

Apresenta-se a seguir, de forma concisa, três classes de métodos para a solução de fluxo de potência probabilístico: numéricos, analíticos e de estimação.

- Métodos Numéricos: Simulação Monte Carlo [9];
- Métodos Analíticos: Método dos Cumulantes [18];
- Métodos de Estimação (ou Aproximados): Transformação Unscented [11] e Método de Estimação por Dois Pontos [19].

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 [20].

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 (SMC) [21]. A SMC é um método computacional numérico baseado na geração de amostras seguindo uma distribuição

de probabilidades. A SMC oferece muitas vantagens, nas quais destacam-se: as distribuições das variáveis do modelo não precisam ser aproximadas, a correlações e outras interdependências podem ser modeladas, o nível de precisão da simulação pode ser melhorado através de um simples aumento do número de iterações (amostras) calculadas. Adicionalmente a SMC é amplamente reconhecida, o que permite que seus resultados sejam considerados com *benchmark* na validação de outros métodos. 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.

Os métodos analíticos, são baseados em aproximações lineares e permitem a redução do tempo computacional ao permitirem expressar as variáveis estatísticas de saída como uma combinação linear das variáveis estatísticas de entrada. Entretanto, erros elevados podem surgir quando o ponto de operação é muito diferente do ponto de linearização. O método dos Cumulantes é uma técnica dessa classe [18].

Por fim, os métodos de estimação (ou 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. Exemplos desses métodos são a Transformação Unscented [11] e o Método de Estimação por Dois Pontos [19].

De especial interesse deste trabalho, a Transformação Unscented (*Unscented Transformation* - UT), proposta por [11], trata-se de uma transformação não linear para propagar a média e covariância de variáveis de entrada através de uma função não linear. É baseada no uso de um número reduzido de amostras deterministicamente calculadas, chamadas de pontos sigma (ou *sigma points*), que capturam de forma adequada a informação sobre a distribuição estatística das variáveis incertas. De fácil implementação, ao utilizar um número reduzido de amostras, a UT apresenta resultados de boa qualidade com baixo esforço computacional.

### 2.4.2 Solução do Fluxo de Potência Probabilístico

Dentre os métodos numéricos aplicados para a solução do fluxo de potência probabilístico ou fluxo de potência ótimo probabilístico destaca-se a SMC. Aplicações da SMC para solução do FP e FPO foram propostas por [9, 10, 10, 22].

Em relação aos métodos aproximados ou de estimação, a Transformação Unscented começou a ser aplicada na última década para a solução do fluxo de potência probabilístico ou FPO probabilístico. Em 2012, [12] aplicou a UT para a solução do FP Probabilístico para sistemas de transmissão considerando incertezas na geração eólica. Em 2012, [13] propôs um FP Probabilístico para microrredes híbridas CA/CC. Em 2023, [14] apresentou um FPO Probabilístico baseado na UT para a minimização de perdas em microrredes CA ilhadas considerando incertezas nas cargas. Finalmente, em 2014, a solução do FP trifásico probabilístico para microrredes CA ilhadas foi proposta em [23] via UT considerando incerteza nas cargas e nas gerações eólicas.

## 2.5 Transformação *Unscented*

Proposta por [11], a Transformação Unscented tem como princípio obter deterministicamente um conjunto de vetores denominados de *sigma points*, que capturam a média e a covariância de $\boldsymbol{x}$ (variáveis incertas de entrada). Os *sigma points* são então aplicados na função não-linear g($\boldsymbol{x}$) para a estimação da média e covariância de $\boldsymbol{y}$ (variáveis incertas de saída).

### 2.5.1 Formulação Geral

Considerando $n$ variáveis incertas de entrada, inicialmente deve-se definir um conjunto de $2n+1$ *sigma points* $\boldsymbol{\chi_i}$ (vetores coluna de ordem $n \times 1$) e seus respectivos pesos $W_i$ (existem $2n+1$ pesos, um para cada $\boldsymbol{\chi_i}$). Os vetores $\boldsymbol{\chi_i}$ são definidos conforme (2.1)-(2.3). Ressalta-se que a UT utiliza um conjunto de *sigma points* que não são randomicamente escolhidos tal como ocorre na Simulação Monte Carlo.

$$\boldsymbol{\chi_1} = \boldsymbol{x_m} \tag{2.1}$$

$$\boldsymbol{\chi_{i+1}} = \boldsymbol{x_m} + \boldsymbol{u}_i, \quad i = 1, \ldots, n \tag{2.2}$$

$$\boldsymbol{\chi_{i+n+1}} = \boldsymbol{x_m} - \boldsymbol{u}_i, \quad i = 1, \ldots, n \tag{2.3}$$

em que $\boldsymbol{u_i}$ é um vetor linha da matriz $\boldsymbol{U}$ obtido a partir da fatoração de Cholesky como apresentado em (2.4).

$$\boldsymbol{U^T U} = (n + \kappa)\boldsymbol{P_x} \tag{2.4}$$

No trabalho proposto por [24], discute-se que o parâmetro $\kappa$ é escolhido empiricamente para reduzir os erros de estimação da média e covariância. No presente trabalho, de forma similar ao feito por [14], adota-se $\kappa = 2$, que é um valor comumente empregado na literatura e que apresentou bons resultados quando comparados com os da SMC.

Os pesos $W_i$ são calculados conforme (2.5)-(2.7).

$$W_1 = \frac{\kappa}{n + \kappa} \tag{2.5}$$

$$W_{i+1} = (2(n + \kappa))^{-1}, i = 1, \ldots, n \tag{2.6}$$

$$W_{i+n+1} = (2(n + \kappa))^{-1}, i = 1, \ldots, n \tag{2.7}$$

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

Uma vez calculados os $2n + 1$ vetores $\boldsymbol{y_i}$ pode-se estimar a média e a covariância para cada variável de interesse conforme (2.8) e (2.9).

$$\boldsymbol{y_m} = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i \boldsymbol{y_i} \tag{2.8}$$

$$\boldsymbol{P_y} = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i \left[ (\boldsymbol{y_i} - \boldsymbol{y_m}) (\boldsymbol{y_i} - \boldsymbol{y_m})^T \right] \tag{2.9}$$

### 2.5.2 Exemplo numérico para uma função não linear

Como a título de exemplo, nesta seção será aplicada a UT na função não linear de duas variáveis apresentada na equação (2.10).

$$f(x,y) = 2\sin(x) + 3\cos(y) \tag{2.10}$$

Considere $X$ e $Y$ duas variáveis aleatórias contínuas com médias ($\mu_X$,$\mu_Y$) e desvios padrão ($\sigma_X$,$\sigma_Y$) em que $-\infty < x,\ y < \infty$, $\sigma_X > 0$ e $\sigma_Y > 0$. A PDF (Função Densidade de Probabilidade) é definida pela equação (2.11), sendo uma distribuição Normal. A função está associada à variável $X$ e a mesma notação se aplica à variável $Y$.

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi{\sigma_X}^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_X}{\sigma_X}\right)^2} \tag{2.11}$$

O valor esperado e a variância, são representados pelas equações (2.12) e (2.13), respectivamente, utilizando-se a variável $X$. O mesmo pode ser aplicado para $Y$.

$$E[X] = \mu_X \tag{2.12}$$

$$V[X] = {\sigma_X}^2 \tag{2.13}$$

A Probabilidade de $X$ estar entre os limites $[a, b]$ é definida pela equação (2.14), em que se constatam as aproximações apresentadas em (2.15), (2.16) e (2.17).

$$P(a < X < b) = \int_a^b \frac{1}{\sqrt{2\pi{\sigma_X}^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_X}{\sigma_X}\right)^2} dx \tag{2.14}$$

$$P(\mu_X - \sigma_X < X < \mu_X + \sigma_X) \approx 0{,}683 \tag{2.15}$$

$$P(\mu_X - 2\sigma_X < X < \mu_X + 2\sigma_X) \approx 0{,}954 \tag{2.16}$$

$$P(\mu_X - 3\sigma_X < X < \mu_X + 3\sigma_X) \approx 0{,}997 \tag{2.17}$$

A curva da distribuição Normal pode ser observada na Figura 2.2.

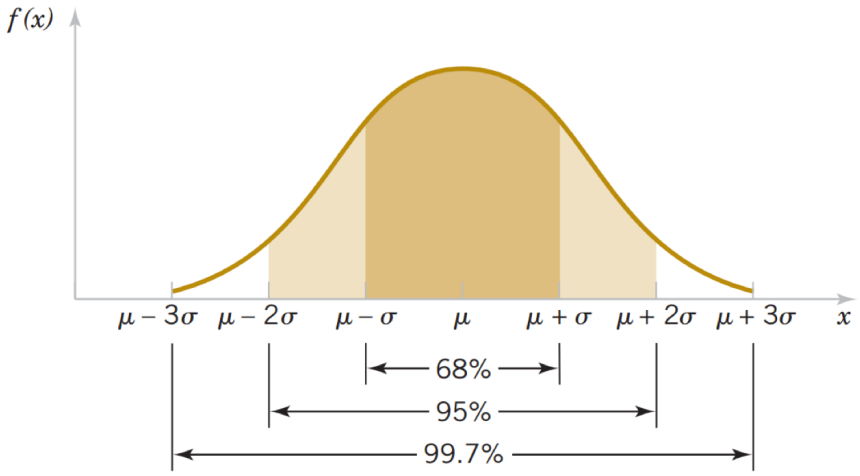


Figura 2.2: Distribuição Normal.

No Modelo Probabilístico da Função se pressupõe que as variáveis seguem a distribuição Normal conforme equações (2.18) e (2.19).

$$\begin{aligned} x &\sim N(\mu_X,\sigma_X) \\ y &\sim N(\mu_Y,\sigma_Y) \end{aligned} \tag{2.18}$$

$$f_{XY} \sim N(\mu_{f_{XY}},\sigma_{f_{XY}}) \tag{2.19}$$

Definindo os vetores com média e variância das variáveis e desvio padrão sendo 10% da média tem-se:

$$\begin{pmatrix} \mu_X \\ \mu_Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\pi \\ 2\pi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6{,}2832 \\ 6{,}2832 \end{pmatrix} \tag{2.20}$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \end{pmatrix} = 0{,}10 \begin{pmatrix} \mu_X \\ \mu_Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0{,}62832 \\ 0{,}62832 \end{pmatrix} \tag{2.21}$$

$$P_{XY} = \begin{pmatrix} 0{,}39478 & 0 \\ 0 & 0{,}39478 \end{pmatrix} \tag{2.22}$$

Como são duas variáveis de incerteza ($x$ e $y$), tem-se que $n = 2$. Para definir as amostras ou

*sigma points* de acordo com o método UT, deve-se calcular $2n + 1 = 5$ *sigma points*. Fazendo $k = 2$, a equação matricial (2.23) é resolvida a seguir.

$$U^T U = (n + k)P_x \tag{2.23}$$

O termo $U^T U$ é fatorado via Cholesky, desta forma, pela equação (2.24).

$$U = \begin{pmatrix} 1{,}2566 & 0 \\ 0 & 1{,}2566 \end{pmatrix} \tag{2.24}$$

Calculando os *sigma points*, chega-se na matriz (2.25).

$$X_i = \begin{pmatrix} 6{,}2832 & 7{,}5398 & 6{,}2832 & 5{,}0265 & 6{,}2832 \\ 6{,}2832 & 6{,}2832 & 7{,}5398 & 6{,}2832 & 5{,}0265 \end{pmatrix} \tag{2.25}$$

Aplicando os valores à função, obtém-se a Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Avaliação da função em cada amostra $\boldsymbol{f_{XYi}}$

| **Amostra** | $\boldsymbol{f(x,y)}$ |
|---|---|
| 1 | 3 |
| 2 | 4,90210 |
| 3 | 0,92705 |
| 4 | 1,09790 |
| 5 | 0,92705 |

Calculando os pesos associados a cada amostra e realizando o somatório, obtém-se a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Pesos de cada amostra $\boldsymbol{f_{XYi}}$

| **Amostra** $i$ | $W_i$ |
|---|---|
| 1 | 0,5 |
| 2 | 0,125 |
| 3 | 0,125 |
| 4 | 0,125 |
| 5 | 0,125 |
| **Somatório** | 1 |

O cálculo da média da função é realizado pela equação (2.26):

$$\mu_{f_{XY}} = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i f_{XYi} = 2{,}4818 \tag{2.26}$$

A variância é calculada pela equação (2.27):

$$(\sigma_{f_{XY}})^2 = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i (f_{XYi} - \mu_{f_{XY}})^2 = 1{,}3078 \tag{2.27}$$

## 2.6 Conclusões Parciais

Apresentou-se a revisão bibliográfica dos conceitos de microrredes CA e CC, ferramentas para a análise de fluxo de potência em microrredes CA e CC e métodos para solução do fluxo de potência probabilístico. Uma vez identificada as vantagens da Transformação Unscented para a análise de incertezas em sistemas elétricos, apresentou-se sua formulação matemática e um exemplo ilustrativo para elucidar sua fácil aplicação.

CAPÍTULO 3

# Metodologias Propostas

## 3.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta duas metodologias de Fluxo de Potência Probabilístico (FPP) e Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico (FPOP) para minimização das perdas de potência ativa em Microrredes de Corrente Contínua (CC). A simulação Monte Carlo (SMC) e a Transformação Unscented (UT) foram utilizadas. As incertezas de carga são modeladas usando a Distribuição Normal.

## 3.2 Metodologias Determinísticas

### 3.2.1 Fluxo de Potência Determinístico (FPD)

O Fluxo de Potência Determinístico (FPD) é apresentado em (3.1)-(3.2). A partir dos valores de carga $P_{dk}$ e tensão especificada na subestação $V^{\text{slack}}$ ($V^{\text{espec}}$), calculam-se as tensões nas barras do sistema. A solução das equações é realizada pelo Método de Newton-Raphson, amplamente utilizado para a solução do problema de fluxo de potência, conforme revisado por [25].

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

$$V^{\text{slack}} - V^{\text{espec}} = 0 \tag{3.2}$$

em que $P_{gk}$ é a potência gerada na barra $k$, $P_{dk}$ é a demanda de potência na barra $k$, $P_k$ é a

injeção de potência calculada em função das tensões nodais $V_k$ e matriz condutância de barras. Por fim $\Omega_B$ denota o conjunto de barras do sistema.

### 3.2.2 Fluxo de Potência Ótimo Determinístico (FPOD) para Minimização de Perdas

O FPOD é apresentado em (3.3)-(3.7). A função objetivo apresentada em (3.3) corresponde à minimização de perdas de potência ativa nos ramos. As restrições de igualdade (3.4)-(3.5) garantem o balanço de potência e o controle de tensão na barra *slack* (barra de balanço da subestação). Os limites de geração de potência ativa e de tensão nodal são apresentados em (3.6)-(3.7).

$$\min \quad P_{\text{perdas}} = \sum_{(k,m)\in\Omega_L} P_{km}^{perdas} \tag{3.3}$$

$$P_{gk} - P_{dk} - P_k = 0 \qquad k \in \Omega_B \tag{3.4}$$

$$V^{\text{slack}} - V^{\text{espec}} = 0 \tag{3.5}$$

$$\text{sa} \qquad P_{gk\,\min} \leq P_{gk} \leq P_{gk\,\max} \qquad k \in \Omega_G \tag{3.6}$$

$$V_{k\,\min} \leq V_k \leq V_{k\,\max} \qquad k \in \Omega_B \tag{3.7}$$

em que:

- $\Omega_L$, $\Omega_B$ e $\Omega_G$ são os conjuntos de ramos, barras e geradores (distribuídos e subestação);
- $P_{km}^{perdas}$ são as perdas no ramo $k-m$;
- $P_{gk}$, $P_{dk}$ e $P_k$ são as potências geradas, demandadas e injetadas na barra $k$. Para as barras que não são de geração ou subestação, $P_{gk} = 0$. A injeção de potência ativa $P_k$ é calculada com base nas tensões nodais e matriz condutância de barras (ou condutância nodal);
- $V^{\text{slack}}$ e $V^{\text{espec}}$ são as tensões na barra da subestação e o valor especificado para a tensão nessa barra.

## 3.3 Modelo Probabilístico da Carga

Para a análise probabilística, as cargas são modeladas seguindo uma Distribuição Gaussiana com média $\mu_{P_{dk}}$ e desvio padrão $\sigma_{P_{dk}}$ conhecidos. A função densidade de probabilidade $f\left(P_{dk}\right)$

de uma carga na barra $k$ é apresentada em (3.8).

$$f\left(P_{dk}\right) = \frac{1}{\sigma_{P_{dk}}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(P_{dk}-\mu_{P_{dk}}\right)^2}{2\sigma^2_{P_{dk}}}} \tag{3.8}$$

O vetor $\boldsymbol{x}$ com as entradas para a análise probabilística ($nb$ cargas) é definido em (3.9), em que cada elemento segue a distribuição normal definida em (3.8).

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} P_{d1} & \dots & P_{dk} & \dots & P_{dnb} \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

A partir do vetor $\boldsymbol{x}$ de cargas incertas, deseja-se calcular a média e a variância de um vetor $\boldsymbol{y}$ composto pelas variáveis de saída de interesse (tensões e gerações). Isso é feito a partir de uma função não linear $g(\boldsymbol{x})$ definida em (3.10). Nesse caso, $g(\boldsymbol{x})$ pode ser entendida como o problema de FPD ou FPOD.

$$\boldsymbol{y} = g(\boldsymbol{x}) \tag{3.10}$$

em que:

- $\boldsymbol{y}$ é o vetor com as grandezas de interesse: perdas de potência ativa, tensões nas barras e potências geradas.
- $g(\boldsymbol{x})$ é uma função não linear.

Pode-se utilizar 2 métodos para a solução de (3.10), a UT e a SMC, sendo este último o método mais aplicado. O vetor de médias e a matriz de variâncias são dados por (3.11)-(3.12). Em geral a média é definida como a carga nominal e a variância (desvio padrão ao quadrado) como uma porcentagem da média.

$$\boldsymbol{x_m} = \begin{bmatrix} \mu_{P_{d1}} \\ \vdots \\ \mu_{P_{dk}} \\ \vdots \\ \mu_{P_{dnb}} \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

$$\boldsymbol{P_x} = \begin{bmatrix} \sigma^2_{P_{\mathrm{d}_1}} & & \\ & \ddots & \\ & & \sigma^2_{P_{dnb}} \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

## 3.4 Metodologias Propostas

### 3.4.1 Fluxo de Potência Probabilístico (FPP) via UT

Proposta por [11], a UT tem como princípio obter deterministicamente um conjunto de vetores denominados de *sigma points*, que capturam a média e a covariância de $\boldsymbol{x}$. Os *sigma points* são então aplicados na função não-linear g($\boldsymbol{x}$) para a estimação da média e covariância de $\boldsymbol{y}$.

Inicialmente, deve-se definir um conjunto de $2n + 1$ *sigma points* $\boldsymbol{\chi_i}$ (vetores coluna de ordem $n \times 1$) e seus respectivos pesos $W_i$ (existem $2n + 1$ pesos, um para cada $\boldsymbol{\chi_i}$). Aqui, $n = nb$, que é o número de variáveis incertas de entrada (cargas em (3.9)). Cada *sigma point* $\boldsymbol{\chi_i}$ é uma amostra para o vetor de cargas.

Os vetores $\boldsymbol{\chi_i}$ são definidos conforme (3.13)-(3.15). Ressalta-se que a UT utiliza um conjunto de *sigma points* que não são randomicamente escolhidos tal como ocorre na Simulação Monte Carlo.

$$\boldsymbol{\chi_1} = \boldsymbol{x_m} \tag{3.13}$$

$$\boldsymbol{\chi_{i+1}} = \boldsymbol{x_m} + \boldsymbol{u}_i, \quad i = 1, \ldots, n \tag{3.14}$$

$$\boldsymbol{\chi_{i+n+1}} = \boldsymbol{x_m} - \boldsymbol{u}_i, \quad i = 1, \ldots, n \tag{3.15}$$

em que $\boldsymbol{u_i}$ é um vetor linha da matriz $\boldsymbol{U}$ obtido a partir da fatoração de Cholesky como apresentado em (3.16).

$$\boldsymbol{U^T U} = (n + \kappa)\boldsymbol{P_x} \tag{3.16}$$

No trabalho proposto por [24], discute-se que o parâmetro $\kappa$ é escolhido empiricamente para

reduzir os erros de estimação da média e covariância. No presente trabalho, de forma similar ao feito por [14], adota-se $\kappa = 2$, que é um valor comumente empregado na literatura e que apresentou bons resultados quando comparados com os da SMC.

Os pesos $W_i$ são calculados conforme (3.17)-(3.19).

$$W_1 = \frac{\kappa}{n+\kappa} \tag{3.17}$$

$$W_{i+1} = (2(n+\kappa))^{-1}, i = 1, \ldots, n \tag{3.18}$$

$$W_{i+n+1} = (2(n+\kappa))^{-1}, i = 1, \ldots, n \tag{3.19}$$

É importante mencionar que cada *sigma point* $\boldsymbol{\chi_i}$ representa um vetor coluna $(n \times 1)$ com os valores de carga ativa nos barramentos ($n = nb$). Para cada $\boldsymbol{\chi_i}$, aplica-se a função não linear $\boldsymbol{y_i} = g(\boldsymbol{\chi_i})$, sendo $\boldsymbol{y_i}$ o vetor com as grandezas de interesse e $g(\boldsymbol{\chi_i})$ o FPD (Seção 3.2.1).

Uma vez calculados os $2n+1$ vetores $\boldsymbol{y_i}$ pode-se estimar a média e a covariância para cada variável de interesse conforme (3.20) e (3.21).

$$\boldsymbol{y_m} = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i \boldsymbol{y_i} \tag{3.20}$$

$$\boldsymbol{P_y} = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i \left[ (\boldsymbol{y_i} - \boldsymbol{y_m}) (\boldsymbol{y_i} - \boldsymbol{y_m})^T \right] \tag{3.21}$$

### 3.4.2 Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico (FPOP) via UT

Para a solução do FPOP via UT utiliza-se os mesmos passos mencionados na seção 3.4.1, porém é importante mencionar que para cada *sigma point* $\boldsymbol{\chi_i}$, aplica-se a função não linear (3.10), sendo $\boldsymbol{y_i}$ o vetor com as grandezas de interesse e $g(\boldsymbol{\chi_i})$ o FPOD, descrito na seção 3.2.2.

### 3.4.3 Descrição dos Passos para Aplicação da UT

Ambas as metodologias de fluxo de potência e fluxo de potência ótimo via UT podem ser aplicadas através dos seguintes passos:

- **Passo 01**: Obter os dados do sistema e os dados estatísticos das cargas como definido em (3.11)-(3.12). Tem-se $n = nb$ cargas incertas (sendo $nb$ barras).

- **Passo 02**: Calular os $2n + 1$ *sigma points* $\chi_i$ através de (3.13)-(3.15).

- **Passo 03**: Calcular os $2nb + 1$ pesos $W_i$ através de (3.17)-(3.19).

- **Passo 04**: Para cada *sigma point* $\chi_i$ calcular um Fluxo de Potência Determinístico (FPD) ou Fluxo de Potência Ótimo Determinístico (FPOD).

- **Passo 05**: Calcular a média e a variância das variáveis de saída de interesse conforme (3.20) e (3.21).

## 3.5 Simulação Monte Carlo (SMC)

### 3.5.1 Fluxo de Potência Probabilístico (FPP) via SMC

Um método numérico bastante empregado (apesar do custo computacional elevado) para a solução de (3.10) é a SMC. Nesse caso, gera-se uma determinada quantidade de amostras para o vetor $\boldsymbol{x}$, executa-se o FPD (Seção 3.2.1) para cada amostra e calcula-se a média e desvio padrão de cada variável de saída (tensões e potências geradas). Apesar dos bons resultados obtidos (muitas vezes usados como *benchmark*), a elevada quantidade de amostras torna o método não atrativo para sistemas de grande porte.

Para um determinado conjunto de valores, deseja-se calcular a média e a variância de cada grandeza do sistema usando a equação (3.10), sabendo que as cargas seguem a distribuição normal descrita em (3.8). O método SMC utiliza um conjunto de amostras da variável $x$, que satisfaz (3.8), para estimar diretamente a média e a variância das grandezas de interesse através da equação (3.10). Os passos a seguir foram resumidos por [14], e são descritos abaixo:

- **Passo 1**: Gerar uma amostra para o vetor de cargas ativa;

- **Passo 2**: Resolver o Fluxo de Potência Determinístico (Seção 3.2.1), descrito em 3.2, e armazenar os valores das grandezas de interesse;

- **Passo 3**: se o número de amostras geradas for o estabelecido como critério de parada, vá ao **Passo 4**. Caso contrário, retorne ao **Passo 1**;

- **Passo 4**: Calcular a média e variância de todas as grandezas de interesse (y) e encerrar o processo.

### 3.5.2 Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico (FPOP) via SMC

A solução do FPOP via SMC é realizado da mesma forma descrita na Seção 3.5.1. Porém, no **Passo 2** resolve-se o Fluxo de Potência Ótimo Determinístico (Seção 3.2.2).

## 3.6 Consideração da Curva de Carga

Uma importante métrica nos estudos de planejamento é a energia elétrica perdida durante um dia de operação. Considerando a incerteza da carga, no presente trabalho é proposto um fluxo de potência ótimo probabilístico horário para minimização dessa energia perdida, cujos passos são descritos no Algoritmo 1.

**Algoritmo 1:** Pseudocódigo para solução do FPO-P considerando uma curva de carga

**Passo 01**: Leitura dos dados da microrrede CC (vetor de cargas nominais, tensão da subestação e dados de ramos).

**Passo 02**: Leitura dos dados da curva de carga (fatores $f_{carga}^{h}$). A curva de carga é para as $h$ horas.

**forall** $h$ **do**

> **Passo 03**: Obter o vetor de cargas atualizado multiplicando-se os valores nominais pelo fator $f_{carga}^{h}$.
>
> **Passo 04**: O novo vetor de cargas (cargas atualizadas) é considerado com o valor médio $\boldsymbol{x_m}$ e a matriz de variância $\boldsymbol{P_x}$ é obtida a partir dos desvios padrão tomados como uma porcentagem do valor médio.
>
> **Passo 05**: Resolver o Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico via UT prosposto na Seção 3.4.2.
>
> **Passo 06**: Armazenar a solução do FPO-P para a hora $h$.

**end**

**Passo 07**: Plotar os valores de interesse.

## 3.7 Considerações Finais

No presente capítulo apresentou-se uma metodologia de Fluxo de Potência Probabilístico e de Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico. A incerteza da carga foi modelada a partir da Distribuição Normal e a Transformação Unscented foi utilizada para a solução do método proposto.

Adicionalmente, uma metodologia para a consideração da curva de carga foi proposta. Por fim, para efeitos de comparação, a solução via Simulação Monte Carlo também foi discutida.

CAPÍTULO 4

# Resultados

## 4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta os resultados do Fluxo de Potência Determinístico (FPD), do Fluxo de Potência Probabilístico (FPP), do Fluxo de Potência Ótimo Determinístico (FPOD) e do Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico (FPOP) para minimização das perdas de potência ativa em Microrredes de Corrente Contínua (CC). A simulação Monte Carlo (SMC) e a Transformação Unscented (UT) foram utilizadas para resolver o problema proposto anteriormente, sendo que a avaliação foi realizada para uma microrrede CC de 10 barras e outra de 33 barras. As incertezas de carga são modeladas usando a Distribuição Normal. Também foram apresentados os resultados do fluxo de potência horário para o sistema de 33 barras com objetivo de minimização das perdas horárias.

## 4.2 Definição de Parâmetros para as Simulações

As simulações foram realizadas utilizando a plataforma MatLab (versão 2010a) [1]. As simulações foram realizadas em um computador MacBook® Air™ Intel i5 Dual-Core 1,6 GHz com 4 GB de RAM e sistema operacional iOS 64 bits.

## 4.3 Sistema 10 Barras

A presente seção descreve os estudos realizados e apresenta os resultados obtidos com o FPP e FPOP propostos para o sistema de 10 barras.

[1] Versão licenciada à Universidade Federal de São João del-Rei.

### 4.3.1 Descrição do Sistema

O sistema utilizado no estudo de caso, ilustrado na Figura 4.1, foi obtido do trabalho de [4, 6]. Com 10 barras, sendo uma a subestação (barra *slack* ou de balanço com o conversor CA/CC que conecta a rede principal à microrrede CC), o sistema conta com duas unidades de geração despacháveis nas barras 5 e 8, conectados por conversores CC/CA e CA/CC, respectivamente. Os dados de linha e de barra são apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2. Como considerado por [6], os limites de tensão são de 0,9 a 1,1 pu e os limites de potência são dados na Tabela 4.2. A tensão na subestação (barra 1) é fixada em 1 pu.

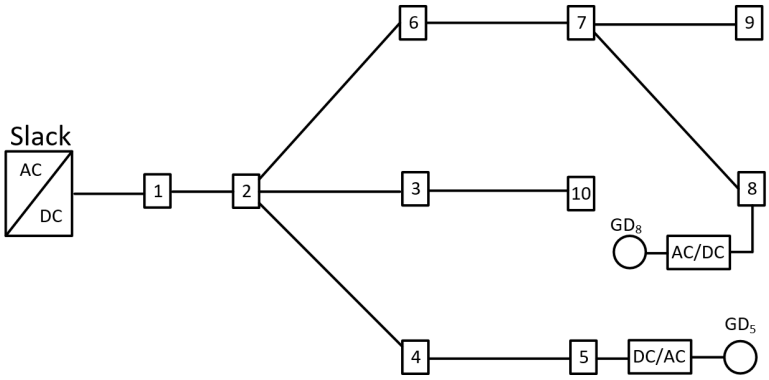


Figura 4.1: Diagrama Unifilar do Sistema de 10 Barras.

Tabela 4.1: Dados de Linha do Sistema de 10 Barras

| De | Para | $r_{km}$ (pu) | De | Para | $r_{km}$ (pu) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 0,005 | 6 | 7 | 0,0017 |
| 2 | 3 | 0,0015 | 7 | 8 | 0,0021 |
| 2 | 4 | 0,002 | 7 | 9 | 0,0013 |
| 4 | 5 | 0,0018 | 3 | 10 | 0,0015 |
| 2 | 6 | 0,0023 | – | – | – |

Tabela 4.2: Dados de Barra do Sistema de 10 Barras (em pu)

| Barra | $P_d$ | $G_{sh}$ | $P_{gmin}$ | $P_{gmax}$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | – | – | -10 | 10 |
| 2 | – | – | – | – |
| 3 | 0,8 | – | – | – |
| 4 | 1,3 | – | – | – |
| 5 | – | – | 0 | 2,5 |
| 6 | – | 0,5 | – | – |
| 7 | – | – | – | – |
| 8 | – | – | 0 | 2,5 |
| 9 | 0,7 | – | – | – |
| 10 | – | 0,8 | – | – |

O estudo de caso para o Sistema 10 Barras foi realizado considerando três simulações: (*i*) FPP (caso base), (*ii*) FPOP via UT e SMC com GD fixa de 0,5 pu e 0,3 pu, e (*iii*) FPOP via UT e SMC com geração despachável $0 \leq P_{g5}, P_{g8} \leq 2.5$. Ressalta-se que no caso base as unidades distribuídas nas barras 5 e 8 não despacham potência e então $P_{g5} = P_{g8} = 0$.

Nas simulações probabilísticas considera-se que as cargas ativas ($P_d$) da Tabela 4.2 são modeladas considerando a distribuição normal com média igual ao valor nominal e desvio padrão igual à 10% da média. Para a SMC foram consideradas 10 mil amostras e para a UT tem-se que a quantidade de amostras varia conforme o número de variáveis incertas. Considerando 10 barramentos, têm-se 10 variáveis aleatórias (relativas a cargas ativa por barra) seguindo a função de distribuição normal. Com isso, o número de *sigma points*, de acordo com a definição do método da UT na seção 2.5, é igual a $2 \times 10 + 1 = 21$.

### 4.3.2 Caso 1: Sistema sem Geração Distribuída

A Tabela 4.3 apresenta uma comparação entre os métodos considerando a potência drenada da subestação no caso 1 (para suprimento das cargas e balanço das perdas).

Tabela 4.3: Solução do FPP do Sistema 10 Barras para o Caso 1: Potência (pu)

| **Barra** | **FPD** | **FPP UT** | | **FPP SMC** | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Média** | **Desvio** | **Média** | **Desvio** |
| **1** | 4,1372 | 4,1374 | 0,1738 | 4,1372 | 0,1719 |

O comportamento das tensões nodais no caso base é apresentado na Figura 4.2. A solução determinística é a mesma que é apresentada por [4]. Observa-se que os valores médios das tensões da análise probabilística, apresentados na Figura 4.3, são próximos à solução determinística, bem como se observa a coerência das soluções via UT e SMC.

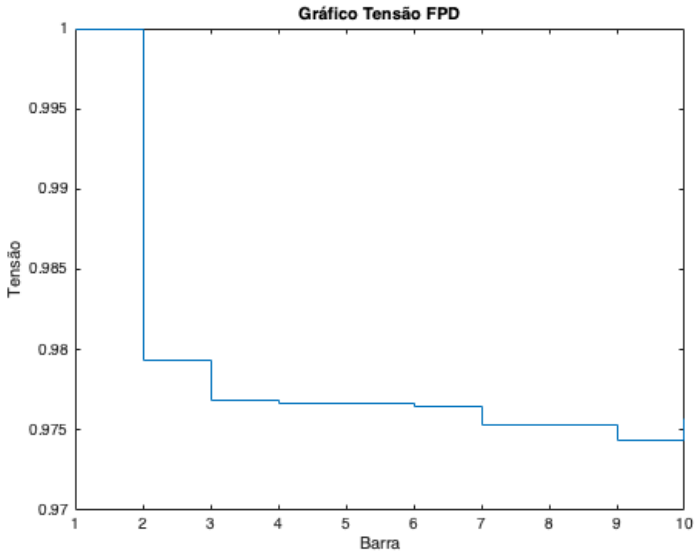


Figura 4.2: Tensões do FPD - Caso 01 - Sistema 10 Barras.

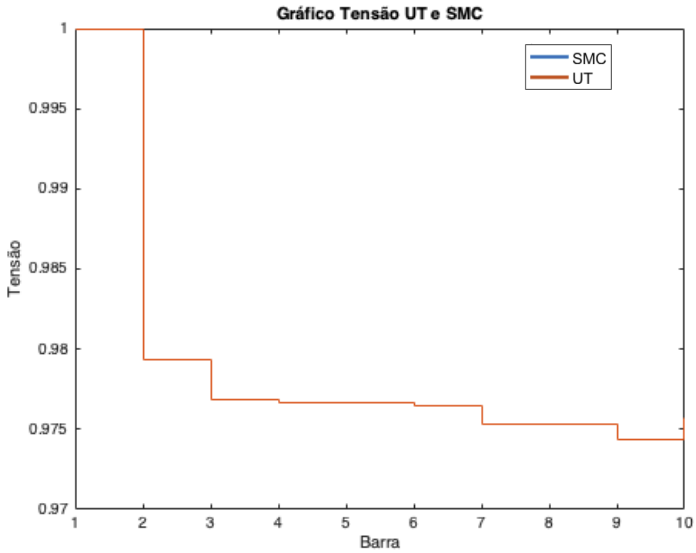


Figura 4.3: Valor Médio das Tensões FPP - Caso 01 - Sistema 10 Barras.

A Figura 4.4 mostra os valores de desvio padrão das tensões considerando as técnicas UT e SMC. Pode-se notar que o desvio padrão é nulo somente na barra de referência (barra 1). Considerando que o uso da UT captura a média e a covariância das variáveis e que a SMC fez uso de um número maior de amostras, diferenças pontuais entre os métodos podem existir. Porém, observam-se resultados bastante próximos entre os métodos.

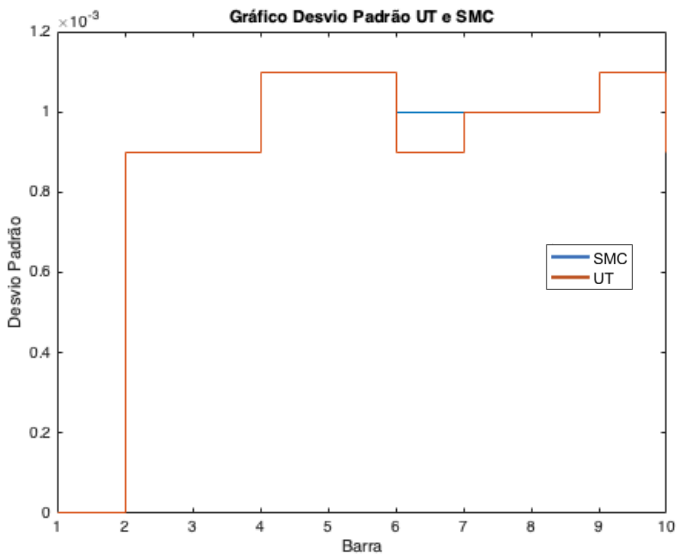


Figura 4.4: Desvio Padrão das Tensões FPP - Caso 01 - Sistema 10 Barras.

### 4.3.3 Caso 2: Sistema com Geração Distribuída Fixa

Em termos de potência absorvida da subestação (conversor CA/CC na barra 1), é notória na Tabela 4.4 a redução neste valor (média e desvio padrão). Isso se deve ao fato de que na solução do FPOP considera-se que as unidades de geração das barras 5 e 8 estão despachando potência (o que não ocorre no caso base). Novamente, os valores obtidos via SMC e UT são condizentes.

Tabela 4.4: Solução do FPOP do Sistema 10 Barras para o Caso 2: Potência (pu)

| **Barra** | **FPOD** | **FPOP UT** | | **FPOP SMC** | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Média** | **Desvio** | **Média** | **Desvio** |
| **1** | 3,3141 | 3,3143 | 0,1821 | 3,3137 | 0,1801 |
| **5** | 0,5 | 0,5 | 0,05 | 0,5 | 0,0501 |
| **8** | 0,3 | 0,3 | 0,03 | 0,2997 | 0,0302 |

Considerando a solução do FPOP, a Figura 4.5 mostra o perfil da tensão para o caso 2, ou seja, considerando GDs fixas em 0,5 e 0,3 pu nas barras 5 e 8, respectivamente.

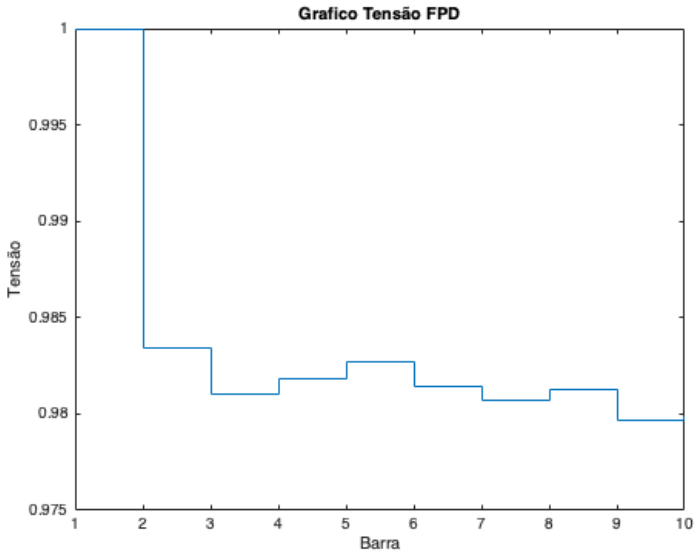


Figura 4.5: Tensões do FPOD - Caso 02 - Sistema 10 Barras.

A Figura 4.6 mostra o perfil de tensões para o caso 2 via as simulações probabilísticas (valor médio), via UT e SMC. Nota-se a grande semelhança entre as Figuras 4.5 e 4.6.

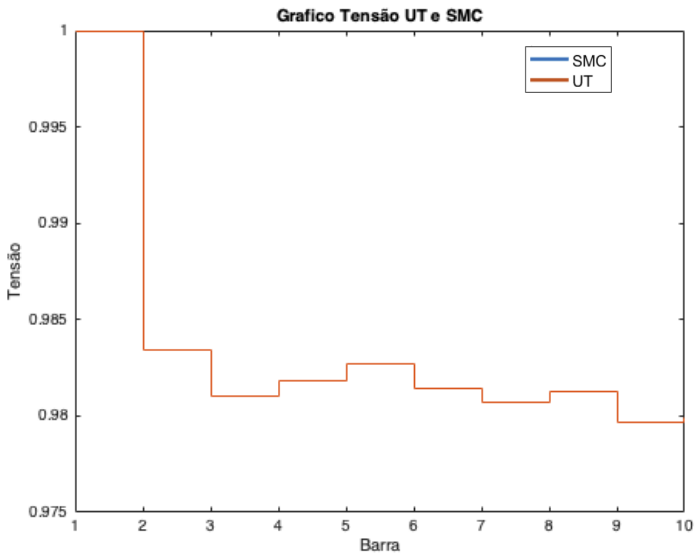


Figura 4.6: Valor Médio das Tensões FPOP - Caso 02 - Sistema 10 Barras.

A Figura 4.7 apresenta os valores do desvio padrão das tensões obtidas para as simulações probabilísticas via UT e SMC. Incluindo-se a GD, a ordem de grandeza dos valores de desvio padrão obtidos são da mesma ordem dos obtidos ao comparar com o caso 1 (gráfico da Figura 4.4). As simulações UT e SMC forneceram valores de desvio padrão bastante próximos.

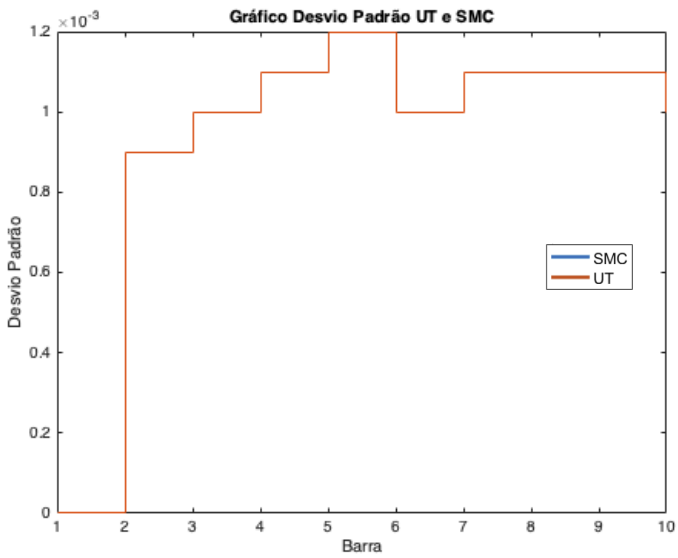


Figura 4.7: Desvio Padrão das Tensões FPOP - Caso 02 - Sistema 10 Barras.

### 4.3.4 Caso 3: Sistema com Geração Distribuída Otimizada

A Tabela 4.5 apresenta os resultados da simulação do FPOD e do FPOP, via UT e SMC, para o caso 3, ou seja, utlizando GDs variáveis de 0 a 2,5 pu. Analisando os dados nota-se que a potência gerada pela barra de referência diminuiu de forma significativa, e este valor foi complementado pela GDs proporcionalmente.

Tabela 4.5: Solução do FPOP do Sistema 10 Barras para o Caso 3: Potência (pu)

| **Barra** | **FPOD** | **FPOP UT** | | **FPOP SMC** | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Média** | **Desvio** | **Média** | **Desvio** |
| **1** | 0,8879 | 0,8861 | 0,0485 | 0,8880 | 0,034 |
| **5** | 1,8376 | 1,8404 | 0,1529 | 1,8381 | 0,0978 |
| **8** | 1,3785 | 1,3777 | 0,0885 | 1,3784 | 0,0585 |

Um dos benefícios da alocação planejada de geradores distribuídos é a melhoria do perfil de tensão, o que pode ser confirmada a partir da Figura 4.8 para o sistema em análise, os valores de tensão foram elevados para próximo de 1 pu, nas barras 5 e 8. Nota-se que os valores médios, apresentados na Figura 4.9, foram elevados para próximo de 1 pu, nas barras 5 e 8. Novamente, observa-se a coerência entre as duas técnicas probabilísticas utilizadas, já que em ambas houve elevação considerável no valor médio de tensão das barras do sistema.

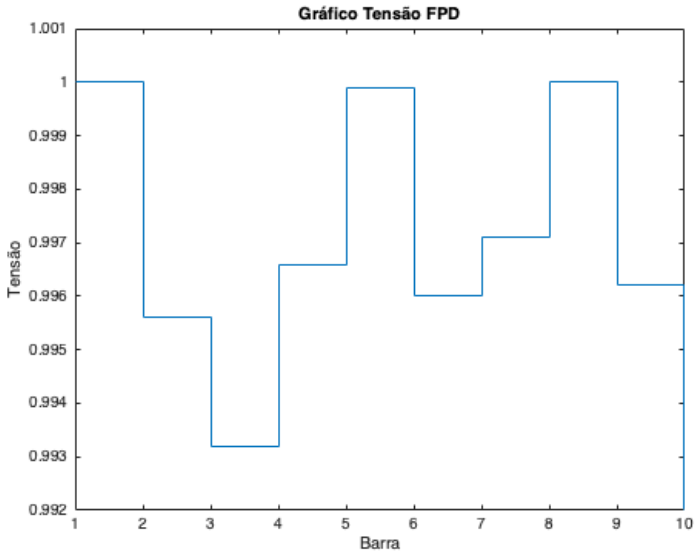


Figura 4.8: Tensões do FPOD - Caso 03 - Sistema 10 Barras.

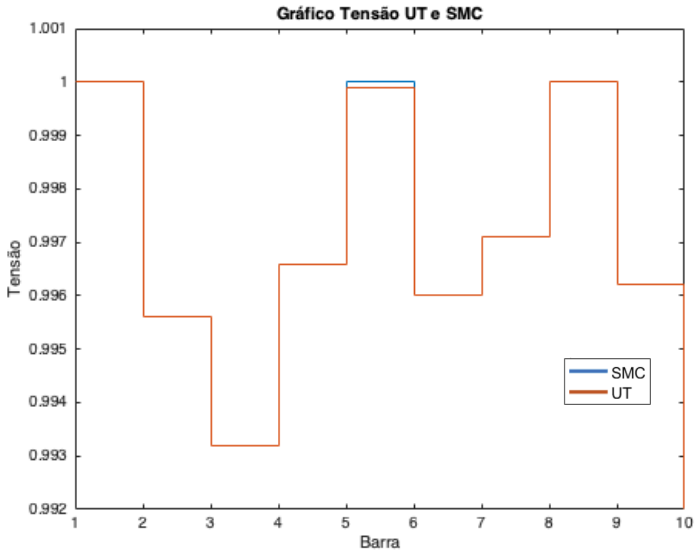


Figura 4.9: Valor Médio das Tensões FPOP - Caso 03 - Sistema 10 Barras.

A Figura 4.10 mostra o desvio padrão das tensões via UT e SMC, e ele apresenta valor nulo na barra de referência e nas barras 5 e 8, barras onde estão alocadas as GDs. O desvio padrão dos resultados na metodologia UT foi inferior aos obtidos na metodologia SMC para o número de discretizações utilizado na simulação. Contudo, os resultados obtidos são, então, bastante coerentes.

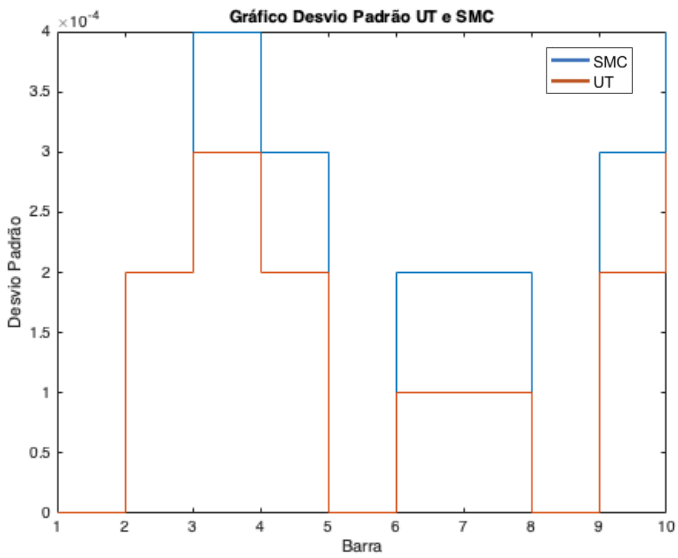


Figura 4.10: Desvio Padrão das Tensões FPOP - Caso 03 - Sistema 10 Barras.

### 4.3.5 Estudo comparativo dos Valores de Perdas e de Tempo Computacional para o Sistema de 10 barras

A Tabela 4.6 apresenta o resultado geral do comportamento das perdas perante as simulações realizadas para o sistema de 10 barras. Para cada um dos três casos simulados, o valor de perdas totais alcançadas é bastante similar em qualquer das metodologias utilizadas. Comparando-se os resultados relativos às diferenças de tratamento da GD, tem-se redução significativa nas perdas totais entre os casos 1, 2 e 3. Isto ocorre porque não se considera GD's no caso 1 e estas são consideradas de forma fixa no caso 2, permitindo, assim, redução específica de perdas. Já o caso 3 aloca as GD's disponíveis de forma a minimizar as perdas totais, justificando a ocorrência da redução nos valores médios de perdas observados na tabela. Os valores de desvio padrão possuem ordem de grandeza parecida (UT e SMC nas simulações probabilísticas).

Tabela 4.6: Resultados das Perdas do Sistema de 10 Barras

| | SIMULAÇÃO | PERDAS (PU) | | PERDAS (KW) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Média** | **Desvio** | **Média** | **Desvio** |
| **Caso 1** | FPD | 0,0988 | - | 9,8774 | - |
| | FPP UT | 0,099 | 0,0083 | 9,9010 | 0,8271 |
| | FPP SMC | 0,099 | 0,0082 | 9,8998 | 0,8155 |
| **Caso 2** | FPOD | 0,0645 | - | 6,4475 | - |
| | FPOP UT | 0,0647 | 0,0068 | 6,4739 | 0,6824 |
| | FPOP SMC | 0,0647 | 0,0067 | 6,4710 | 0,6717 |
| **Caso 3** | FPOD | 0,0209 | - | 2,0852 | - |
| | FPOP UT | 0,0210 | 0,0023 | 2,0980 | 0,2260 |
| | FPOP SMC | 0,0209 | 0,0015 | 2,0908 | 0,1483 |

Os tempos computacionais das simulações são apresentados na Tabela 4.7 e trazem como resultado dois pontos importantes relacionados à eficiência da técnica UT quando comparada com a SMC. Devido ao número reduzido de amostras da primeira técnica, há uma redução significativa no tempo computacional para o caso de fluxo de potência sem uso de otimização. O segundo ponto a se observar é uma redução computacional ainda maior do uso da UT quando se aliam métodos de otimização ao problema, mostrando uma viabilidade importante do uso da transformação.

Tabela 4.7: Resultados do Tempo Computacional do Sistema de 10 Barras

| | SIMULAÇÃO | TEMPO (MIN) |
|---|---|---|
| **Caso 1** | FPP UT | 0,0892 |
| | FPP SMC | 6,3785 |
| **Caso 2** | FPOP UT | 0,0814 |
| | FPOP SMC | 10,7827 |
| **Caso 3** | FPOP UT | 0,0453 |
| | FPOP SMC | 14,4481 |

## 4.4 Sistema 33 Barras

A presente seção descreve os estudos realizados e apresenta os resultados obtidos com o FPP e FPOP propostos para o sistema de 33 barras.

### 4.4.1 Descrição do Sistema

O sistema utilizado no estudo de caso, ilustrado na Figura 4.11 , foi obtido do trabalho de [14]. Com 33 barras, sendo uma subestação na barra 33 (barra *slack* ou de balanço com o conversor CA/CC que conecta a rede principal à microrrede CC), o sistema conta com três unidades de geração despacháveis nas barras 2, 12 e 29, conectados por conversores CA/CC. Os dados de linha e de barra são apresentados nas Tabelas 4.8 e 4.9. Como considerado por [6], os limites de tensão são de 0,95 a 1,05 pu e os limites de potência são dados na Tabela 4.9. A tensão na subestação (barra 33) é fixada em 1 pu. As cargas reativas e as reatâncias das linhas de distribuição são desprezadas. As bases de potência e de tensão são 1 MVA e 12.66 kV, respectivamente.

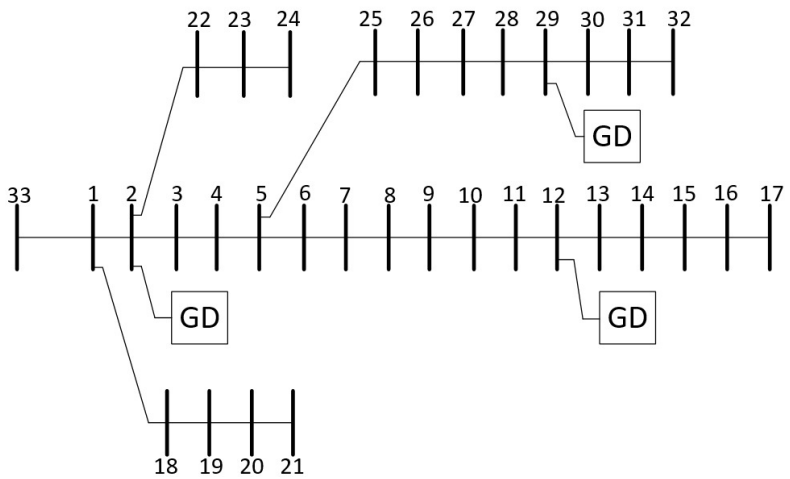


Figura 4.11: Diagrama unifilar do Sistema de 33 barras

Tabela 4.8: Dados de Linha do Sistema de 33 Barras

| De | Para | $r_{km}$ ($\Omega$) | De | Para | $r_{km}$ ($\Omega$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 33 | 1 | 0,0922 | 16 | 17 | 0,732 |
| 1 | 2 | 0,493 | 1 | 18 | 0,164 |
| 2 | 3 | 0,366 | 18 | 19 | 1,5042 |
| 3 | 4 | 0,3811 | 19 | 20 | 0,4095 |
| 4 | 5 | 0,819 | 20 | 21 | 0,7089 |
| 5 | 6 | 0,1872 | 2 | 22 | 0,4512 |
| 6 | 7 | 0,7114 | 22 | 23 | 0,898 |
| 7 | 8 | 1,03 | 23 | 24 | 0,896 |
| 8 | 9 | 1,044 | 5 | 25 | 0,203 |
| 9 | 10 | 0,1966 | 25 | 26 | 0,2842 |
| 10 | 11 | 0,3744 | 26 | 27 | 1,059 |
| 11 | 12 | 1,468 | 27 | 28 | 0,8042 |
| 12 | 13 | 0,5416 | 28 | 29 | 0,5075 |
| 13 | 14 | 0,591 | 29 | 30 | 0,9744 |
| 14 | 15 | 0,7463 | 30 | 31 | 0,3105 |
| 15 | 16 | 1,289 | – | – | – |

Tabela 4.9: Dados de Barra Sistema 33 Barras (Cargas em kW e Geração em MW)

| Barra | $P_d$ | $G_{sh}$ | $P_{gmin}$ | $P_{gmax}$ | Barra | $P_d$ | $G_{sh}$ | $P_{gmin}$ | $P_{gmax}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 100 | – | – | – | 18 | 90 | – | – | – |
| 2 | 90 | – | 0 | 2,5 | 19 | 90 | – | – | – |
| 3 | 120 | – | – | – | 20 | 90 | – | – | – |
| 4 | 60 | – | – | – | 21 | 90 | – | – | – |
| 5 | 60 | – | – | – | 22 | 90 | – | – | – |
| 6 | 200 | – | – | – | 23 | 420 | – | – | – |
| 7 | 200 | – | – | – | 24 | 420 | – | – | – |
| 8 | 60 | – | – | – | 25 | 60 | – | – | – |
| 9 | 60 | – | – | – | 26 | 60 | – | – | – |
| 10 | 45 | – | – | – | 27 | 60 | – | – | – |
| 11 | 60 | – | – | – | 28 | 120 | – | – | – |
| 12 | 60 | – | 0 | 2,5 | 29 | 200 | – | 0 | 2,5 |
| 13 | 120 | – | – | – | 30 | 150 | – | – | – |
| 14 | 60 | – | – | – | 31 | 210 | – | – | – |
| 15 | 60 | – | – | – | 32 | 60 | – | – | – |
| 16 | 60 | – | – | – | 33 | 0 | – | -999 | 999 |
| 17 | 90 | – | – | – | – | – | – | – | – |

O estudo de caso para o Sistema 33 Barras foi realizado considerando três simulações: (*i*) FPP(caso base), (*ii*) FPOP via UT e SMC com GD fixa de 0,5 pu, e e (*iii*) FPOP via UT e SMC com gerações despacháveis entre 0 e 2.5 MW (ou 2.5 pu). Ressalta-se que no caso base as unidades distribuídas nas barras 2, 12 e 29 não despacham potência e então $P_{g2} = P_{g12} = P_{g29} = 0$.

Nas simulações probabilísticas considera-se que as cargas ativas ($P_d$) da Tabela 4.9 são modeladas considerando a distribuição normal com média igual ao valor nominal e desvio padrão igual à 10% da média. Para a SMC foram consideradas 10 mil amostras e para a UT tem-se que a quantidade de amostras varia conforme o número de variáveis incertas. Considerando 33 barramentos, tem-se 33 variáveis aleatórias (relativas a cargas ativa) seguindo a função de distribuição normal. Com isso, o número de *sigma points*, de acordo com a definição do método da UT na seção 2.5, é igual à $2 \times 33 + 1 = 67$.

### 4.4.2 Caso 1: Sistema sem Geração Distribuída

A Tabela 4.10 apresenta os valores da potência absorvida pela subestação (barra 33) do caso 1 para o sistema de 33 barras, em que a minimização de perdas não é realizada, pois não é utilizado o algoritmo de FPO, e sim, o de FP convencional (isto é, não ótimo). Neste caso a potência é drenada totalmente da barra de referência (barra 33). Nota-se que os valores do fluxo de potência determinístico e probabilístíco são bem próximos.

Tabela 4.10: Solução do FPP do Sistema 33 Barras para o Caso 1: Potência (pu)

| **Barra** | **FPD** | **FPP UT** | | **FPP SMC** | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Média** | **Desvio** | **Média** | **Desvio** |
| **33** | 3,8440 | 3,8442 | 0,0890 | 3,8442 | 0,0886 |

Os gráficos das Figuras 4.12 e 4.13 representam o resultado do fluxo de potência determinístico e probabilístico (tensões e valores médios), em que pode-se notar uma queda nos valores de tensão nas barras 18 e 32 (barras no final do ramal). O gráfico da Figura 4.14, que representa o desvio padrão nas simulações probabilísticas, via UT e SMC, apresenta resultados condizentes.

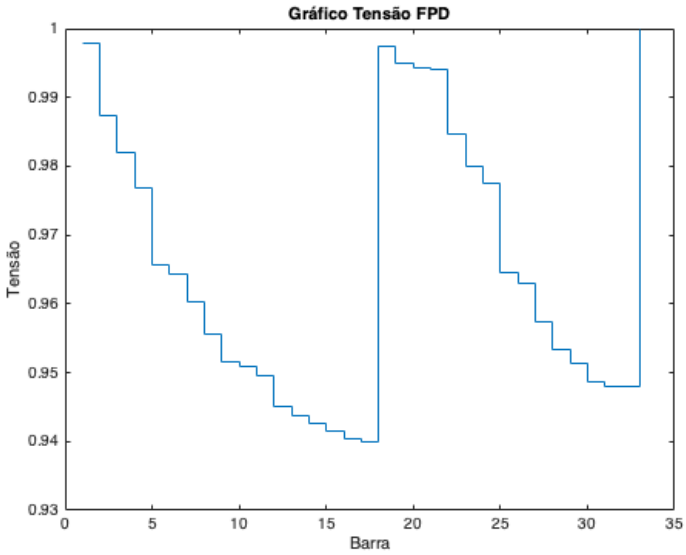


Figura 4.12: Gráfico das Tensões do FPD.

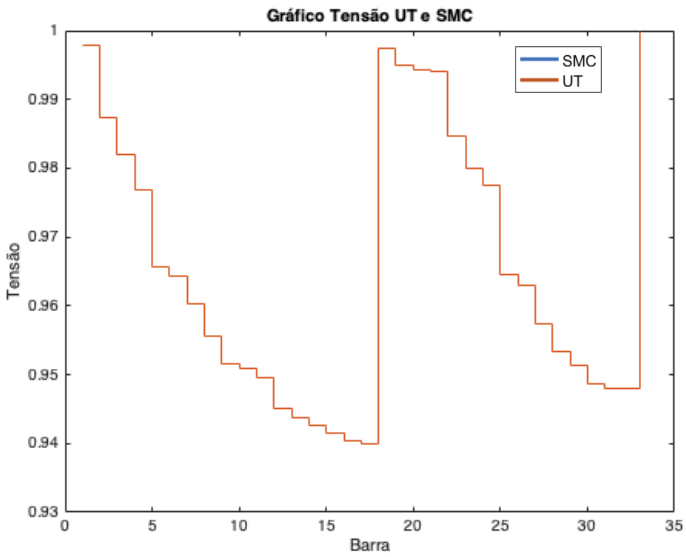


Figura 4.13: Valor Médio das Tensões FPP - Caso 01 - Sistema 33 Barras.

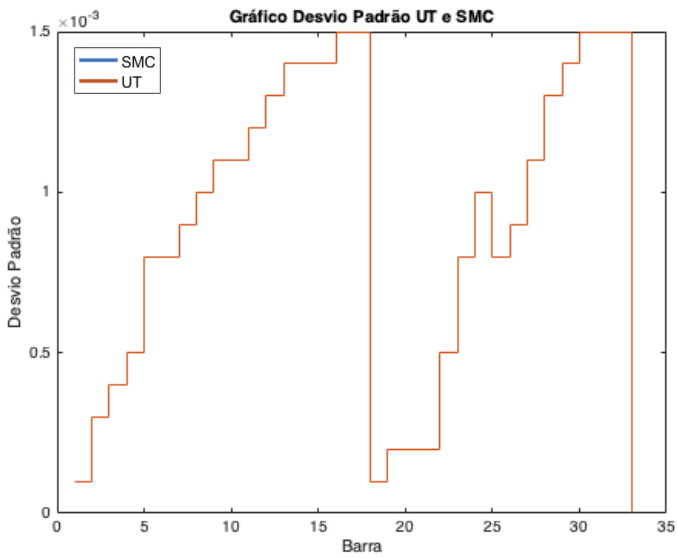


Figura 4.14: Desvio Padrão das Tensões FPP - Caso 01 - Sistema 33 Barras.

### 4.4.3 Caso 2: Sistema com Geração Distribuída Fixa

Em termos de potência absorvida da subestação (conversor CA/CC na barra 33), é notória na Tabela 4.11 a redução neste valor (média e desvio padrão). Isso se deve ao fato de que na solução do FPO considera-se que as unidades de geração das barras 5 e 8 estão despachando potência (valor fixo, o que não ocorre no caso base). Novamente, os valores obtidos via SMC e UT são condizentes.

Tabela 4.11: Solução do FPOP do Sistema 33 Barras para o Caso 2: Potência (pu)

| **Barra** | **FPOD** | **FPOP UT** | | **FPOP SMC** | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Média** | **Desvio** | **Média** | **Desvio** |
| **2** | 0,5 | 0,5 | 0,05 | 0,5004 | 0,0499 |
| **12** | 0,5 | 0,5 | 0,05 | 0,4995 | 0,0501 |
| **29** | 0,5 | 0,5 | 0,05 | 0,4994 | 0,0503 |
| **33** | 2,2545 | 2,2548 | 0,1247 | 2,2553 | 0,0892 |

Os gráficos das Figuras 4.15 e 4.16 mostram que os valores de tensão nas barras que possuem GDs aumentaram, em relação ao caso 1 (sem otimização e sem GD), porém não foram valores significativos. O gráfico da Figura 4.17 apresentou valores similares ao caso 1, mostrado na Figura 4.14.

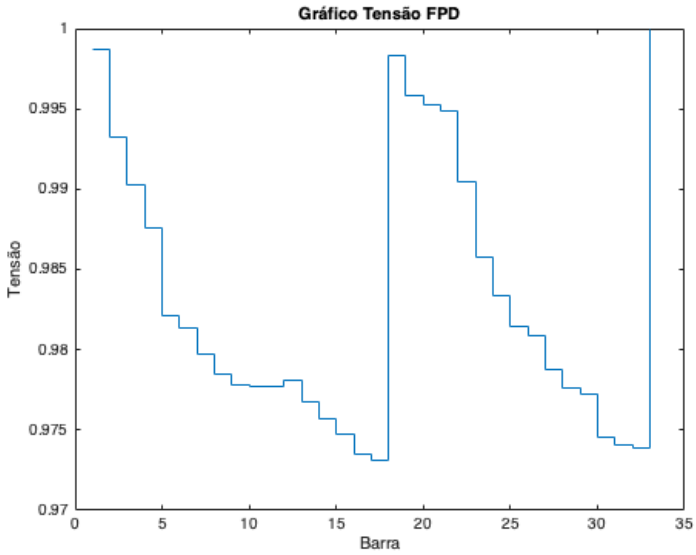


Figura 4.15: Tensões do FPOD - Caso 02 - Sistema 33 Barras.

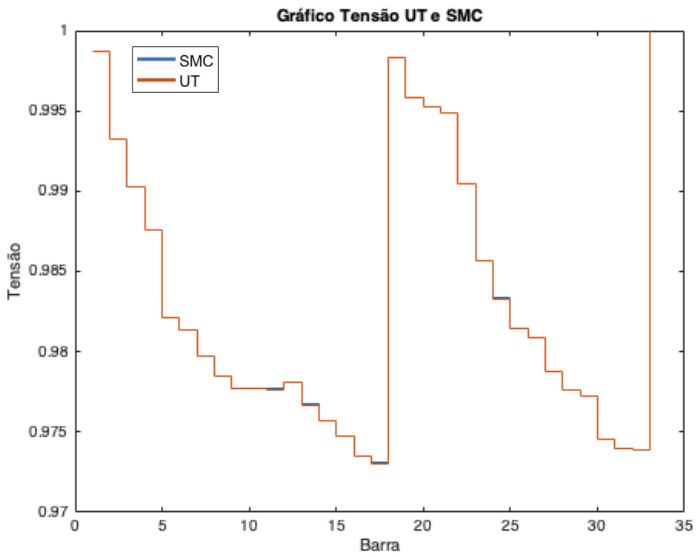


Figura 4.16: Valor Médio das Tensões FPOP - Caso 02 - Sistema 33 Barras.

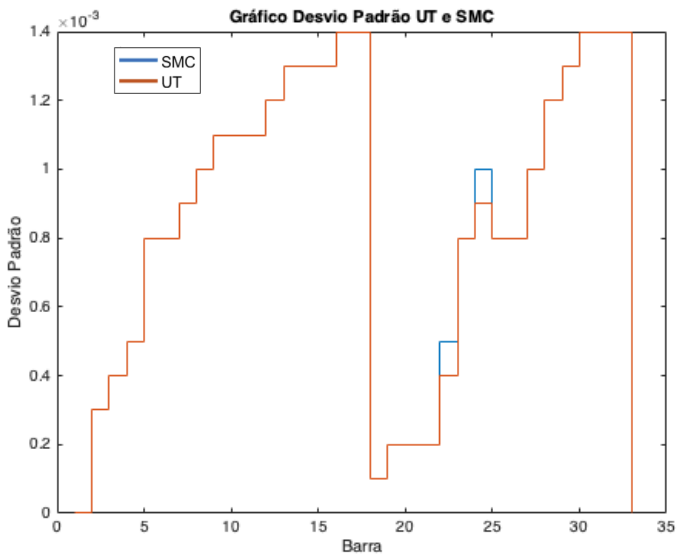


Figura 4.17: Desvio Padrão das Tensões FPOP - Caso 02 - Sistema 33 Barras.

### 4.4.4 Caso 3: Sistema com Geração Distribuída Otimizada

A Tabela 4.12 apresenta os resultados da simulação do FPO determinístico e probabilístico, via UT e SMC, para o caso 3, ou seja, utlizando GDs variáveis de 0 a 2,5 pu. Analisando os dados pode-se notar que a potência gerada pela barra de referência diminuiu significantemente, e este valor foi complementado pelas GDs proporcionalmente.

Tabela 4.12: Solução do FPOP do Sistema 33 Barras para o Caso 3: Potência (pu)

| **Barra** | **FPOD** | **FPOP UT** | | **FPOP SMC** | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Média** | **Desvio** | **Média** | **Desvio** |
| **2** | 1,6194 | 1,6157 | 0,0618 | 1,6114 | 0,0598 |
| **12** | 0,7495 | 0,7501 | 0,0224 | 0,7509 | 0,0222 |
| **29** | 0,9836 | 0,9841 | 0,0365 | 0,9846 | 0,0362 |
| **33** | 0,3772 | 0,38 | 0,0169 | 0,383 | 0,0185 |

Os gráficos das Figuras 4.18 e 4.19 mostram que os valores de tensão nas barras que possuem GDs aumentaram se aproximando do valor de 1 pu, principalmente nas barras onde foram alocadas as GDs.

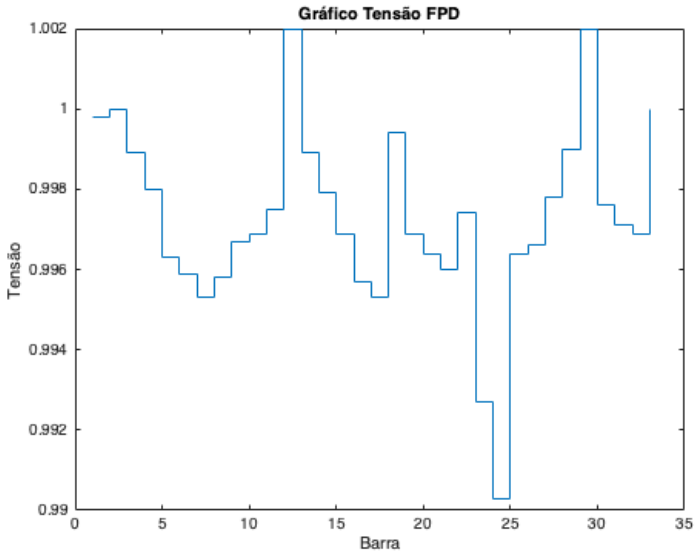


Figura 4.18: Tensões do FPOD - Caso 03 - Sistema 33 Barras.

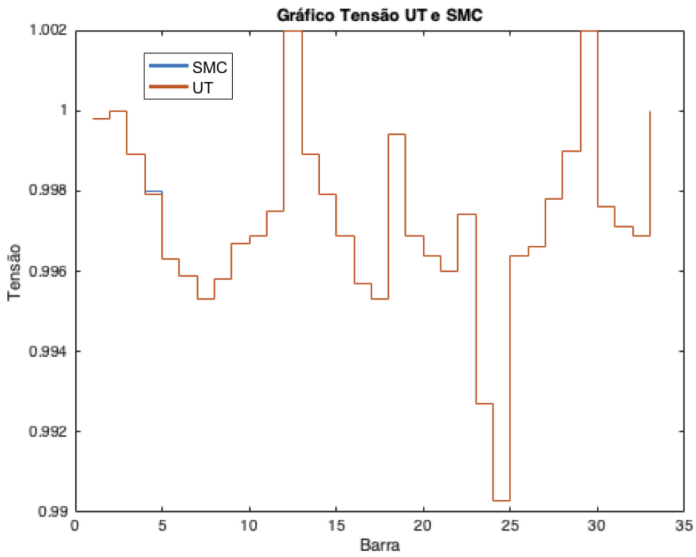


Figura 4.19: Valor Médio das Tensões FPOP - Caso 03 - Sistema 33 Barras.

O gráfico da Figura 4.20 apresenta os valores de desvio padrão das tensões nas barras do sistema para as metodologias UT e SMC, que apresentam valores similares.

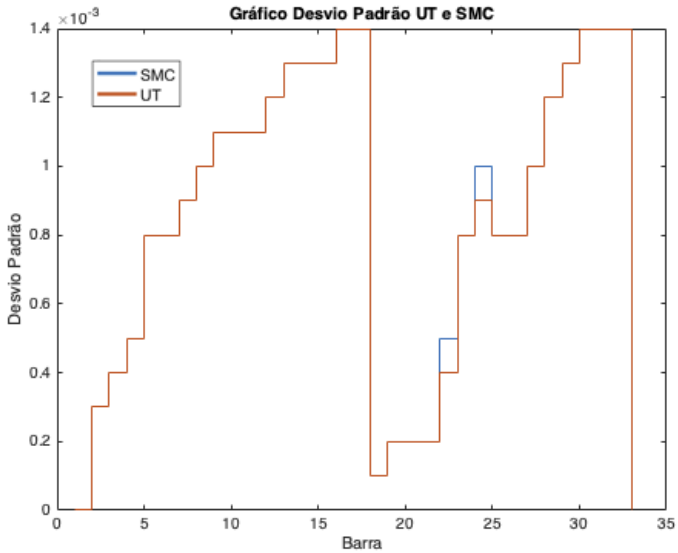


Figura 4.20: Desvio Padrão das Tensões FPOP - Caso 03 - Sistema 33 Barras.

### 4.4.5 Estudo comparativo dos Valores de Perdas e de Tempo Computacional para o Sistema de 33 barras

A Tabela 4.13 apresenta o comportamento das perdas. Considerando os três primeiros valores (FPD e FPOP via UT e SMC), observa-se que a modelagem probabilística das cargas implica no aumento do valor das perdas, embora um dos valores seja determinístico e os outros a média. Ao se executar o FPOP proposto, os valores das perdas são reduzidos de forma significativa (tanto o valor médio quanto o valor do desvio padrão), mostrando a efetividade da metodologia proposta. Ademais, observa-se a proximidade dos valores fornecidos pela UT e pela SMC.

Tabela 4.13: Resultados das Perdas do Sistema de 33 Barras

| | SIMULAÇÃO | PERDAS (PU) | | PERDAS (KW) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Média** | **Desvio** | **Média** | **Desvio** |
| **Caso 1** | FPD | 0,1293 | - | 129,2587 | - |
| | FPP UT | 0,1294 | 0,0061 | 129,4341 | 6,0899 |
| | FPP SMC | 0,1294 | 0,0061 | 129,4112 | 6,0694 |
| **Caso 2** | FPOD | 0,0395 | - | 39,4524 | - |
| | FPOP UT | 0,0398 | 0,0048 | 39,8329 | 4,8233 |
| | FPOP SMC | 0,0397 | 0,0034 | 39,7176 | 3,3872 |
| **Caso 3** | FPOD | 0,0148 | - | 14,7879 | - |
| | FPOP UT | 0,0149 | 0,0011 | 14,8516 | 1,1391 |
| | FPOP SMC | 0,0149 | 0,0011 | 14,8511 | 1,1127 |

Os tempos computacionais apresentados na Tabela 4.14 confirmam dois pontos interessantes. O primeiro é a eficiência da técnica UT quando comparada com a SMC, devido ao número reduzido de amostras da primeira. Em segundo lugar, observa-se que o FPOP consome um tempo substancialmente maior quando se usa a SMC, justificando a utilização da UT.

Tabela 4.14: Resultados do Tempo Computacional do Sistema de 33 Barras

| | SIMULAÇÃO | TEMPO (MIN) |
|---|---|---|
| **Caso 1** | FPP UT | 0,0908 |
| | FPP SMC | 9,5572 |
| **Caso 2** | FPOP UT | 0,3692 |
| | FPOP SMC | 22,343 |
| **Caso 3** | FPOP UT | 0,9692 |
| | FPOP SMC | 56,9902 |

Para efeitos de ilustração, as Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 apresentam o histograma das perdas totais nos casos 1, 2 e 3. Em todos os casos, observa-se que as formas dos histogramas obtidos se assemelham ao esperado em uma distribuição normal. Verifica-se que o uso de GD mesmo que de forma fixa permite uma redução significativa nas perdas, que pode ser visualizado como uma redução significativa do valor médio das perdas ocorrida entre as figuras 4.21 e 4.22. Com

a introdução da otimização (despacho de GDs), tem-se também uma redução importante nas perdas, comportamento evidenciado ao comparar as Figuras 4.22 e 4.23, em que o valor médio de perda é reduzido, bem como a ocorrência de valores extremos de perda. Confirma-se, assim, o impacto positivo das unidades de geração distribuída na redução de perdas (tanto na redução das médias quanto do desvio padrão, que quantifica a incerteza).

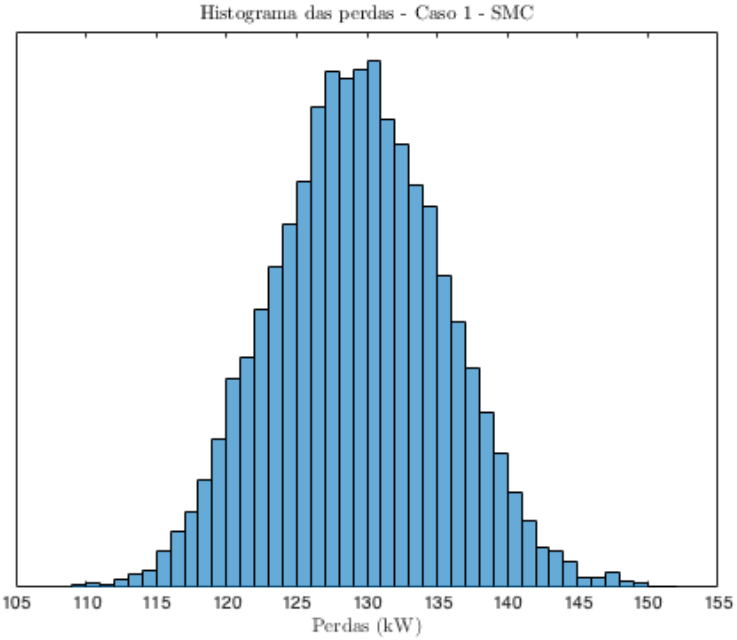


Figura 4.21: Histograma das perdas totais - Caso 1

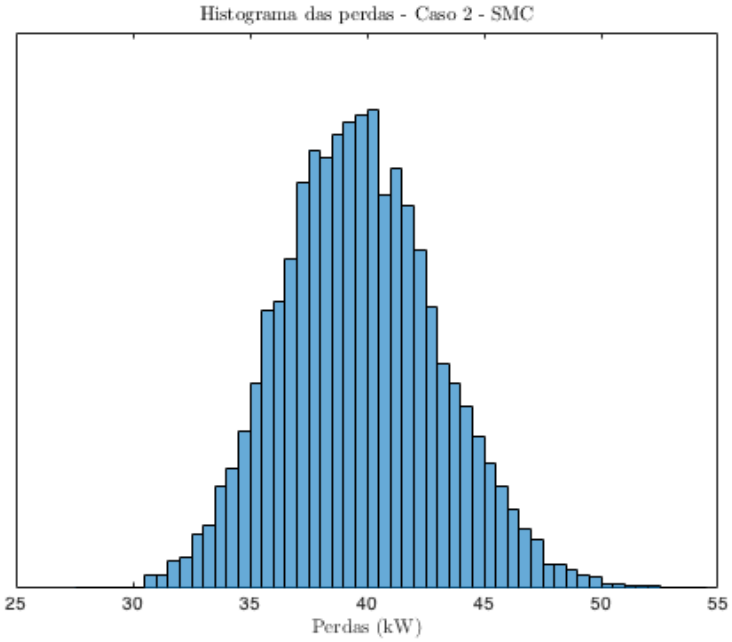


Figura 4.22: Histograma das perdas totais - Caso 2

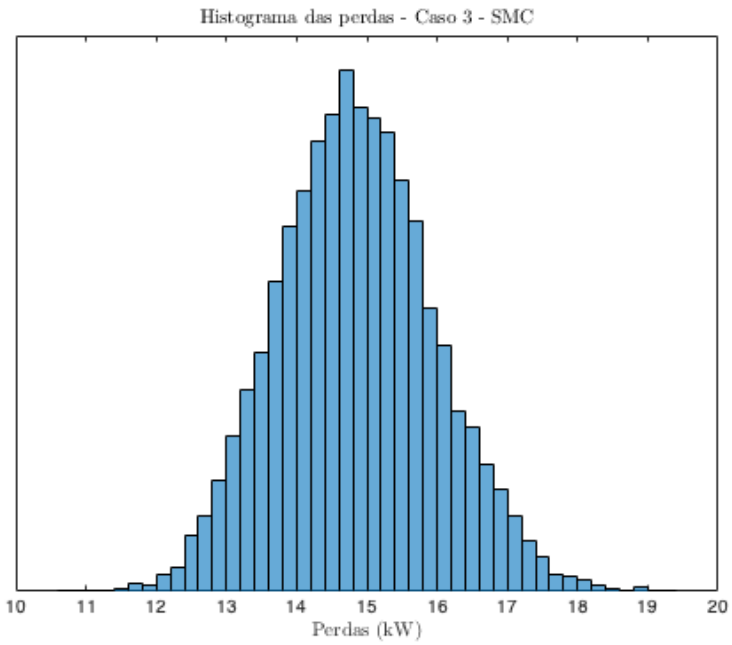


Figura 4.23: Histograma das perdas totais - Caso 3

## 4.5 Sistema 33 Barras com Curva de Carga

### 4.5.1 Descrição do Caso

A presente seção apresenta um estudo de caso para uma MG-CC obtida da literatura com 33 barras e três unidades de geração distribuída despacháveis (conectadas ao sistema por meio de conversores CA/CC), conforme ilustrado na Figura 4.11. Os dados foram obtidos de [26] anulando as reatâncias bem como a parcela reativa das cargas, conforme adotado por [27]. A carga nominal no ponto de operação base é de 3,7150 MW. Os dados utilizados para as simulações horárias estão representados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Cargas Horárias (pu)

| **Hora** | **Carga** | **Hora** | **Carga** | **Hora** | **Carga** |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0,8708 | 8 | 0,8321 | 16 | 0,9796 |
| 1 | 0,8227 | 9 | 0,8418 | 17 | 10.069 |
| 2 | 0,8092 | 10 | 0,8794 | 18 | 0,9264 |
| 3 | 0,8012 | 11 | 0,8872 | 19 | 0,9107 |
| 4 | 0,7963 | 12 | 0,867 | 20 | 0,8545 |
| 5 | 0,8049 | 13 | 0,8626 | 21 | 0,8636 |
| 6 | 0,8207 | 14 | 0,8438 | 22 | 0,8819 |
| 7 | 0,8186 | 15 | 0,9326 | 23 | 0,8578 |

A curva de carga considerada é ilustrada na Figura 4.24 e três casos são estudados. No primeiro, as cargas são alimentadas pelo sistema principal e não se considera a presença de unidades de geração distribuída despacháveis. O segundo caso considera três unidades desse tipo nas barras 2, 12 e 29 (não despacháveis). Em todos os casos, os limites mínimo e máximo de tensão são de 0,95 a 1,05 pu. No terceiro caso, considera-se que as unidades de geração distribuída possuem limites de 0 a 2,5 pu.

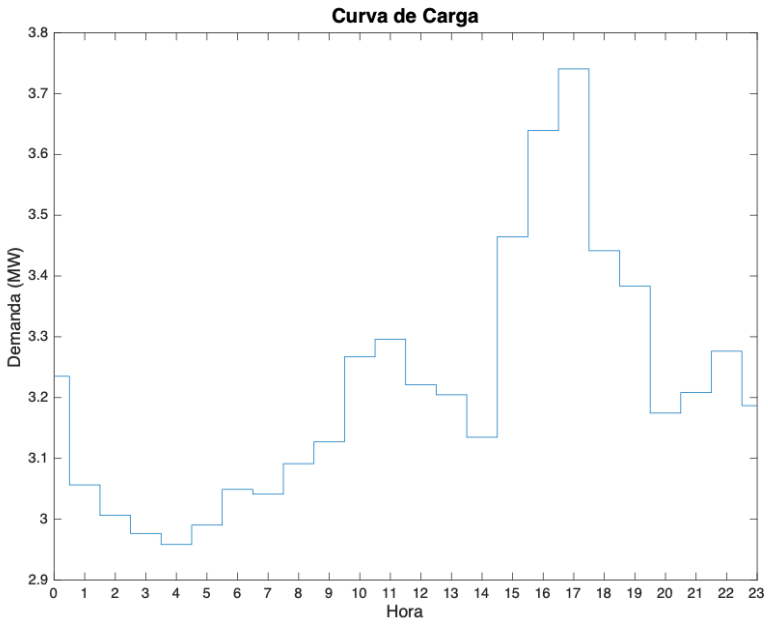


Figura 4.24: Curva de Carga.

### 4.5.2 Estudo Comparativo das Metodologias Aplicadas ao Problema Considerando Curva de Carga

Para ambos os casos executa-se a metodologia proposta considerando incertezas nas cargas seguindo a distribuição normal padrão, adotando o valor nominal como média e um desvio padrão de 10% da média. Na presença de 33 valores de carga (33 barras), o número de amostras para solução do fluxo de potência horário via a Transformação *Unscented* é de $2nb + 1 = 2 \times 33 + 1 = 67$ amostras por hora. Considerando 24 horas, o número de simulações do fluxo de potência determinístico é, então, de $24 \times 67 = 1608$. Para a Simulação Monte Carlo, conforme adotado por [12], consideram-se 1000 amostras, que vão requerer um total de $24 \times 1000 = 24000$ soluções do fluxo de potência ótimo determinístico para minimização de perdas.

As análises que serão realizadas neste estudo consistem na validação dos resultados obtidos pela metodologia proposta utilizando perdas horárias para ambos os casos UT e SMC nos casos 1, 2 e 3.

### 4.5.3 Caso 1: Sistema sem Geração Distribuída

Conforme ilustrado na Figura 4.25, observa-se que os valores médios das perdas totais horárias são coerentes entre as metodologias UT e SMC. O mesmo é observado para os valores de desvio padrão, conforme ilustrado na Figura 4.26.

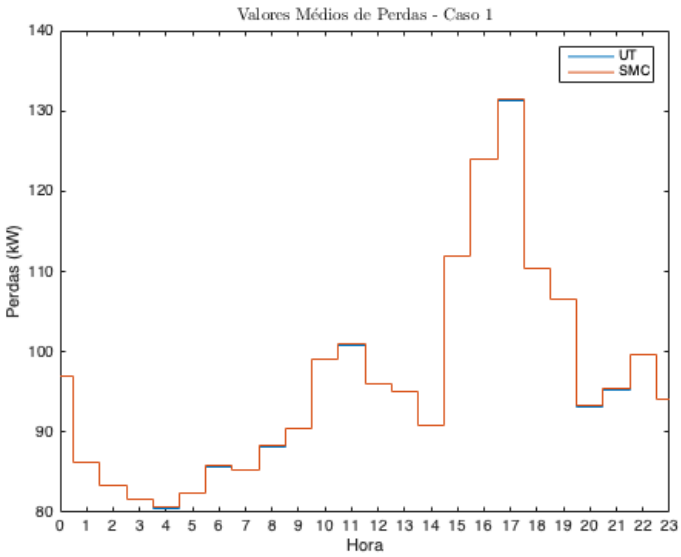


Figura 4.25: Valores Médios do Caso 1.

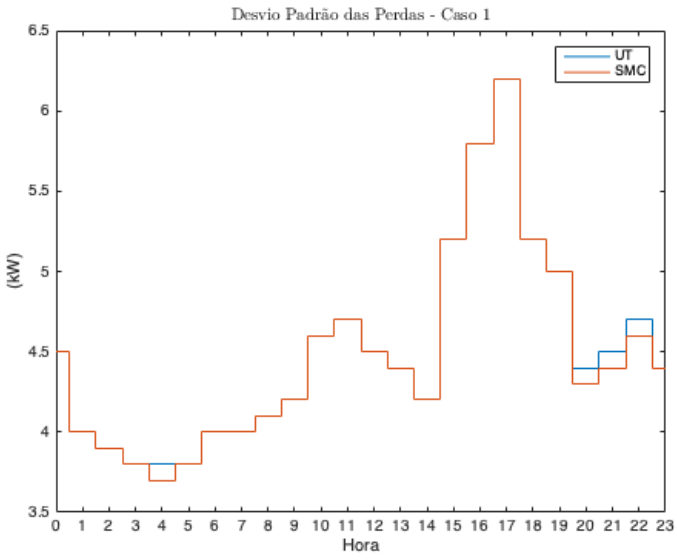


Figura 4.26: Desvios Padrão do Caso 1.

### 4.5.4 Caso 2: Sistema com Geração Distribuída Fixa

Ao considerar a geração distribuída fixa (não despachável), obtêm-se os valores médios e de desvio padrão das perdas mostrados, respectivamente, na Figura 4.27 e na Figura 4.28.

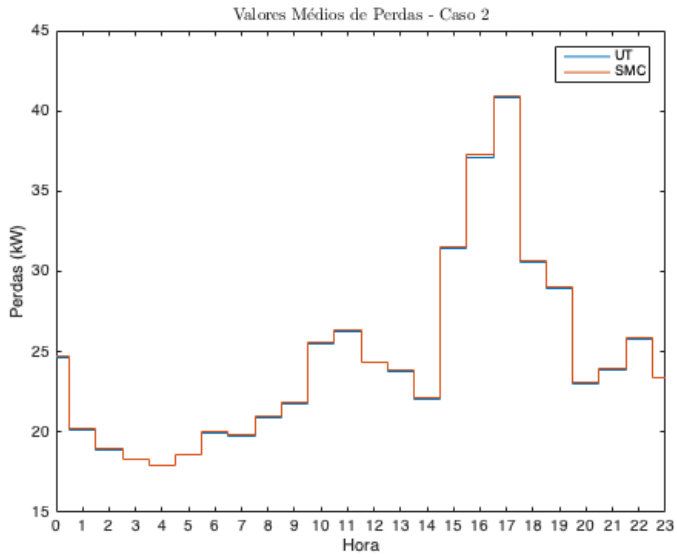


Figura 4.27: Gráfico das Médias do Caso 2.

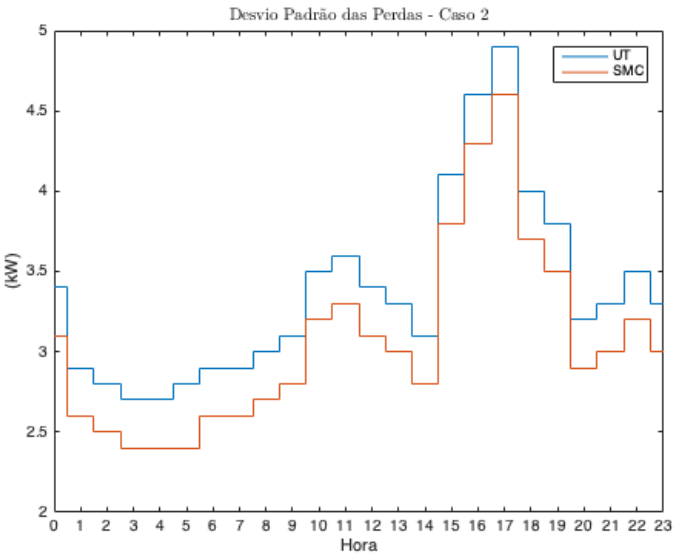


Figura 4.28: Gráfico do Desvio Padrão do Caso 2.

Com relação às simulações probabilísticas via UT e SMC, houve bastante semelhança nos valores médios totais de perdas horárias, enquanto que a metodologia SMC apresentou menores valores de desvio padrão. Ressalta-se que os resultados apresentados de SMC são obtidos para um número específico de amostras. Uma maior quantidade de amostras (na SMC) pode aproximar os resultados obtidos. Ademais cita-se que o fator de calibração $\kappa$ em (3.16) pode ser usado para aproximar os valores UT dos da SMC. Por fim, ressalta-se que a proximidade da média e ligeira diferença entre os desvios padrão obtidos pela UT e SMC também foi observado na literatura [11, 12, 14, 23].

### 4.5.5 Caso 3: Sistema com Geração Distribuída Otimizada

O gráfico da Figura 4.29 representa os valores médios das perdas horárias ao fazer a otimização da alocação dos recursos de geração distribuída, enquanto que a Figura 4.30 apresenta os valores de desvio padrão.

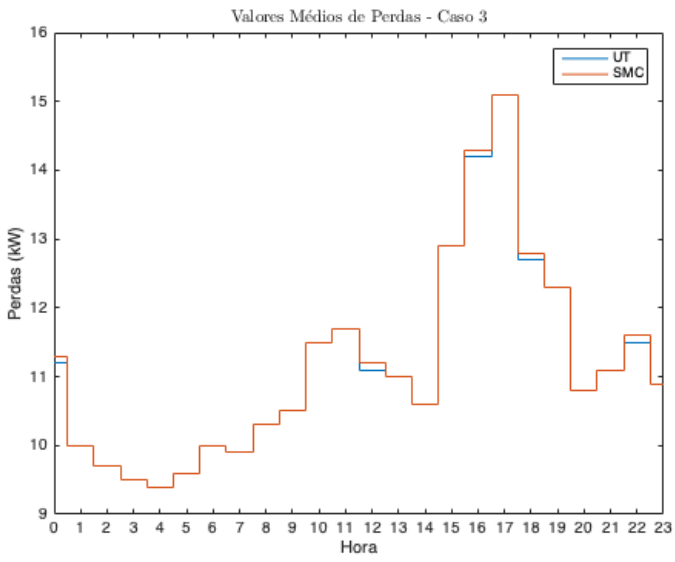


Figura 4.29: Gráfico das Médias do Caso 3.

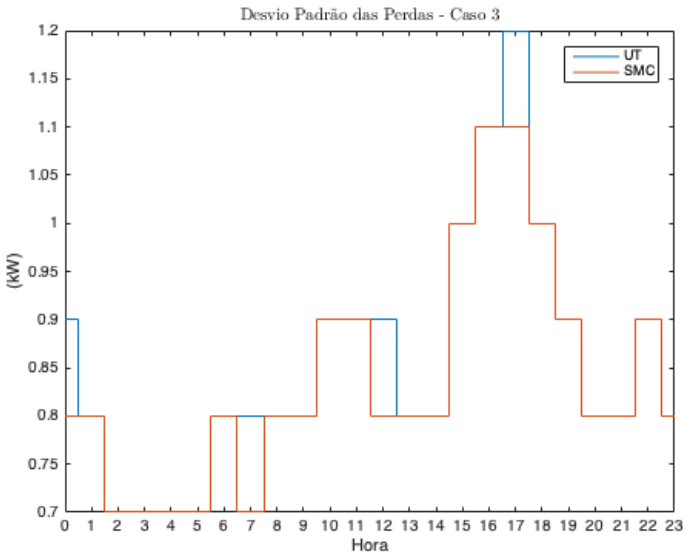


Figura 4.30: Gráfico do Desvio Padrão do Caso 3.

### 4.5.6 Comparativo entre os Casos para UT e SMC

Para verificar o impacto da consideração da GD no problema horário, apresentam-se comparações para cada método UT e SMC simulados para os casos 1, 2 e 3.

A Figura 4.31 apresenta os valores médios de perdas entre os casos 1, 2 e 3 obtidos pela metodologia UT. Ao otimizar o despacho da geração distribuída, observa-se considerável redução nas perdas horárias. Além disto, as perdas horárias obtidas no caso 3 possuem menor variação ao longo do dia, o que é uma característica positiva dado que nos momentos de pico a redução

nos valores de perdas são ainda maiores.

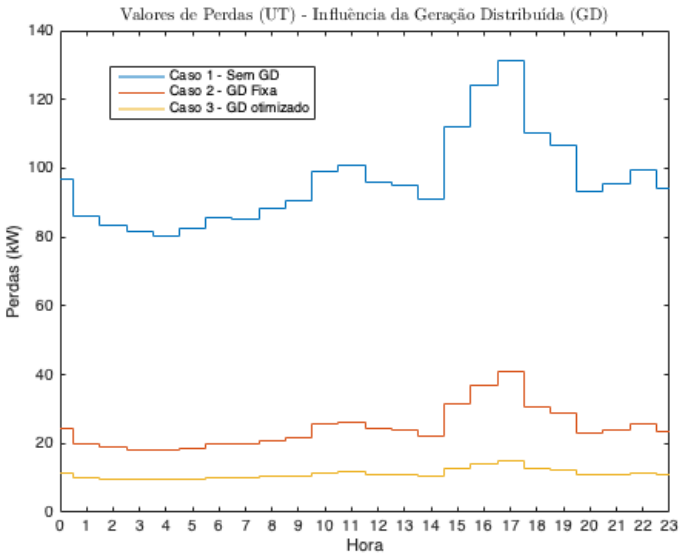


Figura 4.31: Valores Médios das Perdas nos Casos 1, 2 e 3 (UT).

A análise quando realizada para o método SMC apresenta basicamente as mesmas características do que as apontadas anteriormente, como pode ser observado na Figura 4.32. As diferenças marcantes nos tempos computacionais são apresentadas na próxima seção.

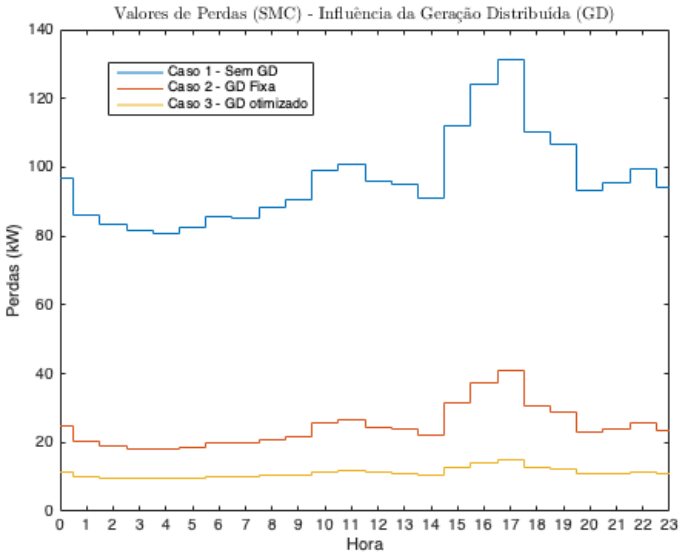


Figura 4.32: Valores Médios das Perdas nos Casos 1, 2 e 3 (SMC).

### 4.5.7 Comparativo do Tempo Computacional

Os tempos computacionais dispendidos em cada simulação da seção 4.5.6 são apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Tempos computacionais para o uso da curva de carga

| | **Simulação** | **Tempo** |
|---|---|---|
| Caso 1 | UT | 2,4 minutos |
| | SMC | 18,6 minutos |
| Caso 2 | UT | 4,2 minutos |
| | SMC | 35,1 minutos |
| Caso 3 | UT | 17,3 minutos |
| | SMC | 2,15 horas |

Dada a proximidade das soluções obtidas pelos métodos UT e SMC, tem-se que a eficiência computacional do método UT é bastante destacável perante a do método SMC. Assim, evidencia-se que a Transformação *Unscented* é capaz de fornecer resultados acurados em um tempo computacional reduzido, sendo seu uso de grande importância para análises de planejamento sob incertezas.

## 4.6 Considerações Finais

Essa seção apresentou os resultados obtidos com as metodologias propostas baseadas na Transformação Unscented, onde pode-se observar a acurácia e o ganho computacional desta técnica em relação à Simulação Monte Carlo.

CAPÍTULO 5

# Conclusões

## 5.1 Conclusões Finais

No presente trabalho apresentaram-se metodologias de Fluxo de Potência Probabilístico e de Fluxo de Potência Ótimo Probabilístico para a minimização de perdas em Microrredes de Corrente Contínua. A incerteza da carga foi modelada a partir da Distribuição Normal e a Transformação *Unscented* foi utilizada para a solução das abordagens propostas (principal contribuição). Os resultados foram obtidos para microrredes de 10 e 33 barras e validados com uma metodologia baseada na Simulação Monte Carlo. Posteriormente, utilizou-se uma curva de carga para solução de um fluxo de potência ótimo probabilístico para o sistema de 33 barras.

Com base nos resultados obtidos, observou-se a melhoria do perfil de tensão e a redução de perdas a partir do despacho de unidades de geração distribuída, além de uma redução expressiva do tempo computacional ao se empregar a Transformação *Unscented*. Se por um lado a redução do tempo computacional é uma vantagem da metodologia proposta, é importante citar que erros na estimação do desvio padrão das perdas serão maiores diante de maiores níveis de incerteza nas cargas (o que é considerado como uma desvantagem da metodologia proposta).

A metodologia de fluxo de potência ótimo probabilístico horário utilizando a Transformação *Unscented* para microrredes em corrente contínua alcançou ganhos computacionais da ordem de 86% quando comparada com a Simulação Monte Carlo.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Ao considerar a incerteza nas cargas e calcular a média e desvio padrão das perdas de potência, a metodologia fornece indicativos importantes, haja vista que tais perdas representam um prejuízo econômico para as distribuidoras e consumidores. Desta forma, consegue-se estimar probabilisticamente o custo das perdas (o que sugere-se para estudos futuros). Ademais, a programação dos sistemas de armazenamento de energia por meio de baterias também é sugerido como proposta de continuidade.

# Referências Bibliográficas


[1] 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, 5 2006.

[2] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, e J.-W. Jung, "Ac-microgrids versus dc-microgrids with distributed energy resources: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, p. 387–405, Aug. 2013. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.067

[3] E. Planas, J. Andreu, J. I. Gárate, I. Martínez de Alegría, e E. Ibarra, "Ac and dc technology in microgrids: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, p. 726–749, Mar. 2015. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.067

[4] O. Montoya Giraldo, L. Grisales-Noreña, D. Gonzalez Montoya, C. Ramos-Paja, e A. Garces, "Linear power flow formulation for low-voltage dc power grids," *Electric Power Systems Research*, vol. 163, pp. 375–381, 07 2018.

[5] O. D. Montoya, V. M. Garrido, W. Gil-Gonzalez, e L. F. Grisales-Norena, "Power Flow Analysis in DC Grids: Two Alternative Numerical Methods," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 66, no. 11, 2019.

[6] O. D. Montoya, W. Gil-González, e A. Garces, "Sequential quadratic programming models for solving the opf problem in dc grids," *Electric Power Systems Research*, vol. 169, pp. 18–23, 2019.

[7] O. D. Montoya, W. Gil-Gonzalez, e A. Garces, “Optimal Power Flow on DC Microgrids: A Quadratic Convex Approximation,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 66, no. 6, 2019.

[8] B. Borkowska, “Probabilistic load flow,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-93, no. 3, pp. 752–759, 1974.

[9] B. W. Tuinema, J. L. Rueda Torres, A. I. Stefanov, F. M. Gonzalez-Longatt, e M. A. M. M. van der Meijden, *Probabilistic Reliability Analysis of Power Systems*, 2020.

[10] 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.

[11] S. J. Julier e J. K. Uhlmann, “Unscented filtering and nonlinear estimation,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 3, pp. 401–422, 2004.

[12] 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.

[13] 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, 10 2018, pp. 1–6.

[14] W. Peres, “Probabilistic optimal power flow for balanced islanded microgrids,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 21, no. 1, pp. 167–174, 2023.

[15] M. Uddin, H. Mo, D. Dong, S. Elsawah, J. Zhu, e J. M. Guerrero, “Microgrids: A review, outstanding issues and future trends,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 49, p. 101127, Sep. 2023. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2023.101127

[16] 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, G. A. Jiménez-Estévez, e N. D. Hatziargyriou, “Trends in microgrid control,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, 2014.

[17] 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 amp; Energy Systems*, vol. 109, p. 160–186, Jul. 2019. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.01.038

[18] A. Schellenberg, W. Rosehart, e J. Aguado, "Cumulant-based probabilistic optimal power flow (p-opf) with gaussian and gamma distributions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, pp. 773–781, 5 2005.

[19] H. P. Hong, "An efficient point estimate method for probabilistic analysis," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 59, pp. 261–267, 1998.

[20] V. Singh, T. Moger, e D. Jena, "Uncertainty handling techniques in power systems: A critical review," *Electric Power Systems Research*, vol. 203, p. 107633, Feb. 2022. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107633

[21] R. L. Harrison, C. Granja, e C. Leroy, "Introduction to monte carlo simulation," in *AIP Conference Proceedings*. AIP, 2010. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1063/1.3295638

[22] M. Abdelaziz, "Gpu-opencl accelerated probabilistic power flow analysis using monte-carlo simulation," *Electric Power Systems Research*, vol. 147, p. 70–72, Jun. 2017. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2017.02.022

[23] W. Peres, "A probabilistic load flow for unbalanced three-phase islanded microgrids using Unscented Transformation," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 155, p. 109554, 1 2024. [Online]. Available: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142061523006117

[24] G. Valverde e V. Terzija, "Unscented kalman filter for power system dynamic state estimation," *IET generation, transmission & distribution*, vol. 5, no. 1, pp. 29–37, 2011.

[25] B. Stott, "Review of load-flow calculation methods," 1974. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:62733030

[26] M. Baran e 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, 4 1989.

[27] O. D. Montoya, Medina-Quesada, e W. Gil-González, “Solving the Power Flow Problem in Bipolar DC Asymmetric Distribution Networks Using Broyden’s Method,” *Sensors*, vol. 23, no. 15, p. 6704, 7 2023.