

Fluxo de Potência Probabilístico Desacoplado Rápido para Microrredes Ilhadas

Elson N. M. Silva*. Anselmo B. Rodrigues*. Maria da Guia da Silva*

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), UFMA, São Luís - MA, 65080-805
e-mails: elson-ms@hotmail.com, anselmo.rodrigues@ufma.br, guia.maria@ufma.br

Abstract: A fast decoupled power flow algorithm is proposed in this paper to calculate the frequency and voltages in islanded microgrids. The decoupling is characterized by two subproblems: $P\theta\omega$ and QV . The computational cost of the proposed method is minimized through the application of a stationary Newton-Raphson method. The Newton-Raphson and Fixed-Point methods were used to validate the accuracy and the computational cost of the proposed technique. This validation was carried out in a 310 nodes microgrid through a probabilistic power flow study. Uncertainties related to load forecasting error and equipment failures were modeled in the probabilistic power flow through the Monte Carlo Simulation. The tests results revealed that the proposed fast decoupled power flow achieved solutions very close to those generated by the Newton-Raphson and Fixed-Point methods, but with expressive reductions in the computational cost regarding to Newton-Raphson method.

Resumo: Um algoritmo de fluxo de potência desacoplado rápido é proposto neste artigo para calcular a tensão e a frequência em microrredes ilhadas. O desacoplamento é caracterizado por dois subproblemas: $P\theta\omega$ e QV . O custo computacional do algoritmo proposto é minimizado através da aplicação de um método de Newton estacionário. Os métodos de Newton-Raphson e do Ponto-Fixo foram usados para validar a precisão e o custo computacional da técnica proposta. Esta validação foi realizada em uma microrrede de 310 nós através de um estudo de fluxo de potência probabilístico. Incertezas relacionadas com erros de previsão de carga e falhas nos equipamentos foram modeladas no fluxo de potência probabilístico através da Simulação Monte Carlo. Os resultados dos testes revelaram que o fluxo de potência desacoplado rápido proposto obteve soluções muito próximas daquelas geradas pelos métodos de Newton-Raphson e do Ponto-Fixo, mas com reduções expressivas no custo computacional com relação ao método de Newton-Raphson.

Keywords: microgrids, islanding, power flow, Monte Carlo simulation, decoupling, Newton-Raphson method.

Palavras-chaves: microrredes, ilhamento, fluxo de potência, simulação Monte Carlo, desacoplamento, método de Newton-Raphson.

1. NOMENCLATURA

b_{km} é a impedância série do ramo entre os nós k e m .

b_k^{sh} é a susceptância *shunt* equivalente conectada entre o nó k e o nó terra.

G_{km} e B_{km} são elementos das matrizes de condutância e susceptância nodal, respectivamente.

Kd_k^P e Kd_k^Q são os coeficientes do modelo dependente da frequência para as cargas ativa e reativa, respectivamente.

Kg_k^P e Kg_k^Q são as constantes para os controles *droop* $P\omega$ e QV do gerador conectado ao nó k , respectivamente.

N^{no} é o número de nós da microrrede.

$\mathbf{0}$ é um vetor nulo com dimensão $N^{no} \times 1$ e \mathbf{e}_r é um vetor canônico (todos os elementos são nulos, exceto o r -ésimo que é unitário) com dimensão $N^{no} \times 1$.

$\mathbf{0}_{N^{no} \times N^{no}}$ é uma matriz nula.

$Pd_k(V_k, \omega)$ e $Qd_k(V_k, \omega)$ são as potências ativa e reativa da carga conectada ao nó k , respectivamente.

Pd_k^{nom} (Qd_k^{nom}) é o valor nominal de $Pd_k(V_k, \omega)$ ($Qd_k(V_k, \omega)$).

$Pg_k(\omega)$ e $Qg_k(V_k)$ são as gerações de potência ativa e reativa no nó k , respectivamente.

Pg_k^{ref} (Qg_k^{ref}) e V_k^{ref} são os valores de referência para a geração de potência ativa (reativa) e magnitude da tensão, respectivamente, para o controle *droop* do GD conectado ao nó k .

$P_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})$ e $Q_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})$ são as injeções resultantes de potência ativa e reativa no nó k , respectivamente.

\mathbf{P} e \mathbf{Q} são vetores de $P_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})$ e $Q_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V})$, respectivamente.

O sobrescrito \mathbf{T} denota a transposta de uma matriz ou vetor.

r é o índice do nó de referência angular da microrrede.

V_k e θ_k são a magnitude e o ângulo da tensão no nó k , respectivamente.

\mathbf{V} e $\boldsymbol{\theta}$ são vetores com dimensão N^{no} cujos elementos estão associados com V_k e θ_k , respectivamente.

α_k e β_k são os expoentes dos modelos dependentes da tensão para as cargas ativa e reativa, respectivamente.

$\Delta\theta^{(\tau)}$, $\Delta\omega^{(\tau)}$ e $\Delta V^{(\tau)}$ são vetores de correção associados com θ , ω e V , respectivamente, para a iteração τ .

ε é a tolerância especificada.

$\Delta\chi^{max}$ é o desvio máximo observado nas tensões e na frequência angular.

θ_r^{esp} é o valor especificado do ângulo da tensão no nó r .

$\mu_{N^{no} \times 1}$ é um vetor com elementos unitários.

τ é o contador de iterações.

O sobrescrito (τ) associa uma variável com a iteração τ .

ω é a frequência angular da microrrede.

ω^{ref} é o valor de referência para ω .

2. INTRODUÇÃO

As microrredes são uma das tecnologias que estão viabilizando a transição em direção ao paradigma de redes elétricas inteligentes (Hatzargyriou, 2013). As principais vantagens advindas da aplicação de microrredes são: redução nas perdas, flexibilidade para permitir a participação de geração distribuída em mercados de energia elétrica, maximização do uso da geração de energia renovável e melhoramento da confiabilidade. O aumento no nível de confiabilidade é obtido a partir da operação ilhada. Isto ocorre quando a microrrede é desconectada do sistema da concessionária após um distúrbio à montante do ponto de acoplamento comum. O sucesso da operação ilhada depende da factibilidade com relação a restrições técnicas, tais como os limites para as magnitudes das tensões e para a frequência. Caso contrário, eventos de perda de carga total ou parcial podem ocorrer devido a operação de dispositivos de proteção (por exemplo, os relés de subfrequência) e a confiabilidade tenderá a se deteriorar.

A principal ferramenta usada no planejamento de microrredes para detectar violações em restrições técnicas é o fluxo de potência. Contudo, o fluxo de potência em microrredes ilhadas difere do fluxo de potência convencional devido a: (i) ausência de uma barra de infinita com capacidade ilimitada; (ii) frequência angular ser incluída como uma variável de estado; (iii) potências de saída ativa e reativa dos Geradores Distribuídos (GDs) são variáveis devido ao controle *droop*; (iv) perdas de potência ativa e reativa são divididas entre todos os GDs. Devido a estas características os algoritmos de fluxo de potência para microrredes ilhadas são conhecidos como Fluxo de Potência com Múltiplas Barras Infinitas (FMI).

Vários algoritmos de fluxo de potência têm sido desenvolvidos para microrredes ilhadas (Abdelaziz et al., 2013; Araújo et al., 2017; Hameed et al., 2019; Jabr et al., 2018; Mumtaz et al., 2016; Nassar e Salama, 2017; Pompodakis et al., 2020; Silva et al., 2020a). Estes algoritmos se baseiam principalmente em três paradigmas: métodos baseados no Jacobiano (Araújo et al., 2017; Abdelaziz et al., 2013; Mumtaz et al., 2016), técnicas de varredura regressiva/progressiva (Hameed et al., 2019; Nassar e Salama, 2017; Silva et al., 2020a) e análise nodal (Jabr et al., 2018; Pompodakis et al., 2020; Silva et al., 2020a). Os métodos baseados no Jacobiano estão associados com o Método de Newton Raphson (MNR) e suas variantes, tais como o método de Região de Confiança (Araújo et al., 2017; Abdelaziz et al., 2013; Mumtaz et al., 2016). As principais vantagens dos métodos baseados no Jacobiano são: (i) estes

métodos podem ser usados em redes com topologia radial ou malhada; (ii) característica de convergência quadrática; (iii) flexibilidade para modelar controles e limites. Contudo, a principal desvantagem dos métodos baseados no Jacobiano é o seu alto custo computacional devido a necessidade de solucionar, a cada iteração, o sistema linear resultante da expansão de Taylor de primeira ordem das equações de fluxo de potência.

Uma alternativa de baixo custo computacional aos métodos baseados no Jacobiano é a aplicação das técnicas de varredura (Hameed et al., 2019; Nassar e Salama, 2017; Silva et al., 2020a). Estes métodos são livres de operações matriciais, pois criam uma estrutura de navegação para microrrede baseada na sua topologia radial. Esta estrutura de navegação é usada para calcular as tensões na varredura progressiva após a acumulação de um dos seguintes parâmetros na varredura regressiva: correntes, potência ou admitâncias. O parâmetro acumulado denomina a variante da técnica de varredura.

Como há também microrredes com topologia malhada, foram desenvolvidos algoritmos de FMI baseados na análise nodal (Jabr et al., 2018; Pompodakis et al., 2020; Silva et al., 2020a). Os algoritmos de FMI baseados na análise nodal aplicam o Método do Ponto Fixo para solucionar as equações de fluxo de potência expressas como injeções de corrente em notação complexa. A principal vantagem da análise nodal com relação aos métodos baseados no Jacobiano é que cada iteração do método do ponto fixo se baseia em uma matriz constante: a matriz de admitância nodal. Consequentemente, a atualização das tensões em cada iteração é realizada solucionando-se apenas sistemas elementares triangulares associados com os fatores LU da matriz admitância nodal.

É importante mencionar que o custo computacional da solução do FMI via MNR pode ser reduzido através das variantes desacopladas e desacopladas rápidas do MNR. Entretanto, somente uma versão desacoplada do MNR foi desenvolvida para microrredes ilhadas (Nazari et al., 2020). O desenvolvimento de uma versão desacoplada rápida do MNR para o FMI tem potencial para obter reduções significantes no custo computacional, pois o fluxo de potência desacoplado usa matrizes constantes em cada iteração com uma dimensão menor do que o Jacobiano original.

Outra estratégia interessante para reduzir o custo computacional da solução do FMI é desenvolver algoritmos aproximados baseados na linearização. Silva et al. (2020b) propuseram um FMI linear baseado na expansão de Taylor truncada e em séries de potência de números complexos. A técnica proposta por Silva et al. (2020b) obteve reduções significativas no tempo de CPU com relação ao MNR, mas a sua precisão é dependente do ponto em torno do qual a expansão de Taylor é realizada.

Outro aspecto importante no planejamento da operação ilhada são as incertezas oriundas do comportamento aleatório dos seguintes parâmetros: (i) intermitência na potência de saída dos GD renováveis (solar, eólica, biomassa, etc.); (ii) erros de previsão de carga; (iii) falhas nos equipamentos (GD, transformadores, seções dos alimentadores, etc.). A operação ilhada sujeita a estas incertezas resulta em risco

(probabilidade) de violar restrições técnicas e em flutuações ao redor de valores previstos (estimados) de índices de desempenho, por exemplo, as perdas. Se estes riscos e flutuações são significantes, o desempenho da operação ilhada se desviará daquele previsto e ocorrerá uma degradação da confiabilidade.

Geralmente, a técnica mais usada para considerar estas incertezas no planejamento de microrredes é o fluxo de potência probabilístico (FPP). A principal técnica usada na solução do FPP é a Simulação Monte Carlo (SMC) (Prusty e Jena, 2017). A preferência pela SMC é devido a: (i) implementação simples; (ii) simplicidade para modelar incertezas e características operacionais complexas (manutenção, correlação e incertezas dependentes do tempo); (iii) capacidade para gerar distribuições de probabilidade para os índices de interesse. A última vantagem é muito importante no planejamento da operação ilhada, pois o risco de violação das restrições é obtido a partir das distribuições de probabilidade. Entretanto, a principal deficiência da SMC é o seu alto custo computacional, pois a SMC exige um cálculo de fluxo para cada elemento da amostra de estados do sistema. Esta desvantagem torna-se mais crítica no planejamento de microrredes, visto que é necessário avaliar muitos projetos candidatos para identificar a solução ótima. Por exemplo, a solução do fluxo de potência ótimo probabilístico, via algoritmos meta-heurísticos (Chagas et al., 2020), com modelagem de riscos na função objetivo e/ou restrições.

A partir dos problemas discutidos acima, o desenvolvimento de algoritmos de FMI para o planejamento de microrredes ilhadas deve estabelecer um compromisso aceitável entre a precisão e custo computacional. Desta forma, o principal objetivo deste artigo é propor um FMI desacoplado rápido. A derivação deste algoritmo se baseia nos seguintes acoplamentos: (i) potência ativa, ângulo da tensão e frequência; (ii) potência reativa e magnitude da tensão. Estes acoplamentos foram usados para particionar a matriz Jacobiana calculada no *flat-start* em dois subproblemas: P $\theta\omega$ e QV. O algoritmo de FMI proposto foi embutido em um fluxo de potência probabilístico baseado na SMC para gerar vários índices probabilísticos relacionados com a tensão, perdas e frequência. Estes índices foram estimados considerando-se incertezas associadas com erros de previsão de carga e falhas nos equipamentos (seções dos alimentadores, transformadores e GD). O FPP foi testado em uma microrrede malhada com 310 nós obtida a partir da rede de distribuição malhada de baixa tensão descrita na referência (IEEE PES, 2017). Os resultados dos testes demonstram que o método proposto possui a mesma precisão do MNR e da análise nodal (Silva et al., 2020a), mas com reduções significantes no custo computacional comparado ao MNR.

3. FLUXO DE POTÊNCIA COM MÚLTIPLAS BARRAS DE INFINITAS VIA MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

As equações de balanço de potência ativa e reativa em cada nó da microrrede são definidas em (1) e (2), respectivamente.

$$P_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = P g_k(\omega) - P d_k(V_k, \omega) \quad \forall k = 1, \dots, N^{no} \quad (1)$$

$$Q_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = Q g_k(V_k) - Q d_k(V_k, \omega) \quad \forall k = 1, \dots, N^{no} \quad (2)$$

Onde:

$$P_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3)$$

$$Q_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (4)$$

$$P g_k(\omega) = P g_k^{ref} + \frac{1}{K g_k^P} (\omega^{ref} - \omega) \quad (5)$$

$$Q g_k(V_k) = Q g_k^{ref} + \frac{1}{K g_k^Q} (V_k^{ref} - V_k) \quad (6)$$

$$P d_k(V_k, \omega) = P d_k^{nom} V_k^{\alpha_k} [1 + K d_k^P (\omega - \omega^{ref})] \quad (7)$$

$$Q d_k(V_k, \omega) = Q d_k^{nom} V_k^{\beta_k} [1 + K d_k^Q (\omega - \omega^{ref})] \quad (8)$$

$$\theta_{km} = \theta_k - \theta_m \quad (9)$$

A expansão de Taylor de primeira ordem de (1) e (2) em notação matricial resulta em:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}(\mathbf{x}^{(\tau)}) & \boldsymbol{\lambda}^{P\omega}(\mathbf{x}^{(\tau)}) & \mathbf{N}'(\mathbf{x}^{(\tau)}) \\ \mathbf{M}(\mathbf{x}^{(\tau)}) & \boldsymbol{\lambda}^{Q\omega}(\mathbf{x}^{(\tau)}) & \mathbf{L}'(\mathbf{x}^{(\tau)}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}^{(\tau)} \\ \Delta \omega^{(\tau)} \\ \Delta \mathbf{V}^{(\tau)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}(\mathbf{x}^{(\tau)}) \\ \Delta \mathbf{Q}(\mathbf{x}^{(\tau)}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde:

$$\mathbf{x}^{(\tau)} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}^{(\tau)} \\ \omega^{(\tau)} \\ \mathbf{V}^{(\tau)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}^{(\tau)}) = \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^{(\tau)}}, \quad \mathbf{M}(\mathbf{x}^{(\tau)}) = \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^{(\tau)}}, \quad \mathbf{N}(\mathbf{x}^{(\tau)}) = \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \omega} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^{(\tau)}} \text{ e } \mathbf{L}(\mathbf{x}^{(\tau)}) = \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \omega} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^{(\tau)}} \text{ são as derivadas parciais das equações de fluxo de potência convencionais.}$$

$$\mathbf{N}'(\mathbf{x}^{(\tau)}) = \mathbf{N}(\mathbf{x}^{(\tau)}) + \boldsymbol{\Lambda}^{PV}(\mathbf{x}^{(\tau)}) \quad (12)$$

$$\mathbf{L}'(\mathbf{x}^{(\tau)}) = \mathbf{L}(\mathbf{x}^{(\tau)}) + \boldsymbol{\Lambda}^{QV}(\mathbf{x}^{(\tau)}) \quad (13)$$

$\boldsymbol{\lambda}^{P\omega}(\mathbf{x}^{(\tau)})$ e $\boldsymbol{\lambda}^{Q\omega}(\mathbf{x}^{(\tau)})$ são vetores com dimensão $N^{no} \times 1$ cujos elementos são definidos como:

$$\begin{aligned} \lambda_k^{P\omega}(\mathbf{x}^{(\tau)}) &= \frac{\partial P d_k}{\partial \omega} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^{(\tau)}} - \frac{\partial P g_k}{\partial \omega} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^{(\tau)}} \\ &= K d_k^P P d_k^{nom} [V_k^{(\tau)}]^{\alpha_k} + \frac{1}{K g_k^P} \quad \forall k = 1, \dots, N^{no} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \lambda_k^{Q\omega}(\mathbf{x}^{(\tau)}) &= \frac{\partial Q d_k}{\partial \omega} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^{(\tau)}} \\ &= K d_k^Q Q d_k^{nom} [V_k^{(\tau)}]^{\beta_k} \quad \forall k = 1, \dots, N^{no} \end{aligned} \quad (15)$$

$\boldsymbol{\Lambda}^{PV}(\mathbf{x}^{(\tau)})$ e $\boldsymbol{\Lambda}^{QV}(\mathbf{x}^{(\tau)})$ são matrizes diagonais com dimensão $N^{no} \times N^{no}$ cujos elementos não-nulos são dados por:

$$\begin{aligned} \Lambda_{kk}^{PV}(\mathbf{x}^{(\tau)}) &= \frac{\partial P d_k}{\partial V_k} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^{(\tau)}} \\ &= \alpha_k P d_k^{nom} [V_k^{(\tau)}]^{(\alpha_k-1)} [1 + K d_k^P (\omega^{(\tau)} - \omega^{ref})] \\ &\quad \forall k = 1, \dots, N^{bus} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \Lambda_{kk}^{QV}(\mathbf{x}^{(\tau)}) &= \frac{\partial Q d_k}{\partial V_k} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^{(\tau)}} - \frac{\partial Q g_k}{\partial V_k} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^{(\tau)}} \\ &= \beta_k Q d_k^{nom} [V_k^{(\tau)}]^{(\beta_k-1)} [1 + K d_k^Q (\omega^{(\tau)} - \omega^{ref})] \\ &\quad + \frac{1}{K g_k^Q} \quad \forall k = 1, \dots, N^{bus} \end{aligned} \quad (17)$$

$\Delta \mathbf{P}(\mathbf{x}^{(\tau)})$ e $\Delta \mathbf{Q}(\mathbf{x}^{(\tau)})$ são os vetores de resíduos de potência ativa e reativa, respectivamente, com elementos dados por:

$$\Delta P_k(\mathbf{x}^{(\tau)}) = P g_k(\omega^{(\tau)}) - P d_k(V_k^{(\tau)}, \omega^{(\tau)}) - P_k(\boldsymbol{\theta}^{(\tau)}, \mathbf{V}^{(\tau)}) \quad (18)$$

$$\Delta Q_k(\mathbf{x}^{(\tau)}) = Qg_k(V_k^{(\tau)}) - Qd_k(V_k^{(\tau)}, \omega^{(\tau)}) - Q_k(\boldsymbol{\theta}^{(\tau)}, \mathbf{V}^{(\tau)}) \quad (19)$$

$\forall k = 1, \dots, N^{no}$

O sistema de equações lineares (10) é indeterminado, pois o número de incógnitas ($2N^{no} + 1$) é maior do que o número de equações $2N^{no}$. Consequentemente, é necessário adicionar uma equação para obter um sistema determinado. Esta equação é obtida definindo-se a referência angular para a microrrede como:

$$\begin{aligned} \theta_r &= \theta_r^{esp} \Rightarrow \Delta\theta_r^{(\tau)} = \theta_r^{esp} - \theta_r^{(\tau)} \Rightarrow \\ \Delta\theta_r^{(\tau)} &= \Delta\theta_r(\mathbf{x}^{(\tau)}) \end{aligned} \quad (20)$$

Onde:

$$\Delta\theta_r(\mathbf{x}^{(\tau)}) = \theta_r^{esp} - \theta_r^{(\tau)} \quad (21)$$

Inserindo-se (20) em (10) resulta no sistema determinado (22). Este é o sistema resolvido em cada iteração do FMI via MNR.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}(\mathbf{x}^{(\tau)}) & \lambda^{P\omega}(\mathbf{x}^{(\tau)}) & \mathbf{N}'(\mathbf{x}^{(\tau)}) \\ \mathbf{e}_r^T & 0 & \mathbb{0}^T \\ \mathbf{M}(\mathbf{x}^{(\tau)}) & \lambda^{Q\omega}(\mathbf{x}^{(\tau)}) & \mathbf{L}'(\mathbf{x}^{(\tau)}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta}^{(\tau)} \\ \Delta\omega^{(\tau)} \\ \Delta\mathbf{V}^{(\tau)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{P}(\mathbf{x}^{(\tau)}) \\ \Delta\theta_r(\mathbf{x}^{(\tau)}) \\ \Delta\mathbf{Q}(\mathbf{x}^{(\tau)}) \end{bmatrix} \quad (22)$$

4. FLUXO DE POTÊNCIA COM MÚLTIPLAS BARRAS INFINITAS DESACOPLADO RÁPIDO

A fundamentação teórica para as variantes dos Métodos de Fluxo de Potência Desacoplados Rápidos (FDR) foi introduzida por Monticelli et al. (1990). Em suma, esta referência estabelece quatro propriedades que permitem derivar as variantes do FDR. Será mostrado a seguir como estas propriedades são expandidas para gerar o FDR para microrredes ilhadas.

De acordo com Monticelli et al. (1990), o ponto de partida para obter as versões do FDR é a eliminação de Gauss por partições (blocos) da matriz Jacobiana no *flat-start* com o objetivo de dividir o sistema original em subsistemas com dimensões menores. No fluxo de potência convencional, esta estratégia insere uma matriz nula no canto inferior esquerdo da matriz Jacobiana considerando-se a matriz $\mathbf{H}(\mathbf{x}^{(\tau)})$ como bloco pivotal. Infelizmente, esta estratégia não pode ser aplicada ao FMI, visto que $\mathbf{H}(\mathbf{x}^{(\tau)})$ é singular devido à ausência de uma barra infinitas. Ao invés disso, o bloco pivotal no FMI será dado por:

$$\mathbf{H}'(\mathbf{x}^{(\tau)})_{(N^{no}+1) \times (N^{no}+1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}(\mathbf{x}^{(\tau)}) & \lambda^{P\omega}(\mathbf{x}^{(\tau)}) \\ \mathbf{e}_r^T & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

A partir de (23), pode-se concluir que o acoplamento definido para se definir o bloco pivotal no FMI é $P\theta\omega$ ao invés de $P\theta$. A inclusão da frequência no bloco pivotal é devido ao controle *droop* de potência ativa associar a frequência angular com a potência de saída ativa de um GD. Consequentemente, o objetivo da eliminação Gaussiana no sistema linear do FMI é anular a seguinte submatriz:

$$\mathbf{M}'(\mathbf{x}^{(\tau)})_{N^{no} \times (N^{no}+1)} = [\mathbf{M}(\mathbf{x}^{(\tau)}) \quad \lambda^{Q\omega}(\mathbf{x}^{(\tau)})] \quad (24)$$

O sistema linear (25) é obtido após multiplicar as duas primeiras linhas de (22) por $-\mathbf{M}'(\mathbf{x}^{(\tau)})\mathbf{H}'(\mathbf{x}^{(\tau)})^{-1}$ e adicionar o resultado a terceira linha.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}(\mathbf{x}^{(\tau)}) & \lambda^{P\omega}(\mathbf{x}^{(\tau)}) & \mathbf{N}'(\mathbf{x}^{(\tau)}) \\ \mathbf{e}_r^T & 0 & \mathbb{0}^T \\ \mathbb{0} & \mathbb{0} & \mathbf{L}^{eq}(\mathbf{x}^{(\tau)}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta}^{(\tau)} \\ \Delta\omega^{(\tau)} \\ \Delta\mathbf{V}^{(\tau)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{P}(\mathbf{x}^{(\tau)}) \\ \Delta\theta_r(\mathbf{x}^{(\tau)}) \\ \Delta\mathbf{Q}^{eq}(\mathbf{x}^{(\tau)}) \end{bmatrix} \quad (25)$$

Onde:

$$\mathbf{N}''(\mathbf{x}^{(\tau)})_{(N^{no}+1) \times N^{no}} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}'(\mathbf{x}^{(\tau)}) \\ \mathbb{0}^T \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\Delta\mathbf{P}'(\mathbf{x}^{(\tau)})_{(N^{no}+1) \times N^{no}} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{P}(\mathbf{x}^{(\tau)}) \\ \Delta\theta_r(\mathbf{x}^{(\tau)}) \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{L}^{eq}(\mathbf{x}^{(\tau)})_{N^{no} \times N^{no}} = \mathbf{L}(\mathbf{x}^{(\tau)}) - \mathbf{M}'(\mathbf{x}^{(\tau)})\mathbf{H}'(\mathbf{x}^{(\tau)})^{-1}\mathbf{N}''(\mathbf{x}^{(\tau)}) \quad (28)$$

$$\Delta\mathbf{Q}^{eq}(\mathbf{x}^{(\tau)})_{N^{no} \times 1} = \Delta\mathbf{Q}(\mathbf{x}^{(\tau)}) - \mathbf{M}'(\mathbf{x}^{(\tau)})\mathbf{H}'(\mathbf{x}^{(\tau)})^{-1}\Delta\mathbf{P}'(\mathbf{x}^{(\tau)}) \quad (29)$$

Monticelli et al. (1990) demonstraram que o cálculo do resíduo reativo equivalente $\Delta\mathbf{Q}^{eq}(\mathbf{x}^{(\tau)})$ pode ser realizado calculando-se o resíduo reativo convencional $\Delta\mathbf{Q}(\mathbf{x}^{(\tau)})$ no ponto $\boldsymbol{\theta}^{(\tau)} + \mathbf{H}(\mathbf{x}^{(\tau)})^{-1}\Delta\mathbf{P}(\mathbf{x}^{(\tau)})$ e $\mathbf{V}^{(\tau)}$ (Propriedade #1). A versão expandida desta propriedade para o FMI é dada em (30).

$$\Delta\mathbf{Q}^{eq}(\boldsymbol{\theta}^{(\tau)}, \omega^{(\tau)}, \mathbf{V}^{(\tau)}) \approx \Delta\mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}^{(\tau)} + \Delta\boldsymbol{\theta}', \omega^{(\tau)} + \Delta\omega', \mathbf{V}^{(\tau)}) \quad (30)$$

Onde:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta}' \\ \Delta\omega' \end{bmatrix} &= \mathbf{H}'(\mathbf{x}^{(\tau)})\Delta\mathbf{P}'(\mathbf{x}^{(\tau)}) \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{H}(\mathbf{x}^{(\tau)}) & \lambda^{P\omega}(\mathbf{x}^{(\tau)}) \\ \mathbf{e}_r^T & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{P}(\mathbf{x}^{(\tau)}) \\ \Delta\theta_r(\mathbf{x}^{(\tau)}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (31)$$

Monticelli et al. (1990) também sugeriram que a solução do sistema linear resultante da eliminação Gaussiana por blocos pode ser realizada em uma estratégia de quatro passos (Propriedade #2). Adaptando-se esta propriedade ao FMI resulta na seguinte estratégia de solução para o sistema linear (25):

- i) $\begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta}' \\ \Delta\omega' \end{bmatrix} = \mathbf{H}'(\mathbf{x}^{(\tau)})\Delta\mathbf{P}'(\mathbf{x}^{(\tau)})$;
- ii) $\Delta\mathbf{V}^{(\tau)} = \mathbf{L}^{eq}(\mathbf{x}^{(\tau)})^{-1}\Delta\mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}^{(\tau)} + \Delta\boldsymbol{\theta}', \omega^{(\tau)} + \Delta\omega', \mathbf{V}^{(\tau)})$
- iii) $\begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta}'' \\ \Delta\omega'' \end{bmatrix} = -\mathbf{H}'(\mathbf{x}^{(\tau)})^{-1}\mathbf{N}''(\mathbf{x}^{(\tau)})\Delta\mathbf{V}^{(\tau)}$
- iv) $\begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta}^{(\tau)} \\ \Delta\omega^{(\tau)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta}' \\ \Delta\omega' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta}'' \\ \Delta\omega'' \end{bmatrix}$

A propriedade #3 definida por Monticelli et al. (1990) estabelece que a correção angular adicional $(-\mathbf{H}(\mathbf{x}^{(\tau)})^{-1}\mathbf{N}(\mathbf{x}^{(\tau)})\Delta\mathbf{V}^{(\tau)})$ é automaticamente considerada na próxima iteração ($\tau + 1$) se os resíduos de potência ativa e reativa são atualizados de forma sucessiva. No domínio do FMI, há duas correções para o algoritmo de quatro passos: $\Delta\boldsymbol{\theta}''$ e $\Delta\omega''$. Consequentemente, expandindo-se a propriedade #3 para o FMI obtém-se o seguinte algoritmo iterativo:

- i) $\begin{bmatrix} \Delta\theta' \\ \Delta\omega' \end{bmatrix} = \mathbf{H}'(\mathbf{x}^{(\tau)})^{-1} \Delta\mathbf{P}'(\mathbf{x}^{(\tau)});$
 ii) $\begin{bmatrix} \theta^{(\tau+1)} \\ \omega^{(\tau+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^{(\tau)} \\ \omega^{(\tau)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\theta' \\ \Delta\omega' \end{bmatrix};$
 iii) $\Delta\mathbf{V}^{(\tau)} = \mathbf{L}^{eq}(\mathbf{x}^{(\tau)})^{-1} \Delta\mathbf{Q}(\theta^{(\tau+1)}, \omega^{(\tau+1)}, \mathbf{V}^{(\tau)});$
 iv) $\mathbf{V}^{(\tau+1)} = \mathbf{V}^{(\tau)} + \Delta\mathbf{V}^{(\tau)}.$

A propriedade #4 definida por Monticelli et al. (1990) estabelece que a variante BX do FDR (Van Amerongen, 1989) pode ser obtida calculando-se $\mathbf{H}(\mathbf{x}^{(0)})$ and $\mathbf{L}^{eq}(\mathbf{x}^{(0)})$ para o fluxo de potência convencional no *flat-start* sob as seguintes condições: (i) rede com topologia radial; (ii) redes malhadas com relação R/X homogênea. Consequentemente, as matrizes $\mathbf{H}(\mathbf{x}^{(0)})$ e $\mathbf{L}^{eq}(\mathbf{x}^{(0)})$ tornam-se iguais as matrizes \mathbf{B}' e \mathbf{B}'' , respectivamente, da variante BX do FDR. Monticelli et al. (1990) também demonstraram que a variante XB (Stott e Alsac, 1974) do FDR pode ser obtida a partir do Jacobiano do fluxo de potência convencional. A derivação desta variante é obtida considerando-se $\mathbf{L}(\mathbf{x}^{(\tau)})$ como bloco pivotal na eliminação Gaussiana por blocos. Infelizmente, a estratégia de desacoplamento proposta pelos autores não foi capaz de obter uma matriz $\mathbf{L}^{eq}(\mathbf{x}^{(0)})$ esparsa com uma fórmula analítica fechada para os seus elementos de acordo com a Propriedade #4 para o FDR convencional (Monticelli et al., 1990). Apesar disso, ainda é útil desenvolver um FDR para microrredes ilhadas, pois o número de FLOPs no MNR (*Float Point Operations*) é maior do que aquele relacionado com o Fluxo com Múltiplas Barras Infinitas Desacoplado Rápido (FMI-DR). Este fato é devido ao NRM exigir o cálculo do Jacobiano e a solução de um sistema linear ($8N^{no^3}$ FLOPs) em cada iteração enquanto o FMI-DR exige apenas dois produtos de matriz por vetor por iteração:

- i) $\mathbf{H}'(\mathbf{x}^{(0)})^{-1} \Delta\mathbf{P}'(\mathbf{x}^{(\tau)})$ ($(N^{no} + 1)^2$ FLOPs);
 ii) $\mathbf{L}^{eq}(\mathbf{x}^{(0)})^{-1} \Delta\mathbf{Q}(\theta^{(\tau+1)}, \omega^{(\tau+1)}, \mathbf{V}^{(\tau)})$ (N^{no^2} FLOPs).

Desta forma, o número de FLOPs do FMI-DR é da ordem de $2N^{no^2}((N^{no} + 1)^2 + N^{no^2}) = 2N^{no^2} + 2N^{no} + 1 \approx 2N^{no^2}$.

Se o FMI-DR é implementado em linguagens de computação científica tais como MATLAB e Julia, então os produtos de uma matriz por um vetor serão realizados usando-se técnicas de processamento paralelo automáticas nativas destas linguagens. Consequentemente, o desempenho computacional do FMI-DR tende a ser melhorado devido a paralelização automática do código em linguagens modernas de computação científica. É importante enfatizar que o FMI-DR é um MNR estacionário (Jacobiano constante calculado em $\mathbf{x}^{(0)}$). Portanto, FMI-DR não possui a convergência quadrática do MNR. Consequentemente, a economia no custo computacional do FMI-DR com relação ao FMI via MNR (FMI-NR) será preservada somente se o número de iterações do FMI-DR não for muito elevado.

O algoritmo conceitual do FMI-DR é apresentado na caixa de texto seguinte, na qual:

$\mathbf{x}^{(0)} = \begin{bmatrix} \mathbb{0} \\ \boldsymbol{\mu} \\ 1 \end{bmatrix}$ é o vetor associado com a condição de *flat-start*.

$\mathbf{B}'_{N^{no} \times N^{no}}$ é uma matriz cujos elementos são definidos como:
 $B'_{kk} = -\sum_{m \in \Omega_k} b_{km}$

$B'_{km} = b_{km}$
 $\tilde{\lambda}^{P\omega} = \lambda^{P\omega}(\mathbf{x}^{(0)})$ é um vetor $N^{no} \times 1$ cujos elementos são dados por:

$$\tilde{\lambda}_k^{P\omega} = K d_k^p P d_k^{nom} + \frac{1}{K g_k^p} \forall k = 1, \dots, N^{no} \quad (32)$$

$\mathbf{B}''_{N^{no} \times N^{no}}$ é uma matriz cujos elementos são definidos como:

$$B''_{kk} = -\sum_{m \in \Omega_k} b_{km} - 2b_k^{sh}$$

$$B''_{km} = b_{km}$$

$\tilde{\Lambda}^{QV}_{N^{no} \times N^{no}} = \Lambda^{QV}(\mathbf{x}^{(0)})$ é uma matriz diagonal com elementos dados por:

$$\tilde{\Lambda}_{kk}^{QV} = \beta_k Q d_k^{nom} + \frac{1}{K g_k^Q} \forall k = 1, \dots, N^{no} \quad (33)$$

i) Construir a matriz $\mathbf{H}'(\mathbf{x}^{(0)}) = \begin{bmatrix} \mathbf{B}' & \tilde{\lambda}^{P\omega} \\ \mathbf{e}_r^T & 0 \end{bmatrix}$

ii) Calcular $\mathbf{H}'(\mathbf{x}^{(0)})^{-1}$

iii) Construir a matriz $\mathbf{L}^{eq}(\mathbf{x}^{(0)}) = \mathbf{B}'' + \tilde{\Lambda}^{QV}$

iv) Calcular $\mathbf{L}^{eq}(\mathbf{x}^{(0)})^{-1}$

v) Inicialização das variáveis:

$$\tau = 0, \Delta x^{max} = \infty \text{ and } \mathbf{x}^{(\tau)} = [\mathbb{0} \quad \boldsymbol{\mu} \quad 1]^T$$

vi) Repita os passos (vii)-(xiv) enquanto $\tau < \tau^{max}$ e $\Delta x^{max} \geq \varepsilon$.

vii) Calcule os resíduos de potência ativa e ângulo:

$$\Delta\mathbf{P}(\mathbf{x}^{(\tau)}) = \mathbf{P}\mathbf{g}(\boldsymbol{\omega}^{(\tau)}) - \mathbf{P}\mathbf{d}(\mathbf{V}_k^{(\tau)}, \boldsymbol{\omega}^{(\tau)}) - \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}^{(\tau)}, \mathbf{V}^{(\tau)})$$

$$\Delta\Theta_r(\mathbf{x}^{(\tau)}) = \theta_r^{esp} - \theta_r^{(\tau)}$$

viii) Calcular as correções na frequência e nos ângulos das tensões:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta' \\ \Delta\omega' \end{bmatrix} = [\mathbf{H}'(\mathbf{x}^{(0)})]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{P}(\mathbf{x}^{(\tau)}) \\ \Delta\Theta_r(\mathbf{x}^{(\tau)}) \end{bmatrix}$$

ix) Atualizar os ângulos e a frequência angular:

$$\boldsymbol{\theta}^{(\tau+1)} = \boldsymbol{\theta}^{(\tau)} + \Delta\boldsymbol{\theta}^{(\tau)}$$

$$\boldsymbol{\omega}^{(\tau+1)} = \boldsymbol{\omega}^{(\tau)} + \Delta\boldsymbol{\omega}^{(\tau)}$$

x) Calcular os resíduos de potência ativa considerando-se os novos valores de ângulo e frequência:

$$\Delta\mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}^{(\tau+1)}, \mathbf{V}^{(\tau)}, \boldsymbol{\omega}^{(\tau+1)}) = \mathbf{Q}\mathbf{g}(\mathbf{V}^{(\tau)}) - \mathbf{Q}\mathbf{d}(\mathbf{V}_k^{(\tau)}, \boldsymbol{\omega}^{(\tau+1)}) - \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}^{(\tau+1)}, \mathbf{V}^{(\tau)})$$

xi) Calcular correções de magnitude de tensão:

$$\Delta\mathbf{V}^{(\tau)} = [\mathbf{L}^{eq}(\mathbf{x}^{(0)})]^{-1} \Delta\mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}^{(\tau+1)}, \mathbf{V}^{(\tau)}, \boldsymbol{\omega}^{(\tau+1)})$$

xii) Atualizar os módulos das tensões: $\mathbf{V}^{(\tau+1)} = \mathbf{V}^{(\tau)} + \Delta\mathbf{V}^{(\tau)}$

xiii) Cálculo de Δx^{max} :

$$\Delta V^{max} = \max\{|\Delta V_k^{(\tau)}|, \forall k = 1, \dots, N^{bus}\}$$

$$\Delta x^{max} = \max\{\Delta V^{max}, |\Delta\omega^{(\tau)}|\}$$

xiv) Atualização do contador: $\tau = \tau + 1$.

5. FLUXO DE POTÊNCIA PROBABILÍSTICO BASEADO NA SIMULAÇÃO MONTE CARLO

O FMI-NR e o FMI-DR foram incorporados em FPP baseado na SMC para estimar índices probabilísticos (por exemplo, valores esperados, quartis, distribuições de probabilidade, desvios padrões e riscos de violações) associados com métricas de desempenho da microrrede, tais como: perdas ativas e reativas, frequência e magnitudes das tensões. Estes índices probabilísticos foram estimados considerando-se incertezas devido a erros de previsão de carga e disponibilidade dos equipamentos (transformadores, GD e seções dos alimentadores). As variações no pico de carga devido aos erros de previsão foram modeladas usando-se as distribuições normais definidas em (34) e (35).

$$Pd_k^{(i)} = Pd_k^{nom} + \mathcal{N}(0, \sigma_k^P) \quad (34)$$

$$Qd_k^{(i)} = Pd_k^{nom} + \mathcal{N}(0, \sigma_k^Q) \quad (35)$$

Onde:

$$\sigma_k^P = (Pd_k^{nom} \times \varepsilon_{\%}^P) / 300\% \quad (36)$$

$$\sigma_k^Q = (Qd_k^{nom} \times \varepsilon_{\%}^Q) / 300\% \quad (37)$$

$\varepsilon_{\%}^P$ ($\varepsilon_{\%}^Q$) é o erro máximo de previsão da carga ativa (reativa).

$Pd_k^{(i)}$ e $Qd_k^{(i)}$ são os valores amostrados das cargas ativa e reativa, respectivamente, no nó k para o estado i da microrrede.

$\mathcal{N}(0, \sigma)$ é um número aleatório com distribuição Gaussiana com media nula e desvio padrão σ .

As indisponibilidades dos equipamentos foram representadas no FPP, baseado na SMC, através do modelo Markoviano de dois estados definido em (38).

$$s_j^{(i)} = \begin{cases} 0 \text{ (reparo)}, & \text{se } 0 \leq X^{uni} \leq U_{c_j} \\ 1 \text{ (operação)}, & \text{se } U_{c_j} \leq X^{uni} \leq 1.0 \end{cases} \quad (38)$$

Onde: X^{uni} é um número aleatório com distribuição uniforme, U_{c_j} é a indisponibilidade do componente j e $s_j^{(i)}$ é o status do component j no estado i da microrrede.

O fluxograma do FPP baseado na SMC é apresentado na Fig. 1. A descrição detalhada do FPP usado neste artigo é apresentada na referência (Silva, 2020b).

6. RESULTADOS DOS TESTES

O FMI-DR foi testado em microrredes de 33 nós (Hameed et al., 2019; Silva et al., 2020b) e 310 nós (IEEE PES, 2017; Silva et al., 2020b). Estas microrredes serão chamadas de MR33 e MR310, respectivamente, daqui por diante. Todos os geradores da MR33 e da MR310 são operados de acordo com os controles *droop* Pw e QV. Desta forma, as cargas e as perdas são alocadas entre todos os geradores das microrredes com base em (5) e (6). Portanto, tem-se um fluxo de potência com múltiplas barras infinitas na MR33 e na MR310. As constantes do controle *droop* e os dados do FPP associados com a MR33 e a MR310 podem ser encontrados na referência (Silva et al.,

2020b). A MR33 foi usada nos estudos de FMI determinístico (sem incertezas), pois esta microrrede é amplamente usada na literatura sobre estudos de planejamento em microrredes. Por outro lado, a MR310 foi usada no FPP, visto que é mais fácil avaliar o custo computacional do FPP em sistemas de grande porte. Os algoritmos de FMI testados na MR33 e na MR310 foram implementados usando-se o MATLAB devido a facilidade e eficiência desta linguagem para realizar operações diretas com matrizes e vetores. Estas operações são a principal componente do custo computacional do FMI-DR.

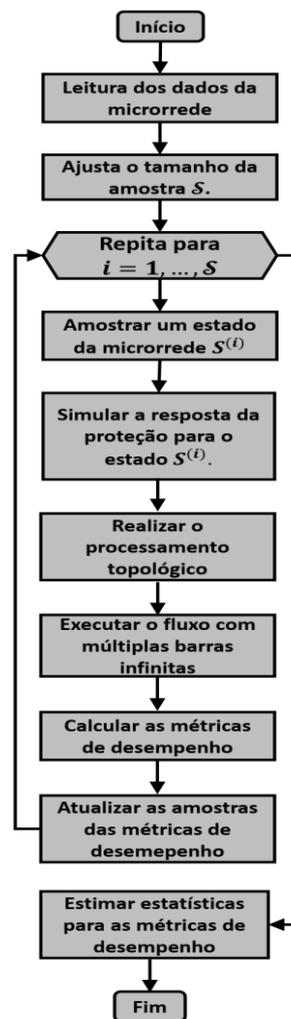


Fig. 1 Fluxograma do FPP baseado na SMC.

A Fig. 2 mostra os ângulos e as magnitudes das tensões na MR33 obtidas pelo FMI-NR, FMI-DR e FMI baseado na análise nodal (FMI-AN) (Silva et al., 2020a). A Tabela 1 apresenta as perdas ativas P^{loss} , as perdas reativas Q^{loss} , frequência, o número de iterações e o tempo de CPU associados com estes métodos. A partir da Fig. 2 e da Tabela 1, pode-se observar que o FMI-DR tem a mesma precisão que o FMI-NR e o FMI-AN. Além disso, pode-se notar que o FMI-NR e o FMI-AN foram superados pelo FMI-DR em termos de tempo de CPU. Este resultado é devido ao baixo custo computacional da inversão matricial em microrredes de pequeno porte. Além disso, o custo computacional para determinar a frequência angular, através da solução de um subproblema não-linear, no FMI-AN é significante em

microrredes de pequeno porte (Silva et al., 2020a). Porém, o custo computacional do FMI-AN será melhor em microrredes de grande porte, pois a matriz de iteração do método do ponto-fixa é esparsa e constante (Silva et al., 2020a).

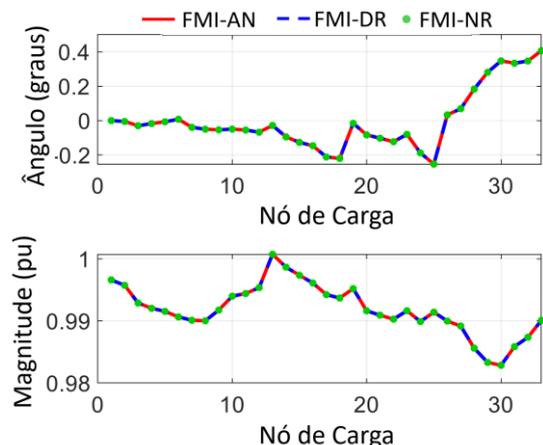


Fig. 2 Ângulos e magnitudes das tensões na MR33.

Tabela 1. Perdas, frequência angular, número de iterações e tempo de CPU para a MR33.

Parâmetro	FMI-AN	FMI-DR	FMI-NR
ω (pu)	0,919879	0,919879	0,919879
P^{loss} (pu)	0,034486	0,034486	0,034486
Q^{loss} (pu)	0,028321	0,028321	0,028321
Nº de iterações	8	5	4
Tempo (s)	0,0630	0,0352	0,0625

O FPP na MR310 foi realizado considerando-se que o tamanho da amostra na SMC é 50.000. A Tabela 2 apresenta algumas estatísticas para as magnitudes das tensões nos P1 (referência angular), S47, S52 e S239 da MR310. Esta tabela também apresenta as perdas ativas e reativas totais. A Tabela 2 mostra apenas um valor para cada estatística, pois as três versões do FMI obtiveram os mesmos valores para todas as estatísticas. Consequentemente, pode-se concluir que o FMI-DR apresenta boa precisão para estudos de FPP.

Tabela 2. Estatísticas geradas pelo FPP na MR310.

Nós & Perdas	Quartil Inferior	Mediana	Quartil Superior	Média	Desvio Padrão
Nó P1	0,9871	0,9907	0,9937	0,9900	0,0051
Nó S47	0,9542	0,9582	0,9616	0,9575	0,0059
Nó S52	0,9549	0,9588	0,9621	0,9581	0,0058
Nó S239	0,9534	0,9586	0,9635	0,9581	0,0080
P^{loss} (pu)	0,2912	0,3000	0,3092	0,3017	0,0196
Q^{loss} (pu)	1,8523	1,9139	1,9790	1,9209	0,1079

A Fig. 3 mostra os riscos de violação de tensão na MR310 estimados pelo FPP baseado nas três versões do FMI. Estes riscos foram estimados considerando-se um intervalo admissível de $[0,95,1,05]$ pu para as magnitudes das tensões. A partir desta figura, pode-se concluir que os riscos estimados pelo FPP baseado no FMI-DR são exatamente os mesmos daqueles calculados pelos FPPs fundamentados no FMI-AN e FMI-NR. Além disso, os riscos de violação (tensão e/ou

frequência) estimados pelo FMI-AN, FMI-DR e FMI-NR são iguais a 18,78%. Este risco foi calculado assumindo-se um intervalo factível de $[59,8;60,5]$ Hz e uma frequência nominal de 60 Hz.

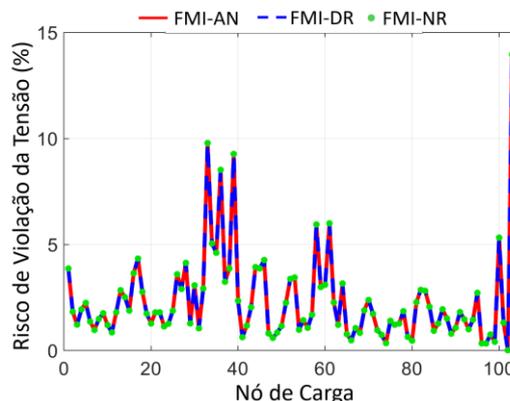


Fig. 3 Riscos de violações nas tensões para a MR310.

A Fig. 4 mostra a Função Densidade de Probabilidade (FDP) para a frequência angular na MR310 obtidas pelos FPP baseados no FMI-AN, FMI-DR e FMI-NR. A partir desta figura, pode-se concluir que a FDP gerada pelo FMI-DR corresponde precisamente aquelas produzidas pelo FMI-AN e pelo FMI-NR. Este resultado demonstra novamente que o FMI-DR tem boa precisão para estudos de FPP em microrredes ilhadas.

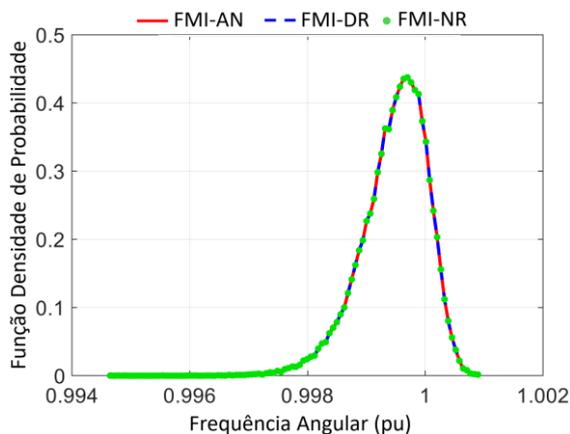


Fig. 4 FDP para a frequência angular na MR310.

Os tempos de CPU para a três versões do FPP (FMI-AN, FMI-DR e FMI-NR) na MR310 são apresentados na Tabela 3. Esta tabela também mostra os ganhos (tempo do FMI-NR dividido pelo tempo de um método) e os tempos percentuais (inverso do ganho em porcentagem) com relação ao FMI-NR. A partir da Tabela 3, pode-se concluir que o FPP proposto baseado no FMI-DR obteve economias significativas no custo computacional com relação ao MNR. Por exemplo, o custo computacional do FMI-DR é apenas 5,3379% daquele associado com o FMI-NR. Em outras palavras, o FMI-DR é 18,7379 vezes mais rápido do que o FMI-NR. Entretanto, o custo computacional do FMI-DR é maior do que aquele referente ao FMI-AN. Por exemplo, o FMI-AN é cerca de 4,9769 vezes mais rápido do que o FMI-DR. Este fato indica que há oportunidades para melhoramentos e novos

desenvolvimentos no fluxo de potência desacoplado rápido para microrredes operando no modo ilhado.

Tabela 3. Custos computacionais dos algoritmos de FMI.

Método usado no FPP	Tempo (s)	Ganhos	Tempos (%)
FMI-AN	705,7218	93,2365	1,0725
FMI-DR	3.512,2929	18,7339	5,3379
FMI-NR	65.799,0353	1,0000	100,0000

7. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um algoritmo de fluxo de potência desacoplado rápido para microrredes operando no modo ilhado. O algoritmo foi desenvolvido com base na estrutura teórica para os métodos desacoplados rápidos convencionais proposta por Monticelli et al. (1990). O fluxo desacoplado rápido proposto foi inserido em um fluxo de potência probabilístico baseado na Simulação Monte Carlo para avaliar a sua precisão e custo computacional em estudos de microrredes sob incerteza. As incertezas consideradas neste estudo foram os erros de previsão de carga e as falhas nos equipamentos da microrrede. Os resultados dos testes revelaram que o método desacoplado rápido para microrredes ilhadas é tão preciso quanto o Método de Newton-Raphson e obtém reduções expressivas no custo computacional. Contudo, o custo computacional do método desacoplado rápido ainda é superior ao do método do ponto-fixa baseado na análise nodal. Este resultado indica que é possível melhorar o método desacoplado rápido para obter um melhor desempenho computacional com relação a outros métodos de fluxo de potência para microrredes ilhadas. Após a realização destas melhorias, os autores esperam disponibilizar o código fonte do FMI-DR para que se tenha um programa análogo ao OpenDSS para realizar estudos de fluxo em microrredes ilhadas.

REFERÊNCIAS

Abdelaziz, M.M.A., Farag, H.E., El-Saadany, E.F., e Mohamed, Y.A.I. (2013) A novel and generalized three-phase power flow algorithm for islanded microgrids using a newton trust region method. *IEEE Trans. Power Systems*. vol. 28(1) Fevereiro, pp. 190-201.

Araújo, J.R., Silva, E.N.M., Rodrigues, A.B. e Silva, M.G. (2017) Assessment of the Impact of Microgrid Control Strategies in the Power Distribution Reliability Indices. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. vol. 28 Janeiro, pp 271–283.

Chagas, E. A., Rodrigues, A. B. e Silva, M. G. (2020) Minimization of Risks of Voltage and Frequency Violations in Islanded Microgrids using Robust Probabilistic Optimal Power Flow. Em: VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2020), 25-28 de Agosto de 2020, Virtual, Disponível em: <<https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1>>, [Acessado em 20 de Fevereiro de 2022]

Hameed, F., Hosani, M.A. e Zeineldin, H.H. (2019) A Modified Backward/Forward Sweep Load Flow Method for Islanded Radial Microgrids. *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 10(1) Janeiro, pp. 910-918.

Hatziaargyriou, N.D. (2013) *Microgrids architectures and control*. London: Wiley.

IEEE PES (2017) IEEE PES Test Feeder. [Online] Disponível em: <<https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>> [Acessado em 26 Fevereiro 2022].

Jabr, R.A., Dzafic, I. e Pal. B.C, (2018) Compensation in Complex Variables for Microgrid Power Flow. *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 33(3) Maio, pp. 3207-3209.

Monticelli, A., Garcia, A. e Saavedra, O. R. (1990) Fast Decoupled Load Flow: Hypothesis, Derivations and Testing. *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 5(4) Novembro, pp. 1425-1431.

Mumtaz, F., Syed, M.H., Al-Hosani, M. e Zeineldin, H.H. (2016) A novel approach to solve power flow for islanded microgrids using modified Newton Raphson with droop control of DG. *IEEE Trans. Sustainable Energy*. vol. 7(2) Abril, pp. 493-503.

Nassar, M.E. e Salama, M.M.A. (2017) A novel branch-based power flow algorithm for islanded AC microgrids. *Electric Power Systems Research*. vol. 146 Maio, pp. 51–62.

Nazari, A.A., Keypour, R., Beiranvand, M.H. e Amjady, N. (2020) A decoupled extended power flow analysis based on Newton-Raphson method for islanded microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. vol. 117 Maio, e105705.

Pompodakis, E.E., Kryonidis, G.C. e Alexiadis, M.C. (2020) A Comprehensive Load Flow Approach for Grid-Connected and Islanded AC Microgrids. *IEEE Trans. on Power Systems*. vol. 35(2) Março, pp. 1143-1155.

Prusty, B.R. e Jena, D. (2017) A critical review on probabilistic load flow studies in uncertainty constrained power systems with photovoltaic generation and a new approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. vol. 69 Março, pp. 1286–1302.

Silva, E.N.M., Rodrigues, A.B. e Silva, M.G. (2020a) Multi-Slack Power Flow for Islanded Microgrids with Radial and Meshed Topologies. *IET Generation, Transmission & Distribution*. vol. 14(13) Julho, pp. 2498-2509.

Silva, E.N.M., Chagas, E.A., Rodrigues, A.B., e Silva, M.G. (2020b) Linear Probabilistic Power Flow for Islanded Microgrids. Em: *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, 18-21 de Agosto de 2020, Liege Belgium, Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/PMAPS47429.2020.9183485>>, [Acessado em 20 de Fevereiro de 2022]

Stott, B. e Alsac, O. (1974) Fast Decoupled Load Flow, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*. vol. PAS-93(3) Maio, pp 859-869.

Van Amerongen, R. A. M. (1989) A General Purpose Version of the Fast Decoupled Load Flow. *IEEE Trans. on Power Systems*. vol. 4(2) Maio, pp. 760-770.