

Fluxo de Potência Probabilístico para Avaliação da Qualidade de Energia de Microrredes em Operação Ilhada

Elton Amorim Chagas¹, Anselmo Barbosa Rodrigues², Maria da Guia da Silva³

Laboratório de Confiabilidade e Qualidade, PPGEE, UFMA, São Luís, MA, Brasil

1-elton.chagas@outlook.com, 2-anselmo.ufma@gmail.com, 3-guia@dee.ufma.br

Resumo — Este artigo apresenta uma nova abordagem para o cálculo de índices de qualidade de energia para uma microrrede operando no modo ilhado. Os índices são estimados considerando-se incertezas associadas com: erros de previsão de carga, falhas nos geradores e variações na potência de saída de geradores renováveis. Essas incertezas foram modeladas através da combinação das seguintes técnicas: fluxo de potência com barra de folga distribuída, estimação por pontos e teoria de misturas gaussianas. A combinação das técnicas foi usada para gerar índices probabilísticos relacionados com a frequência e as tensões na microrrede, por exemplo: distribuições de probabilidade cumulativas das tensões e da frequência, probabilidades de perda de carga parcial e total devido a desvios de frequência e tensão. A identificação das barras mais vulneráveis a problemas de tensão foi realizada. O método analítico proposto permitiu obter uma redução significativa no custo computacional da análise de qualidade de energia da microrrede em comparação com a Simulação Monte Carlo.

Palavras-chaves — Fluxo de Potência Probabilístico, Mistura Gaussiana, Qualidade de energia, Confiabilidade, Microrredes.

I. INTRODUÇÃO

O estudo de microrredes tem se tornado uma importante área de pesquisa com o advento das redes elétricas inteligentes, pois a microrrede é um catalizador para alcançar diversas metas associadas com as redes elétricas inteligentes, por exemplo: melhoria na confiabilidade e qualidade, redução de perdas, conexão de geração distribuída renovável (em especial, eólica e solar), etc. [1].

A conexão de geradores distribuídos próximos aos consumidores permite que, na ocorrência de um evento de falha na rede elétrica da concessionária (chamada de rede hospedeira), uma área da rede de distribuição continue operando de forma ilhada. Isto é, sem conexão com a rede hospedeira em falha [1], [2]. Entretanto, para que essa forma de operação seja viável do ponto de vista da qualidade de energia e da adequação, faz-se necessário um estudo dos desvios nas tensões e na frequência da microrrede no modo de operação ilhado.

Neste artigo, essa análise é realizada através de um fluxo de potência com barra de folga distribuída, ou seja, o conceito de barra de balanço não existe [2], [3]. Em outras palavras, a carga é distribuída entre os geradores da microrrede de acordo com suas características estáticas, o que é mais adequado à realidade operativa das microrredes.

Os desvios nas tensões e na frequência da microrrede são de natureza aleatória devido às incertezas na carga e na geração da microrrede. A técnica mais usada para modelar estas incertezas é Fluxo de Potência Probabilístico (FPP). No âmbito das microrredes, o FPP tem sido usado para avaliar o impacto da operação ilhada nos índices de confiabilidade da rede de distribuição [3]. Nesta avaliação o FPP é resolvido usando-se a Simulação Monte Carlo (SMC). A escolha da SMC é devido a sua flexibilidade para incluir diversos aspectos complexos da operação das microrredes na estimação dos índices de confiabilidade. A SMC consiste basicamente em gerar uma amostra aleatória de estados do sistema a partir das distribuições de probabilidade que representam as incertezas [8]. Em seguida, os índices probabilísticos são estimados calculando-se estatísticas para a amostra de estados do sistema. A principal desvantagem da SMC é o alto custo computacional para estimar os índices probabilísticos com uma precisão especificada. Em outras palavras, os índices probabilísticos são estimados indiretamente a partir dos estados do sistema resultantes das incertezas com base em estatísticas amostrais, tais como: média, desvio padrão, distribuições de probabilidade, etc.

É importante mencionar que em sistemas de transmissão o FPP pode ser resolvido usando-se métodos analíticos [4]. Nestes métodos, o sistema é representado matematicamente através de fórmulas analíticas fechadas que são usadas para se obter as distribuições de probabilidade das variáveis de saída a partir das distribuições de probabilidade das variáveis de entrada. A principal vantagem dos métodos analíticos com relação à SMC é seu baixo custo computacional, pois eles não se baseiam na seleção aleatória de estados do sistema. As técnicas analíticas não têm sido aplicadas ao problema de FPP em microrredes por causa da complexidade da sua formulação. Esta complexidade é devido ao conceito de barra de folga distribuída.

O principal objetivo deste artigo é aplicar métodos analíticos para realizar uma análise integrada de índices de qualidade e adequação em uma microrrede operando no modo ilhado. O método analítico selecionado para esta

análise foi a estimação por pontos [5], [6]. Este método foi usado para modelar incertezas relacionadas com: intermitência da geração distribuída renovável, indisponibilidade dos geradores e erros de previsão de carga. A metodologia proposta foi testada e validada usando a microrrede de 33 barras proposta em [2]. Os resultados dos testes demonstraram que a estimação por pontos tem precisão comparável a SMC, mas o seu custo computacional é cerca de 477 vezes menor do que o da SMC. A técnica proposta é capaz de identificar precisamente as barras da rede mais susceptíveis a problemas de violações de tensão. Finalmente, foi identificado que as incertezas intrínsecas a microrrede produzem variações significativas na frequência. Essas variações podem causar eventos de perda de carga total na microrrede devido à atuação da proteção de frequência dos geradores distribuídos.

II. FLUXO DE POTÊNCIA COM BARRA DE FOLGA DISTRIBUÍDA EM UMA MICRORREDE ILHADA

O controle “droop” ou primário da microrrede tem como objetivo evitar desvios excessivos nas tensões e na frequência da microrrede com relação aos valores especificados para estes parâmetros. O controle primário tem uma resposta rápida (poucos segundos) e é realizado pelos controladores locais da microrrede [1], [2]. No controle primário, as potências ativas e reativas de cada gerador, bem como a frequência do sistema passam a ser variáveis do problema [2], [3]. Dessa forma, o conjunto de equações a ser usado no modelo de fluxo de potência com barra de folga distribuída para fins de controle primário é dado em (1)-(5).

$$\Delta P_k = [Pg_k - P_k^L(V_k, f)] - P_k(V, \theta) \quad (1)$$

$$\Delta Q_k = [Qg_k - Q_k^L(V_k, f)] - Q_k(V, \theta) \quad (2)$$

$$\Delta X_i = \frac{1}{K_i^P} (f^{esp} - f) + [Pg_i^{esp} - Pg_i] \quad (3)$$

$$\Delta Y_i = \frac{1}{K_i^Q} (V_i^{esp} - V_i) + [Qg_i^{esp} - Qg_i] \quad (4)$$

$$\Delta Z_s = \theta_s^{esp} - \theta_s \quad (5)$$

Onde: Pg_k e (Qg_k) é a geração de potência ativa (reativa) calculada na barra k ; $P_k^L(V_k, f)$ $(Q_k^L(V_k, f))$ é a carga ativa (reativa) na barra k , em função da frequência f e da magnitude da tensão na barra k (V_k) , definida de acordo com o modelo de [2]; $P_k(V, \theta)$ $(Q_k(V, \theta))$ é o valor calculado da potência ativa (reativa) injetada na rede pela barra k ; Pg_i^{esp} (Qg_i^{esp}) é o valor especificado da geração de potência ativa (reativa) associado com o gerador i ; K_i^P e K_i^Q são os coeficientes “droop” para o gerador i ; θ_s^{esp} é o valor especificado do ângulo da tensão na barra de referência s (θ_s) ; f^{esp} é o valor especificado para a frequência do sistema f e V (θ) é o vetor do módulo (fase) das tensões nodais.

A equação (5) define à referência angular do sistema. O sistema linearizado resolvido iterativamente via método de Newton-Raphson é dado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V} & \frac{\partial \Delta P}{\partial Pg} & \frac{\partial \Delta P}{\partial Qg} & \frac{\partial \Delta P}{\partial f} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial Pg} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial Qg} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial f} \\ \frac{\partial \Delta X}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta X}{\partial V} & \frac{\partial \Delta X}{\partial Pg} & \frac{\partial \Delta X}{\partial Qg} & \frac{\partial \Delta X}{\partial f} \\ \frac{\partial \Delta Y}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Y}{\partial V} & \frac{\partial \Delta Y}{\partial Pg} & \frac{\partial \Delta Y}{\partial Qg} & \frac{\partial \Delta Y}{\partial f} \\ \frac{\partial \Delta Z}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Z}{\partial V} & \frac{\partial \Delta Z}{\partial Pg} & \frac{\partial \Delta Z}{\partial Qg} & \frac{\partial \Delta Z}{\partial f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta Pg \\ \Delta Qg \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (6)$$

No qual Δf equivale à variação de frequência que é experimentada pelo sistema, em função das variações de carga ou geração, dadas em ΔP e ΔQ [2], [3].

III. MODELO PROBABILÍSTICO DAS INCERTEZAS DA MICRORREDE

Conforme dito na Seção I, o FPP permite que se obtenha as distribuições de probabilidade das variáveis de estado da microrrede em função das incertezas na carga e na geração. Nesta seção, são apresentados os modelos probabilísticos usados para representar as seguintes incertezas: erros de previsão de carga, falhas nos geradores e variações na potência de saída de geradores eólicos e fotovoltaicos.

As flutuações na carga para um ponto de operação da microrrede são causadas pelos erros de previsão de carga. Neste artigo, considera-se que o erro de previsão de carga é modelado através da distribuição normal. Dessa forma, o pico de carga da microrrede é dado por:

$$L_{pico} = \tilde{L}_{pico} + z \times \tilde{L}_{pico} \times (\tilde{\sigma}_{pico}/100) \quad (7)$$

Na qual L_{pico} é o pico de carga da microrrede, z é um número aleatório normalmente distribuído, $\tilde{L}_{pico}$ é valor previsto do pico de carga da microrrede e $\tilde{\sigma}_{pico}$ é o erro de previsão de carga expresso como um percentual de $\tilde{L}_{pico}$.

Os geradores a gás são modelados usando-se um modelo de dois estados: operação e falha. A probabilidade do estado de falha é obtida a partir da indisponibilidade do gerador (“FOR-Forced Outage Rate”) [3]. Desta forma, pode-se representar a probabilidade de falha de um grupo de geradores com Ng unidades através da distribuição binomial definida em (8).

$$\text{Prob}[k] = {}_{Ng}C_k (1 - \text{FOR})^k \text{FOR}^{Ng-k} \quad (8)$$

Na qual $\text{Prob}[k]$ é a probabilidade de haver k geradores em operação e ${}_{Ng}C_k$ é o número de combinações de k geradores selecionadas a partir Ng geradores.

A variabilidade na potência de saída de um gerador eólico é devido ao comportamento aleatório da velocidade do vento. Dados coletados em estações de medição anemométricas mostram que a distribuição de probabilidade que melhor descreve a velocidade do vento é a Weibull bivariada ou trivariada [3], [7]. A função densidade de probabilidade Weibull de três parâmetros é dada por:

$$f(v) = \left(\frac{\beta}{\alpha} \right) \left(\frac{v - \tau}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{v - \tau}{\alpha} \right)^{\beta}} \quad (9)$$

Na qual β é chamado de parâmetro de forma, α é chamado parâmetro de escala e τ é o parâmetro de localização.

A produção de energia em um painel fotovoltaico depende de diversos fatores, entre os quais: a área do painel, a irradiância da luz solar, a umidade do ar, a temperatura ambiente e a eficiência do painel. Desses fatores, a irradiância é o que possui a maior influência no nível de geração do painel [4]. Geralmente, a incerteza na irradiação solar em um gerador fotovoltaico é modelada através da distribuição beta definida em (10).

$$f(r) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \left(\frac{r}{r_{\max}} \right)^{a-1} \left(1 - \frac{r}{r_{\max}} \right)^{b-1} \quad (10)$$

Na qual: r é a irradiância solar, $r_{\max}$ é a irradiância solar máxima medida no período de coleta de dados e Γ é a função gama.

Os parâmetros a e b são definidos de acordo com (11) e (12).

$$a = \mu \left[\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2 - 1} \right] \quad (11)$$

$$b = (1-\mu) \left[\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2 - 1} \right] \quad (12)$$

Nas quais μ e σ são a média e o desvio padrão da distribuição gama da irradiância solar.

IV. PRÉ-DESPACHO DA MICRORREDE

No pré-despacho são definidos os valores especificados de potência de saída nos geradores Pg_i^{esp} e Qg_i^{esp} e tensão nas barras V_i^{esp} . Assim, o objetivo do pré-despacho é encontrar um ponto de operação de referência para a microrrede que minimize os custos de geração e também satisfaça as restrições operativas [3]. Esta tarefa pode ser realizada através da solução do seguinte problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) não-linear:

$$\text{Minimizar} \sum_{i \in \Omega_{GD}} Pg_i \times Cg_i \quad (13)$$

Sujeito a:

$$Pg_k - P_k^L(V_k) - P_k(V, \theta) = 0 \quad \forall k = 1, \dots, Nb \quad (14)$$

$$Qg_k - Q_k^L(V_k) - Q_k(V, \theta) = 0 \quad \forall k = 1, \dots, Nb \quad (15)$$

$$\theta_s^{esp} - \theta_s = 0 \quad (16)$$

$$Pg_i^{\min} \leq Pg_i \leq Pg_i^{\max} \quad \forall i \in \Omega_{GD} \quad (17)$$

$$Qg_i^{\min} \leq Qg_i \leq Qg_i^{\max} \quad \forall i \in \Omega_{GD} \quad (18)$$

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max} \quad \forall k = 1, \dots, Nb \quad (19)$$

Nas quais: Ω_{GD} é o conjunto de barras com geração distribuída; Cg_i é o custo de produção de energia para o gerador i ; Nb é o número de barras do sistema; $P_k^L(V_k)$ ($Q_k^L(V_k)$) é a carga ativa (reativa) na barra k como uma função de V_k ; s é o índice da barra de referência; $Pg_i^{\min}$ ($Qg_i^{\min}$) e $Pg_i^{\max}$ ($Qg_i^{\max}$) são os limites mínimo e máximo, respectivamente, para a potência ativa (reativa) no gerador distribuído i ; $V_k^{\min}$ e $V_k^{\max}$ são os limites inferior e superior, respectivamente, para V_k .

Os geradores eólicos e fotovoltaicos são considerados como não despacháveis no pré-despacho da microrrede devido à grande variabilidade na sua potência de saída. Desta forma, os geradores renováveis são modelados como cargas negativas cujos valores são iguais às suas respectivas potências médias geradas [3].

V. FLUXO DE POTÊNCIA PROBABILÍSTICO

Conforme mencionado na Seção I, há duas formas de solucionar o FPP em uma microrrede usando a modelagem de barra de folga distribuída: a SMC e os métodos analíticos. Nas subseções seguintes serão apresentadas as descrições destes dois métodos probabilísticos.

A. Simulação Monte Carlo Não Sequencial

As incertezas nos padrões de carga e geração de operação da microrrede podem ser modeladas através da SMC não-sequencial [8]. O algoritmo conceitual da SMC não-sequencial para análise de qualidade e adequação da microrrede é descrito abaixo:

- 1) Ler dados de entrada do sistema.
- 2) Estimar os parâmetros das distribuições de probabilidade usadas para modelar a velocidade do vento e a irradiação solar.
- 3) Realizar o pré-despacho da microrrede para determinar valores de referência para as tensões e potências de saída dos geradores distribuídos através da solução do FPO definido em (13)-(19).
- 4) Repetir os passos (5)-(12) para $i = 1, \dots, N^{sim}$ onde N^{sim} é o tamanho da amostra de estados do sistema.
- 5) Sortear o pico de carga da microrrede usando um gerador de números aleatórios com distribuição normal.
- 6) Sortear a irradiação solar usando um gerador de números aleatórios com distribuição beta.
- 7) Sortear a velocidade do vento usando um gerador de números aleatórios com distribuição Weibull.
- 8) Sortear o estado dos geradores usando um gerador com distribuição uniforme como:
 - 8.1) Gerar um número aleatório com distribuição uniforme Z^{uni} .
 - 8.2) Se $Z^{uni} > FOR$, então o gerador está no estado de operação, caso contrário ($Z^{uni} \leq FOR$), o gerador está no estado de falha.
- 9) Calcular a potência de saída de todos os geradores que estão no estado de operação.
- 10) Alocar o pico de carga do sistema sorteado entre as barras de carga usando fatores de participação.
- 11) Obter a solução do fluxo de potência com barra de folga distribuída, descrito na Seção II, usando o método de Newton-Raphson para obter as tensões e a frequência da microrrede.
- 12) Atualizar os índices de qualidade e adequação associados com violações de tensão e frequência.

B. Estimação por Pontos

A estimação por pontos é uma forma de se encontrar os momentos de uma variável aleatória Z que se relaciona com uma ou mais variáveis aleatórias p_i através de uma função F . Isso é feito usando-se as chamadas concentrações em K pontos por variável. Essas concentrações são obtidas através

dos momentos das variáveis aleatórias p_i . A k -ésima concentração $(p_{l,k}, w_{l,k})$ de uma variável aleatória p_l é definida como um par composto por um local $p_{l,k}$ e um peso $w_{l,k}$. O local $p_{l,k}$ é o k -ésimo valor da variável p_l no qual a função F é calculada [6], [5]. Dessa forma, a função F é calculada K vezes para cada uma das m variáveis aleatórias de entrada. Este cálculo é realizado substituindo-se a variável p_l pelas suas concentrações $p_{l,k}$ e mantendo-se as demais $(m-1)$ variáveis em seus valores médios. Ou seja, o fluxo de potência determinístico deve ser calculado $K \times m$ vezes para que os momentos das variáveis de saída possam ser estimados. O número de locais K para cada variável aleatória de entrada depende do esquema usado [6], [5]. O local $p_{l,k}$ é definido como:

$$p_{l,k} = \mu_{p_l} + \xi_{l,k} \sigma_{p_l} \quad (20)$$

Na qual $\xi_{l,k}$ é o local padrão, μ_{p_l} e σ_{p_l} são a média e o desvio padrão da variável de entrada p_l . O local padrão $\xi_{l,k}$ e o peso $w_{l,k}$ são obtidos pela resolução do sistema de equações:

$$\sum_{k=1}^K w_{l,k} = \frac{1}{m} \quad (21)$$

$$\sum_{k=1}^K w_{l,k} (\xi_{l,k})^i = \lambda_{l,i} \quad i = 1, 2, \dots, 2k-1 \quad (22)$$

Nas quais $\lambda_{l,i}$ representa o i -ésimo momento central da variável de entrada p_l com função densidade de probabilidade f_{p_l} . Uma vez que todas as concentrações $(p_{l,k}, w_{l,k})$ forem encontradas, a função F é calculada nos valores $(\mu_{p_1}, \mu_{p_2}, \dots, p_{l,k}, \dots, \mu_{p_m})$, resultando em $Z(l, k)$ que é o vetor de variáveis aleatórias de saída [6], [5]. Finalmente, usando-se os pesos $w_{l,k}$ e os valores de $Z(l, k)$ calculados em cada local $p_{l,k}$ pode-se estimar o j -ésimo momento da i -ésima variável de saída como:

$$\mu_i^j = E[Z_i^j] \cong \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^K w_{l,k} (Z(l, k))^j \quad (23)$$

Neste artigo é implementado o esquema $2m + 1$ que usa 3 pontos (sendo um localizado na média das variáveis de entrada) para estimar as estatísticas das variáveis de saída. Nesse esquema, são efetuados $2m + 1$ cálculos da função F . Visto que $\xi_{l,3} = 0, \forall l$, os demais locais são obtidos por meio das seguintes expressões:

$$\xi_{l,k} = \frac{\lambda_{l,3}}{2} + (-1)^{3-k} \sqrt{\lambda_{l,4} - \frac{3}{4} \lambda_{l,3}^2} \quad k = 1, 2 \quad (24)$$

Os pesos $w_{l,k}$ são definidos por:

$$w_{l,k} = \frac{(-1)^{3-k}}{\xi_{l,k} (\xi_{l,1} - \xi_{l,2})} \quad k = 1, 2 \quad (25)$$

$$w_{l,3} = \frac{1}{m} - \frac{1}{\lambda_{l,4} - \lambda_{l,3}^2} \quad k = 1, 2 \quad (26)$$

Após os momentos das variáveis de saída terem sido calculados pelo método de estimação por pontos, pode-se obter a função densidade de probabilidade de uma variável de saída através de expansões em séries ortogonais, tais como: Gram-Charlier, Edgeworth e Cornish-Fisher [4]. Estas expansões fornecem aproximações precisas para a distribuição de probabilidade da variável de saída somente quando ela é unimodal. No contexto do FPP, esta suposição

só é válida quando os geradores são 100% confiáveis. A multimodalidade é devido ao fato de que as distribuições que modelam as falhas nos geradores são discretas (binomiais). Uma alternativa para contornar esta limitação é aproximar uma distribuição multimodal por uma combinação linear de variáveis contínuas. Esta tarefa pode ser realizada usando-se o método de mistura gaussiana descrito a seguir.

C. Teoria de Mistura Gaussiana

Uma distribuição de probabilidades não gaussiana $F(y)$ pode ser aproximada pela soma de n distribuições de probabilidades gaussianas ponderadas por um peso w_k de forma que:

$$F(y) \cong \sum_{k=1}^n f_k(y) = \sum_{k=1}^n w_k f_{N(\mu_k, \sigma_k)}(y) \quad (26)$$

$$\sum_{k=1}^n w_k = 1 \quad (27)$$

Em que $f_k(y) = w_k f_{N(\mu_k, \sigma_k)}(y)$ e $N(\mu_k, \sigma_k)$ é uma distribuição gaussiana com parâmetros de média μ_k e desvio padrão σ_k . Quanto maior for o número de gaussianas usadas na soma, melhor a aproximação da função [9]. Pelo princípio da linearidade dos momentos, pode-se estabelecer que:

$$\mu_j[F(y)] = \sum_{k=1}^n w_k \mu_j[f_k(y)] \quad (28)$$

Assim, conclui-se que o momento da soma ponderada de gaussianas é a soma dos momentos individuais ponderados de cada gaussiana. Conhecendo-se n momentos de uma distribuição F cuja forma é desconhecida, pode-se aproximá-la por uma soma de gaussianas através de uma equação de n variáveis. Essas equações incluem os pesos w de cada gaussiana e suas médias e desvios padrões [9]. Como exemplo, suponham-se conhecidos os 8 primeiros momentos m_i de uma distribuição f cuja forma ainda é desconhecida. A partir destes momentos, pode-se obter uma representação usando-se uma soma de 3 gaussianas a partir do seguinte sistema não-linear:

$$\begin{cases} w_1 \mu_1 + w_2 \mu_2 + w_3 \mu_3 - m_1 = 0 \\ w_1 (\mu_1^2 + \sigma_1^2) + w_2 (\mu_2^2 + \sigma_2^2) + w_3 (\mu_3^2 + \sigma_3^2) - m_2 = 0 \\ \dots \\ w_1 + w_2 + w_3 - 1 = 0 \end{cases} \quad (29)$$

Nas quais w_1, w_2 e w_3 são os pesos das 3 distribuições gaussianas usadas na aproximação e μ_1, μ_2 e μ_3 (σ_1, σ_2 e σ_3) são as médias (desvios padrões) das distribuições gaussianas.

VII. TESTES E RESULTADOS

A. Características do Sistema Teste

Os métodos probabilísticos propostos neste artigo para calcular índices de adequação e qualidade da microrrede foram testados e validados na microrrede de 38 barras [2], [3]. O diagrama unifilar desse sistema é mostrado na Fig. 1. Neste artigo, foi incluído um gerador eólico do tipo DFIG (“Double Fed Induction Generator”) e um gerador solar fotovoltaico. Os dados completos para ambos os geradores renováveis e convencionais foram extraídos de [2], [3], [4] e [7]. Os dados sobre os tipos de cargas, coeficientes “droop” e custos foram extraídos das referências [2] e [3].

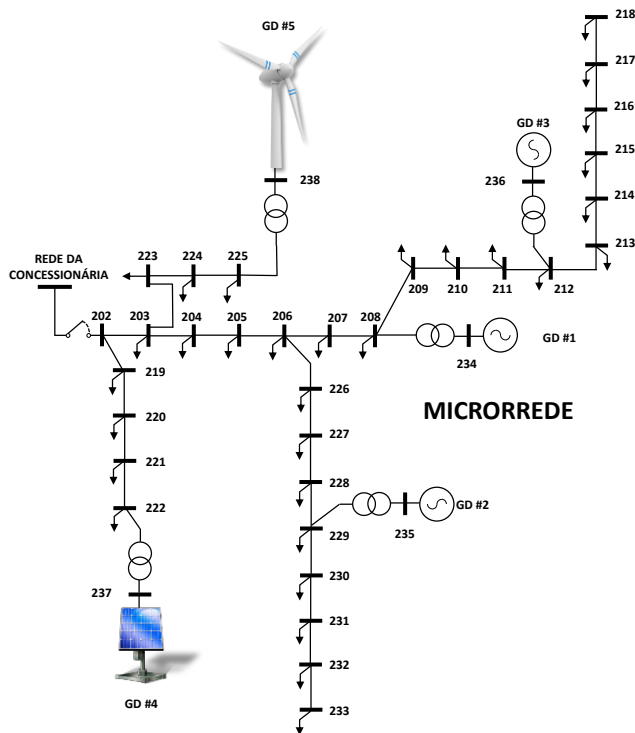


Fig. 1. Microrrede de 38 barras [2] modificada com a inclusão de duas fontes de geração renovável de energia [3].

A estimação dos índices de qualidade e adequação da microrrede via SMC e método analítico é realizada considerando-se que:

- i) Haverá um evento de perda de carga total na microrrede quando o desvio de frequência for superior a 3 Hz (para mais ou menos). Este evento é devido ao desligamento de todos os geradores da microrrede pela atuação das proteções de sub/sobrefrequência [3].
- ii) Desvios de frequência superiores a 2 Hz caracterizam uma violação de frequência [3].
- ii) Caso alguma barra tenha um desvio de tensão superior a 5% do valor nominal, a carga nesta barra será desconectada pela atuação dos relés de sub/sobretensão. Este é o valor limiar para a atuação da proteção de sobretensão/subtensão de equipamentos de comunicação [10]. Essa atuação tem como objetivo evitar que os equipamentos elétricos sejam danificados devido a valores inaceitáveis da tensão de fornecimento.

A partir das suposições acima foram estimados os seguintes índices de qualidade e adequação para a microrrede:

- i) PCCTF– probabilidade de perda de carga total na microrrede devido a desvios de frequência;
- ii) PCCNT– probabilidade de perda de carga nodal devido a desvios de tensão.

Os índices acima são calculados considerando-se incertezas associadas com: indisponibilidade dos geradores, erros de previsão de carga, variações na velocidade do vento e flutuações na irradiância solar. Os dados meteorológicos associados com a velocidade do vento e com a irradiação solar foram obtidos a partir do site do projeto SONDA [11].

Finalmente, foram considerados dois casos de estudo para a estimação dos índices de desempenho da microrrede no modo ilhado:

- i) Caso #1: todos os geradores da microrrede são do tipo térmico à gás.
- ii) Caso #2: a microrrede possui um gerador eólico e um solar fotovoltaico conectados conforme o diagrama unifilar da Figura 1.

B. Índices de Qualidade e Adequação Estimados para a Microrrede

A Tabela I apresenta as probabilidades de violações de tensão e/ou frequência estimadas pela SMC não sequencial com uma amostra de 10.000 estados do sistema. A partir desta tabela, pode-se observar que a inserção de fontes renováveis deteriorou a probabilidade de a microrrede alcançar um estado factível em termos de frequência e tensão após a ação da regulação primária. Por exemplo, houve um aumento de 819%, com relação ao Caso #1, na probabilidade de ocorrência de violações de frequência.

TABELA I. PROBABILIDADES DE VIOLAÇÕES

Tipo de Violação	Caso #1	Caso #2
Sem Violação	77,71%	29,71%
Tensão	0,95%	2,14%
Frequência	4,57%	42,01%
Tensão e Frequência	16,77%	26,14%

O índice PCCTF, associado com o caso #2, obtido através da SMC não-sequencial é igual a 31,02%. A Fig. 2 mostra a distribuição de probabilidade cumulativa da frequência, obtida via estimação por pontos e mistura gaussiana, para o caso #2. Essa distribuição pode ser usada para estimar o índice PCCTF como:

$$P(0,95pu > f > 1,05pu) = 100\% \times [(1 - 0,8152) + 0,1255] \Rightarrow$$

$$P(0,95pu > f > 1,05pu) = 31,03\%$$

O resultado acima demonstra que o método analítico proposto neste artigo é muito preciso com relação a SMC não-sequencial. A Fig. 2 também mostra que a única técnica que fornece uma aproximação adequada para a distribuição cumulativa da frequência obtida via SMC não-sequencial é a mistura gaussiana. Ou seja, as expansões em séries ortogonais (Gram-Charlier, Cornish-Fisher e Edgeworth) não fornecem boas aproximações para a distribuição cumulativa da frequência.

Na Fig. 3 são mostrados os índices PCCNT para cada barra da microrrede calculados via SMC não-sequencial. A partir desta figura pode-se observar que o maior valor do índice PCCNT é igual a 25,77% e ocorre na barra #22. Esse mesmo resultado pode ser obtido analiticamente via método de estimação por pontos com mistura gaussiana. A Fig. 4 mostra a distribuição de probabilidade cumulativa da tensão na barra #22 calculada pela estimação por pontos com mistura gaussiana. A partir dessa figura, pode-se estimar o índice PCCNT na barra #22 como:

$$P(0,95pu > V_{22} > 1,05pu) = 100\% \times [(1 - 0,8716) + 0,1312] \Rightarrow$$

$$P(0,95pu > V_{22} > 1,05pu) = 25,96\%$$

A equação acima e a Fig. 4 demonstram quantitativamente e qualitativamente que o método proposto neste artigo tem precisão aceitável comparado com a SMC não-sequencial. Deve-se também avaliar o custo computacional da técnica proposta com relação a SMC não-sequencial. O tempo de CPU requerido para estimar os índices probabilísticos via estimação por pontos com mistura gaussiana foi igual a 4,03 segundos. Por outro lado, o tempo requerido para estimar os índices probabilísticos via SMC

não-sequencial foi de 1923 segundos. Desta forma, a técnica proposta neste artigo é cerca de 477 vezes mais rápida do que a SMC não-sequencial.

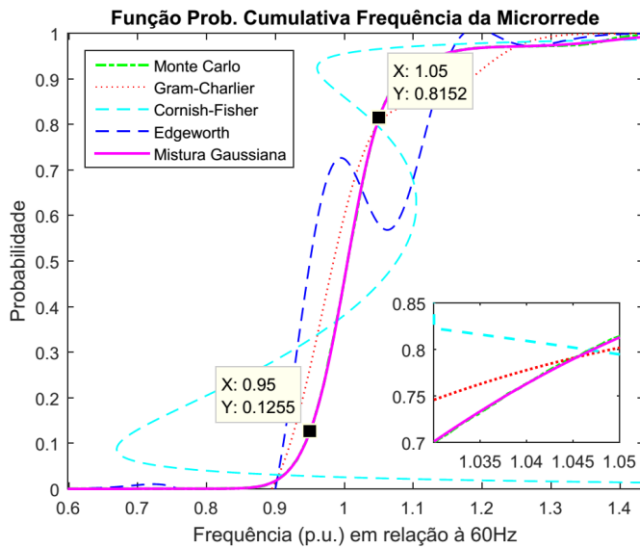


Fig. 2. Distribuição de probabilidade cumulativa da frequência da microrrede para o caso #2.

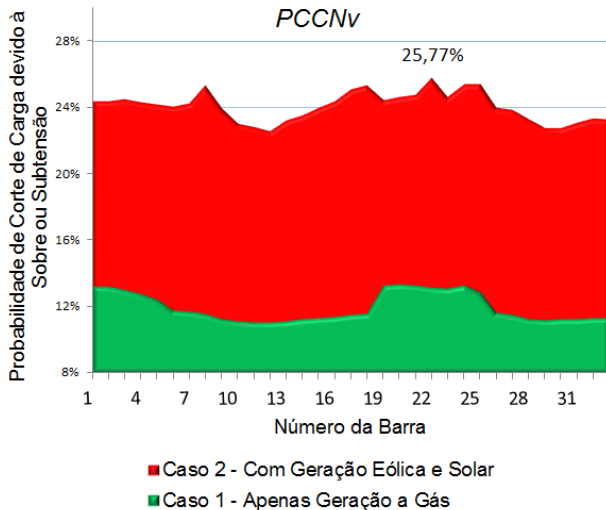


Fig. 3. Índices PCCNT da microrrede para os casos #1 e #2.

VIII. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta uma nova metodologia analítica para estimar índices de qualidade e adequação de microrredes de distribuição que operam em modo ilhado. Estes índices foram estimados considerando-se incertezas nos seguintes parâmetros: erro de previsão de carga, velocidade do vento, irradiação solar e indisponibilidade dos geradores distribuídos. A técnica proposta para estimar os índices de desempenho da microrrede se baseia na combinação do fluxo de potência com barra slack distribuída (para determinar as tensões e a frequência da microrrede) e estimação por pontos com mistura gaussiana (para modelagem de incertezas). Os resultados dos testes em uma microrrede de 38 barras demonstraram que:

- i) O uso do método de Estimação por Pontos combinado com a Mistura Gaussiana foi capaz de representar precisamente distribuições multimodais associadas com a frequência e as tensões da microrrede.
- ii) A presença de incertezas com distribuições de probabilidade discretas (indisponibilidade dos geradores)

resulta em distribuições multimodais para as tensões e para a frequência.

iii) As expressões em séries ortogonais não são adequadas para modelar distribuições de probabilidade multimodais no FPP.

iv) A combinação da estimação por pontos com o método de mistura gaussiana foi capaz de modelar precisamente distribuições multimodais no FPP.

ii) O método proposto é capaz de identificar as barras da microrrede mais vulneráveis a problemas de tensão.

iii) O custo computacional do método proposto é consideravelmente menor do que aquele associado com a SMC não-sequencial.

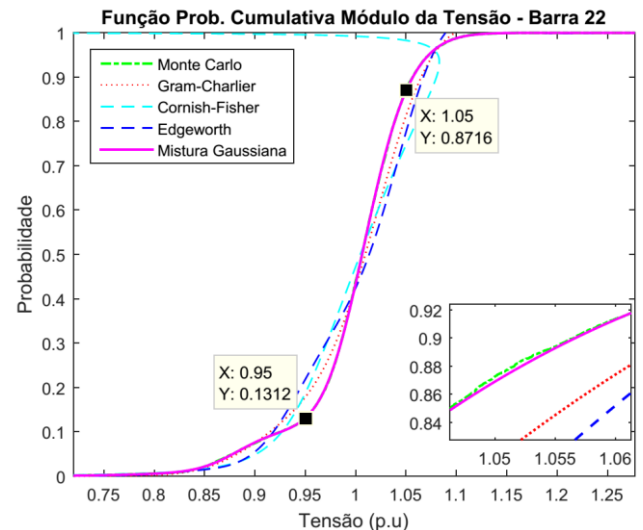


Fig. 4. Distribuição de probabilidade cumulativa do módulo da tensão na barra 22.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] N. Hatziaiyriou, "Microgrids: Architectures and Control," Wiley-IEEE Press, 2014.
- [2] M. M. A. Abdelaziz, H. E. Farag, E. F. El-Saadany, Y. A. I. Mohamed, "A Novel and Generalized Three-Phase Power Flow Algorithm for Islanded Microgrids Using a Newton Trust Region Method," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 1, pp. 190-201, 2013.
- [3] J. R. Araújo, E. N. M. Silva, A. B. Rodrigues, M. G. Silva, "Assessment of the Impact of Microgrid Control Strategies in the Power Distribution Reliability Indices," *Journal of Control and Automation Systems*, 2017 (aceito para publicação).
- [4] M. Fan, V. Vital, G. T. Heydt, R. Ayyar, "Probabilistic Power Flow Studies for Transmission Systems With Photovoltaic Generation Using Cumulants," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 27, no. 4, pp. 2251-2261, 2012.
- [5] H. P. Hong, "An Efficient Point Estimate Method For Probabilistic Analysis," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 59, pp. 261-267, 1998.
- [6] J. M. Morales, J. Pérez-Ruiz, "Point Estimate Method to Solve The Probabilistic Power Flow," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 1594-1601, 2007.
- [7] L. M. Castro, R. Fuerte-Esquivel, J. H. Tovar-Hernández, "Solution of Power Flow with Automatic Load-Frequency Control Devices Including Wind Farms," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 27, no. 4, pp. 2186-2195, 2012.
- [8] R. Billinton, & W. Li, "Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods", Plenum Press, 1994.
- [9] B. R. Prusty, D. Jena, "Combined Cumulant and Gaussian Mixture Approximation for Correlated Probabilistic Load Flow Studies: A New Approach," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 71-78, 2016.
- [10] H. Wan, J. D. McCalley, and V. Vittal, "Risk Based Voltage Security Assessment", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 1247-1254.
- [11] Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA), Bases de Dados Anemométricos e Ambientais, [Online]. Disponível em: <http://sonda.cbst.inpe.br>.