

Método Distflow Generalizado para Sistemas de Distribuição de Energia Desbalanceados

Hugo A. Ruiz, Jhon F. Franco, Carlos R.M. Rocha, Edgar M. Carreno, José R.S. Mantonani

Resumo—O método Distflow faz parte dos métodos de varredura desenvolvidos exclusivamente para realizar estudos de fluxo de carga em sistemas elétricos de potência radiais ou fracamente malhados. Embora seja um dos métodos mais referenciados na literatura especializada, não existe uma versão trifásica deste método que represente as características desbalanceadas dos sistemas de distribuição de energia elétrica, limitando assim, a sua aplicação no desenvolvimento de novas técnicas de análise, controle e planejamento na área da engenharia elétrica. Neste trabalho é apresentada uma versão generalizada do método Distflow que usa um novo equacionamento e um procedimento simplificado para determinar o ponto de operação do sistema. O método proposto é uma versão estendida da abordagem balanceada do método Distflow. Adicionalmente, é desenvolvido um método de compensação de reativos que permite modelar a presença de Geradores Distribuídos com controle de tensão. O método generalizado proposto é testado nos sistemas IEEE-37 e IEEE-123 nós. Estes resultados são comparados com os resultados obtidos com o método de soma de correntes.

Index Terms—Sistemas de distribuição de energia desbalanceados, Fluxo de carga, Método Distflow, Compensação de reativos.

I. INTRODUÇÃO

A análise de fluxo de carga é uma das principais ferramentas usadas nos sistemas elétricos de potência (SEP) para avaliar o seu comportamento em regime permanente e para resolver problemas relacionados com a operação e o planejamento das redes elétricas. Tradicionalmente, o problema de fluxo de carga nos sistemas de transmissão de energia elétrica (STEE) tem sido resolvido através do método de Newton e as suas versões desacopladas [1]-[3]. No entanto, no caso dos sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE), estes métodos não podem ser diretamente aplicados devido às características que os diferenciam dos STEE, pois além da topologia radial ou fracamente malhada, os SDEE são redes trifásicas desbalanceadas, com presença de cargas distribuídas e desbalanceadas, com ramais multifásicos ao longo do alimentador principal, com linhas heterogêneas, não transpostas, com acoplamentos mútuos e com ramais de baixa relação R/X .

Apesar que os métodos de Newton foram desenvolvidos inicialmente para redes trifásicas, representadas através da sua rede de sequência positiva, existem versões estendidas dos

métodos de Newton para resolver o fluxo de carga trifásico em SDEE [4]-[7]. Além destas abordagens, têm sido propostos outros métodos exclusivos para calcular o ponto de operação dos SDEE balanceados, entre os que sobressaem o método de soma de correntes apresentado por [8], o método de soma de potências proposto por [9] e o método Distflow apresentado por [10]. Em geral, estes métodos apresentam resultados satisfatórios quando aplicados em sistemas fracamente malhados, usando procedimentos simplificados para determinar o ponto de operação do sistema, sem fazer uso matrizes de grande porte na sua formulação, o que representa uma vantagem quando comparados com os métodos de Newton. Porém, diferente da versão desbalanceada do método de soma de correntes proposta por [11], na formulação desbalanceada destes métodos são desconsiderados os efeitos dos acoplamentos mútuos entre as fases, o que se torna numa limitante destas abordagens [12].

Uma busca detalhada na literatura especializada mostra que o método Distflow tem sido usado em várias aplicações em SDEE, tais como, alocação ótima de bancos de capacitores [13], alocação de geradores distribuídos (GDs) [14], reconfiguração de SDEE [15], estimação de estado [16], entre outros. Porém, nestas abordagens, modela-se o SDEE como sendo uma rede balanceada.

Considerando que os resultados do fluxo de carga são o ponto de início de outras análises para planejamento, operação e controle nos SEP, e devido à importância de modelar adequadamente o comportamento desbalanceado dos SDEE, neste trabalho são propostas duas versões generalizadas do método Distflow que consideram na sua formulação os acoplamentos mútuos entre as fases e que modelam a presença de GDs na rede. Os métodos propostos são validados através das simulações efetuadas em sistemas testes e na comparação dos resultados obtidos com o métodos de soma de correntes.

II. MÉTODO DISTFLOW PARA SDEE BALANCEADOS

O método Distflow faz parte dos métodos de varredura desenvolvidos exclusivamente para resolver o problema de fluxo de carga em sistemas elétricos radiais ou fracamente malhados. Na literatura especializada, é possível encontrar duas versões do método Distflow. Na versão apresentada em [10] é proposto um procedimento iterativo que compreende a execução de uma varredura à jusante junto com a resolução de um sistema não-linear de equações através do método de Newton. Por outro lado, como uma alternativa ao procedimento anterior, é usada em [16]-[17] uma versão Backward/Forward do método Distflow, onde as grandezas do sistema são atualizadas exclusivamente por um procedimento

H.A. Ruiz. DAELE-Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira, PR, 85884-000, e-mail: hugoflorez@utfpr.edu.br

E.M. Carreno - C.R.M. Rocha. CECE-Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Foz do Iguaçu, PR, 85870-650, email: emfra@ieee.org, c.rocha@ieee.org

J.F. Franco - J.R.S. Mantovani. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Ilha Solteira, SP, 15385-000, email: johnfranco@dee.feis.unesp.br, mant@dee.feis.unesp.br

de varredura. Esta abordagem é mais simples e vantajosa devido a que não é necessária a construção de matrizes de grande porte, nem de procedimentos de inversão de matrizes para a resolução do sistema de equações não-lineares da primeira versão. Os principais aspectos da versão Backward/Forward são mostrados a seguir.

A. Equacionamento do método Distflow

A versão Backward/Forward do método Distflow usa um conjunto de equações para cada trecho ij da rede, que representa a operação em regime permanente de um SDEE e que considera a presença de GDs. Por simplicidade, neste trabalho é adotado um equacionamento diferente da formulação usada em [16]-[17]. Assim, de acordo com a Fig. 1, na varredura Backward no método Distflow os fluxos de potência P_{ij} e Q_{ij} e a tensão V_j^2 , podem ser calculados como segue:

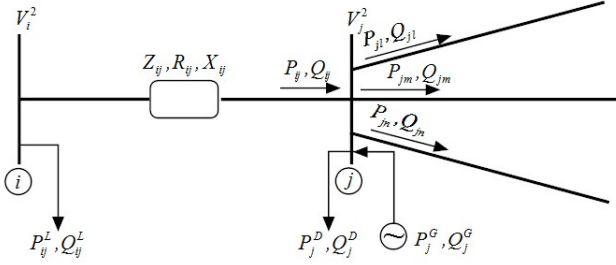


Figura 1. Grandezas à jusante do trecho ij de um SDEE

$$P_{ij} = \sum_{jl \in \Omega_L} (P_{jl} + P_{jl}^L) - \sum_{mj \in \Omega_L} P_{mj} + P_j^D - P_j^G \quad (1)$$

$$Q_{ij} = \sum_{jl \in \Omega_L} (Q_{jl} + Q_{jl}^L) - \sum_{mj \in \Omega_L} Q_{mj} + Q_j^D - Q_j^G \quad (2)$$

$$V_i^2 = V_j^2 + 2(R_{ij}P_{ij} + X_{ij}Q_{ij}) + Z_{ij}^2 \left(\frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_j^2} \right) \quad (3)$$

Onde as perdas de potência do trecho ij são dadas por:

$$P_{ij}^L = R_{ij}^2 \left(\frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2} \right) \quad (4)$$

$$Q_{ij}^L = X_{ij}^2 \left(\frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_j^2} \right) \quad (5)$$

Similarmente, na varredura Forward os fluxos de potência P_{ij} e Q_{ij} e a tensão V_j^2 são calculadas como segue:

$$P_{ij} = \sum_{il \in \Omega_L} (P_{il} - P_{il}^L) - \sum_{im \in \Omega_L} P_{im} - P_i^D + P_i^G \quad (6)$$

$$Q_{ij} = \sum_{il \in \Omega_L} (Q_{il} + Q_{il}^L) - \sum_{im \in \Omega_L} Q_{im} - Q_i^D + Q_i^G \quad (7)$$

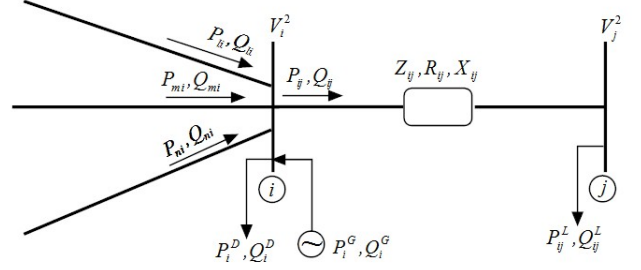


Figura 2. Grandezas à montante do trecho ij de um SDEE

$$V_j^2 = V_i^2 + 2(R_{ij}P_{ij} + X_{ij}Q_{ij}) + Z_{ij}^2 \left(\frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2} \right) \quad (8)$$

Onde as perdas de potência do trecho ij são dadas por:

$$P_{ij}^L = R_{ij}^2 \left(\frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2} \right) \quad (9)$$

$$Q_{ij}^L = X_{ij}^2 \left(\frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2} \right) \quad (10)$$

Assim, para determinar o ponto de operação do sistema faz-se necessário realizar os seguintes passos:

- i. **Dados de entrada.** Valores dos parâmetros do sistema, as potências demandadas e a tensão da subestação V_{SE} .
- ii. **Ordenamento nodal do sistema.** Através de um ordenamento nodal em camadas são traçados os caminhos desde a subestação até os nós da última camada.
- iii. **Início do processo iterativo.** Inicializar o contador de iterações ($k = 0$), fazer as tensões dos nós da última camada iguais à V_{SE}^2 e para cada trecho ij fazer $P_{ij}^L = 0$ e $Q_{ij}^L = 0$. Ir ao passo iv.
- iv. **Varredura Backward.** Para cada trecho ij calcular $P_{ij}^{(k)}$, $Q_{ij}^{(k)}$ e $V_i^{2(k)}$ usando (1)-(5).
- v. **Varredura Forward.** Na subestação, fazer $V_i^{2(k)} = V_{SE}^2$. Seguidamente, para cada trecho ij calcular $P_{ij}^{(k)}$, $Q_{ij}^{(k)}$ e $V_j^{2(k)}$ usando (6)-(10).
- vi. **Critério de convergência.** Nas barras da última camada, verificar se $\max |P_{ij}^{(k)} - P_{ij}^{(k-1)}| \leq tol$, então pare e ir ao passo vii. Do contrário, fazer $k = k + 1$ e ir ao passo iv.
- vii. **Apresentação dos resultados.**

III. FORMULAÇÃO GENERALIZADA PROPOSTA DO MÉTODO DISTFLOW

A formulação generalizada proposta do método Distflow considera no equacionamento, a matriz de impedâncias $[Z]$, obtida da redução de Kron do sistema a quatro fios, que contém as impedâncias próprias e os acoplamentos mútuos entre as fases, tal como se mostra nas subseções seguintes.

A. Módulo de tensão no trecho ij

A expressão fasorial para calcular a queda de tensão no trecho ij é dada por:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_{jA} \\ \vec{V}_{jB} \\ \vec{V}_{jC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{V}_{iA} \\ \vec{V}_{iB} \\ \vec{V}_{iC} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{ijAA} & Z_{ijAB} & Z_{ijAC} \\ Z_{ijBA} & Z_{ijBB} & Z_{ijBC} \\ Z_{ijCA} & Z_{ijCB} & Z_{ijCC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{I}_{ijA} \\ \vec{I}_{ijB} \\ \vec{I}_{ijC} \end{bmatrix} \quad (11)$$

De acordo com a expressão anterior e tomando como referência a fase A do sistema, para calcular a tensão $\vec{V}_{jA}$ propõe-se, por simplicidade, o circuito equivalente ilustrado na Fig. 3, que considera duas barras intermediárias i' e j' no trecho ij .

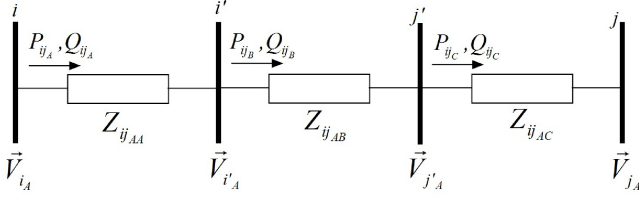


Figura 3. Circuito equivalente entre os nós ij

Expressando a equação da fase A em função dos fluxos de potência do trecho ij , tem-se:

$$\vec{V}_{i'A} = \vec{V}_{iA} - Z_{ijAA} \left(\frac{P_{ijA} + jQ_{ijA}}{\vec{V}_{iA}} \right)^* \quad (12)$$

$$\vec{V}_{j'A} = \vec{V}_{i'A} - Z_{ijAB} \left(\frac{P_{ijB} + jQ_{ijB}}{\vec{V}_{iB}} \right)^* \quad (13)$$

$$\vec{V}_{jA} = \vec{V}_{j'A} - Z_{ijAC} \left(\frac{P_{ijC} + jQ_{ijC}}{\vec{V}_{iC}} \right)^* \quad (14)$$

Considerando que $Z_{ijAA} = R_{ijAA} + jX_{ijAA}$, $\vec{V}_{iA} = V_{iA} \angle \theta_{iA}$ e $\vec{V}_{i'A} = V_{i'A} \angle \theta_{i'A}$, após simplificar a equação (12), obtém-se:

$$V_{i'A}^2 = V_{iA}^2 - 2(R_{ijAA}P_{ijA} + X_{ijAA}Q_{ijA}) + Z_{ijAA}^2 \left(\frac{P_{ijA}^2 + Q_{ijA}^2}{V_{iA}^2} \right)$$

No entanto, para os trechos $i'j'$ e $j'j$ não é possível obter diretamente as expressões para $V_{j'}^2$ e V_j^2 , respectivamente. Portanto, de acordo com (13), as expressões do trecho $i'j'$ pode ser escrita como segue:

$$\vec{V}_{j'A} = \vec{V}_{i'A} - Z_{ijAB} \left(\frac{P_{ijB} + jQ_{ijB}}{\vec{V}_{iB}} \right)^* \left(\frac{\vec{V}_{i'A}}{\vec{V}_{i'A}} \right)^*$$

Agrupando os termos de interesse, tem-se:

$$\vec{V}_{j'A} = \vec{V}_{i'A} - Z_{ijAB} \left(\frac{P_{ijB} + jQ_{ijB}}{\vec{V}_{i'A}} \right)^* \left(\frac{\vec{V}_{i'A}}{\vec{V}_{iB}} \right)^* \quad (15)$$

Por simplicidade, para obter uma expressão análoga a (12), faz-se necessário inserir a aproximação mostrada em (16), onde a diferença angular $\theta_{iB} - \theta_{iA}$ assume-se igual à diferença angular das tensões de sequência positiva em sistemas balanceados.

$$\left(\frac{\vec{V}_{i'A}}{\vec{V}_{iB}} \right)^* \approx \frac{V_{iA}}{V_{iB}} \angle (\theta_{iB} - \theta_{iA}) \approx 1 \angle -120^\circ \quad (16)$$

Assim, substituindo (16) em (15), obtém-se:

$$\vec{V}_{j'A} = \vec{V}_{i'A} - \tilde{Z}_{ijAB} \left(\frac{P_{ijB} + jQ_{ijB}}{\vec{V}_{i'A}} \right)^* \quad (17)$$

Onde,

$$\tilde{Z}_{ijAB} = \tilde{R}_{ijAB} + j\tilde{X}_{ijAB} = Z_{ijAB} (1 \angle -120^\circ) \quad (18)$$

Portanto, da mesma forma que em (12), a partir de (17) é possível calcular a expressão para calcular $V_{j'A}^2$:

$$V_{j'A}^2 = V_{i'A}^2 - 2(\tilde{R}_{ijAB}P_{ijB} + \tilde{X}_{ijAB}Q_{ijB}) + Z_{ijAB}^2 \left(\frac{P_{ijB}^2 + Q_{ijB}^2}{V_{iB}^2} \right)$$

De forma similar, obtém-se a expressão do trecho $j'j$:

$$V_{jA}^2 = V_{j'A}^2 - 2(\tilde{R}_{ijAC}P_{ijC} + \tilde{X}_{ijAC}Q_{ijC}) + Z_{ijAC}^2 \left(\frac{P_{ijC}^2 + Q_{ijC}^2}{V_{iC}^2} \right)$$

Finalmente, a partir das expressões dos trechos ii' , $i'j'$ e $j'j$, é possível obter a expressão geral proposta do método Distflow para calcular as tensões dos trechos ij em cada fase f do sistema:

$$V_{jf}^2 = V_{if}^2 - \sum_{h \in \Omega_f} \left\{ 2(\tilde{R}_{ijfh}P_{ijh} + \tilde{X}_{ijfh}Q_{ijh}) + Z_{ijfh}^2 \left(\frac{P_{ijh}^2 + Q_{ijh}^2}{V_{ih}^2} \right) \right\} \quad (19)$$

B. Perdas de potência no trecho ij

A expressão geral para calcular as perdas de potência no trecho ij pode ser calculada como $S_{ijf}^L = (\vec{V}_{if} - \vec{V}_{jf}) \vec{I}_{ijf}^*$. De acordo com (11), esta equação pode ser expressa da seguinte forma:

$$S_{ijf}^L = \sum_{h \in \Omega_f} \left\{ Z_{ijfh} \left(\frac{P_{ijh} + jQ_{ijh}}{\vec{V}_{ih}} \right)^* \right\} \left(\frac{P_{ijf} + jQ_{ijf}}{\vec{V}_{if}} \right)$$

Simplificando a expressão anterior, tem-se:

$$S_{ijf}^L = \sum_{h \in \Omega_f} Z_{ijfh} \frac{(P_{ijh} + jQ_{ijh})^* (P_{ijf} + jQ_{ijf})}{V_{ih} V_{if} (1 \angle (\theta_{if} - \theta_{ih}))} \quad (20)$$

Da mesma forma que em (13), para simplificar a expressão anterior assume-se que a diferença angular entre θ_{if} e θ_{ih} é igual ao caso balanceado. Portanto, as perdas de potência

podem ser calculadas de forma aproximada através da seguinte expressão:

$$S_{ijf}^L = \sum_{h \in \Omega F} \tilde{Z}_{ijfh} \frac{(P_{ijh} + jQ_{ijh})^* (P_{ijf} + jQ_{ijf})}{V_{ih} V_{if}} \quad (21)$$

Simplificando (21) e separando a parte real da parte imaginária, obtêm-se as equações das perdas de potência ativa e reativa do trecho ij :

$$P_{ijf}^L = \sum_{h \in \Omega F} \left\{ \tilde{R}_{ijfh} \frac{(P_{ijf} P_{ijh} + Q_{ijf} Q_{ijh})}{V_{if} V_{ih}} - \tilde{X}_{ijfh} \frac{(Q_{ijf} P_{ijh} - P_{ijf} Q_{ijh})}{V_{if} V_{ih}} \right\} \quad (22)$$

$$Q_{ijf}^L = \sum_{h \in \Omega F} \left\{ \tilde{X}_{ijfh} \frac{(P_{ijf} P_{ijh} + Q_{ijf} Q_{ijh})}{V_{if} V_{ih}} + \tilde{R}_{ijfh} \frac{(Q_{ijf} P_{ijh} - P_{ijf} Q_{ijh})}{V_{if} V_{ih}} \right\} \quad (23)$$

C. Ângulo das tensões nodais

De acordo com a formulação mostrada em (12)-(14) e considerando as expressões em (16), obtêm-se as expressões para calcular os ângulos das tensões nodais nos trechos da Figura 3, tal como segue:

$$\theta_{i'A} = \theta_{iA} + \sin^{-1} \left(\frac{R_{ijAA} Q_{ijA} - X_{ijAA} P_{ijA}}{V_{iA} V_{i'A}} \right) \quad (24)$$

$$\theta_{j'A} = \theta_{i'A} + \sin^{-1} \left(\frac{\tilde{R}_{ijAB} Q_{ijB} - \tilde{X}_{ijAB} P_{ijB}}{V_{i'A} V_{j'A}} \right) \quad (25)$$

$$\theta_{jA} = \theta_{j'A} + \sin^{-1} \left(\frac{\tilde{R}_{ijAC} Q_{ijC} - \tilde{X}_{ijAC} P_{ijC}}{V_{j'A} V_{jA}} \right) \quad (26)$$

A partir destas equações é possível encontrar uma expressão aproximada para calcular os ângulos das tensões nodais no trecho ij , tal como segue:

$$\theta_{jf} = \theta_{if} + \sum_{h \in \Omega_f} \sin^{-1} \left(\frac{\tilde{R}_{ijfh} Q_{ijh} - \tilde{X}_{ijfh} P_{ijh}}{V_{if}^2} \right) \quad (27)$$

D. Método de compensação para inserção de GDs

Nos estudos de fluxo de carga, os GDs podem ser representados como um gerador que injeta potência ativa e reativa à rede de forma constante ou como um gerador que controla o valor da tensão na barra onde é alocado. Neste último caso, torna-se necessário desenvolver um método para representar a barra do GD como uma barra de tensão controlada (PV). De acordo com a formulação generalizada do método Distflow proposta, para determinar a injeção de potência reativa nas barras PV deve ser resolvido o seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_i^2 \\ \Delta V_m^2 \\ \vdots \\ \Delta V_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta V_i^2}{\Delta Q_i^G} & \frac{\Delta V_i^2}{\Delta Q_m^G} & \cdots & \frac{\Delta V_i^2}{\Delta Q_n^G} \\ \frac{\Delta V_m^2}{\Delta Q_i^G} & \frac{\Delta V_m^2}{\Delta Q_m^G} & \cdots & \frac{\Delta V_m^2}{\Delta Q_n^G} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\Delta V_n^2}{\Delta Q_i^G} & \frac{\Delta V_n^2}{\Delta Q_m^G} & \cdots & \frac{\Delta V_n^2}{\Delta Q_n^G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_i^G \\ \Delta Q_m^G \\ \vdots \\ \Delta Q_n^G \end{bmatrix} \quad (28)$$

Cabe salientar que os elementos matriciais mostrados em (28) podem ser calculados usando a regra da cadeia como mostrado em [10]. Usando estas aproximações é possível solucionar o sistema de equações invertindo uma matriz de termos constantes. Esta matriz pode ser calculada previamente, evitando assim, problemas de convergência.

O método de compensação de reativos proposto nas barras PV compreende os seguintes passos:

- Calcular $\Delta V_i = \max |V_{esp}^2 - V_{if}^2|$, $\forall i \in \text{nós PV}$.
- Solucionar o sistema de equações em (28) e achar o valor de ΔQ_i^G , $\forall i \in \text{nós PV}$.
- Atualizar as injeções de potência reativa usando $Q_i^{G(k)} = Q_i^{G(k-1)} + \Delta Q_i^G$, $\forall i \in \text{nós PV}$.
- Verificar se $Q_{min}^G \leq Q_i^G \leq Q_{max}^G$. Caso contrário, fazer Q_i^G igual ao limite ultrapassado.

IV. MÉTODO DISTFLOW GENERALIZADO PROPOSTO PARA SDEE DESBALANCEADOS

A versão generalizada do método Distflow proposta neste trabalho, baseia-se na versão Backward-Forward descrita na secção II. De acordo com a formulação desenvolvida e no método de compensação de reativos proposto, as equações para determinar o ponto de operação do SDEE são mostradas a seguir:

Varredura Backward

$$P_{ijf} = \sum_{jl \in \Omega L} (P_{jlf} + P_{jlf}^L) - \sum_{mj \in \Omega L} P_{mjf} + P_{jf}^D - P_i^G / 3 \quad (29)$$

$$Q_{ijf} = \sum_{jl \in \Omega L} (Q_{jlf} + Q_{jlf}^L) - \sum_{mj \in \Omega L} Q_{mjf} + Q_{jf}^D - Q_i^G / 3 \quad (30)$$

$$V_{if}^2 = V_{jf}^2 + \sum_{h \in \Omega_f} \left\{ 2(\tilde{R}_{ijfh} P_{ijh} + \tilde{X}_{ijfh} Q_{ijf}) + Z_{ijfh}^2 \left(\frac{P_{ijh}^2 + Q_{ijh}^2}{V_{jf}^2} \right) \right\} \quad (31)$$

$$\theta_{if} = \theta_{jf} + \sin^{-1} \left(\frac{\sum_{h \in \Omega_f} (\tilde{X}_{ijfh} P_{ijh} - \tilde{R}_{ijfh} Q_{ijh})}{V_{jf}^2} \right) \quad (32)$$

Varredura Forward

$$P_{ijf} = \sum_{il \in \Omega L} (P_{ilf} - P_{ilf}^L) - \sum_{im \in \Omega L} P_{imf} - P_{if}^D + P_i^G / 3 \quad (33)$$

$$Q_{ijf} = \sum_{il \in \Omega L} (Q_{ilf} - Q_{ilf}^L) - \sum_{im \in \Omega L} Q_{imf} - Q_{if}^D + Q_i^G / 3 \quad (34)$$

$$V_{jf}^2 = V_{if}^2 - \sum_{h \in \Omega_f} \left\{ 2(\tilde{R}_{ijfh} P_{ijh} + \tilde{X}_{ijfh} Q_{ijf}) - Z_{ijfh}^2 \left(\frac{P_{ijh}^2 + Q_{ijh}^2}{V_{if}^2} \right) \right\} \quad (35)$$

$$\theta_{jf} = \theta_{if} - \sin^{-1} \left(\frac{\sum_{h \in \Omega_f} \tilde{X}_{ijfh} P_{ijh} - \tilde{R}_{ijfh} Q_{ijh}}{V_{if}^2} \right) \quad (36)$$

A. Algoritmo do método Distflow generalizado

Supondo conhecida a tensão da subestação, para determinar o ponto de operação do sistema faz-se necessário realizar os seguintes passos:

- i. **Dados de entrada.** Valores dos parâmetros do sistema, tensão da subestação V_{SE} , as potências demandadas nos nós PQ , as potências geradas e as tensões nos nós PV .
- ii. **Ordenamento nodal do sistema.** Mediante um ordenamento em camadas são determinados os caminhos desde a subestação até os nós da última camada.
- iii. **Início do processo iterativo.** Inicializar o contador de iterações ($k = 0$). Nas barras da última camada, fazer as tensões iguais à tensão da subestação e assumir uma defasagem angular entre fases igual à sequência positiva. Ir ao passo iv.
- iv. **Varredura Backward.** Para cada fase f do sistema e para cada trecho ij calcular $P_{ijf}^{(k)}$, $Q_{ijf}^{(k)}$, $V_{if}^{2(k)}$ e $\theta_{if}^{(k)}$ usando (29)-(32).
- v. **Varredura Forward.** Na subestação, fazer $V_{if}^{2(k)} = V_{SE}^2$ e assumir uma defasagem angular entre fases igual à sequência positiva. Seguidamente, para cada fase f e para cada trecho ij calcular $P_{ijf}^{(k)}$, $Q_{ijf}^{(k)}$, $V_{jf}^{2(k)}$ e $\theta_{jf}^{(k)}$ usando (33)-(36). Fazer $k = k + 1$ e ir ao passo vi.
- vi. **Compensação de reativos.** Nos nós PV , verificar se $\Delta V_i \leq tol$ então ir ao passo vii. Caso contrário, atualizar $Q_i^{G(k)}$ e ir ao passo iv.
- vii. **Crítério de convergência.** Nas barras da última camada, verificar se $\max |P_{ijf}^{(k)} - P_{ijf}^{(k-1)}| \leq tol$, então pare e ir ao passo viii. Do contrário, ir ao passo iv.
- viii. **Apresentação de resultados.**

V. TESTES E RESULTADOS

A versão generalizada do método Distflow proposta foi executada no software Matlab e testada através dos sistemas testes IEEE-37 e IEEE-123 [18], em uma máquina Dell com processador Intel Core i7 e 4GB de RAM.

Nas simulações, os sistemas teste foram sobrecarregados com o objetivo de construir cenários com presença de GDs. Dentre as principais considerações introduzidas na determinação do ponto de operação dos sistemas teste, destacam-se:

- Os reguladores de tensão, os transformadores, as chaves e os bancos de capacitores são desconsiderados.
- As barras de carga são representadas através do modelo de potência constante.

- Os valores das impedâncias série das linhas foram multiplicados por um fator $K_L = 12$.
- Assume-se uma tensão base de 12,66KV e uma potência base de 1,0MW.
- Assume-se um nível de penetração de GD em torno de 15%.

Para validar a formulação proposta e os resultados obtidos foram analisados dois cenários em ambos os sistemas teste. Nas simulações são comparados os valores das perdas de potência ativa, assim como os valores dos módulos e os ângulos das tensões mínimas por fase obtidos através da metodologia proposta e através do método de Shirmohammadi.

O ponto de operação do sistema antes da inserção dos GDs é apresentado na Tabela I.

Tabela I
PERDAS DE POTÊNCIA, MÓDULOS E ÂNGULOS DAS TENSÕES MÍNIMAS SEM INSERÇÃO DE GD

		Distflow	Shirmoh.	Erro
IEEE-37	P^L	0,141472	0,141441	0,000031
	V_{A738}	0,885172	0,884869	0,000303
	V_{B724}	0,932223	0,932265	0,000042
	V_{C740}	0,889402	0,888896	0,000506
	θ_{A738}	-1,07312°	-1,86813°	0,79501°
	θ_{B724}	-120,34578°	-120,24875°	0,09703°
	θ_{C740}	119,7493°	119,64482°	0,10448°
IEEE-123	P^L	0,276430	0,276851	0,000421
	V_{A114}	0,873213	0,870113	0,003100
	V_{B96}	0,841374	0,840068	0,001306
	V_{C104}	0,878792	0,874689	0,004103
	θ_{A114}	-4,18986°	-4,31946°	0,12960°
	θ_{B96}	-124,81375°	-125,09251°	0,27876°
	θ_{C104}	115,00241°	115,19215°	0,18974°

Para melhorar os perfis de tensão e diminuir as perdas do sistema foram inseridos GDs em alguns nós do sistema, de acordo com a Tabela II.

Tabela II
VALORES INICIAIS EM PU DOS GDs

Sistema	Nó i	P_i^G	V_{sch_i}	Q_{min}^G	Q_{max}^G
IEEE-37	735	0,2000	0,9478	-0,0500	0,0850
	740	0,1500	0,9399	-0,0500	0,0640
IEEE-123	66	0,2000	0,9485	-0,0500	0,0850
	96	0,1500	0,9352	-0,0500	0,0640
	114	0,2000	0,9325	-0,0500	0,0850

Os resultados obtidos ao calcular o novo ponto de operação do sistema são apresentados na Tabela III.

Nos resultados das Tabelas I e III pode-se verificar que as diferenças entre os valores obtidos através da metodologia proposta e os valores do método de Shirmohammadi são mínimas, o que indica que as aproximações inseridas na formulação proposta são válidas para calcular o ponto de operação de um SDEE desbalanceado.

Tabela III
PERDAS DE POTÊNCIA E TENSÕES MÍNIMOS EM PU COM INSERÇÃO DE GD

		Distflow	Shirmoh.	[Erro]
IEEE-37	P^L	0,100279	0,100314	0,000035
	V_{A738}	0,933370	0,933018	0,000352
	V_{B724}	0,923310	0,923095	0,000215
	V_{C741}	0,939313	0,939091	0,000222
	θ_{A738}	-0,55420°	-0,67770°	0,12350°
	θ_{B724}	-120,06445°	-119,91750°	0,14695°
	θ_{C741}	120,38932°	119,65600°	0,73332°
IEEE-123	P^L	0,176790	0,176929	0,000139
	V_{A71}	0,927247	0,926930	0,000317
	V_{B43}	0,927125	0,928667	0,001542
	V_{C103}	0,920598	0,920506	0,000092
	θ_{A71}	-2,56595°	-2,65110°	-0,08515°
	θ_{B43}	-123,20713°	-122,54950°	0,65763°
	θ_{C103}	117,40134°	116,84920°	0,55214°

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi proposta uma versão generalizada do método Distflow que considera um novo equacionamento que incorpora os acoplamentos mútuos entre as fases do sistema e possibilita a inserção de GDs para determinar o ponto de operação do SDEE. Através da análise de um cenário crítico, mostrou-se que as aproximações inseridas na formulação não afetam a qualidade dos resultados. Portanto, pode-se concluir que a metodologia proposta é capaz de modelar com sucesso as características desbalanceadas dos SDEE, da mesma forma que o método de Shirmohammadi.

Considerando que o fluxo de carga torna-se o ponto de início de várias abordagens, a importância deste trabalho está associada com o desenvolvimento de uma nova formulação que possibilita a realização de análises mais exatas que considerem as características desbalanceadas dos SDEE, como o planejamento da operação e expansão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem CAPES, CNPq (Proc. 302272 / 2009-7) e FAPESP (Proc. 2009 / 53841-7) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] W. F. Tinney and C. E. Hart. "Power flow solution by Newton's method," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 86, no. 11, pp. 1449-1460, 1967.
- [2] A. Monticelli. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. São Paulo, SP. Ed. Edgar Blucher Ltda, 1983.
- [3] V. M. Costa, N. Martins and J. L. Pereira. "Developments in the Newton Raphson power flow formulation based on current injection," IEEE Trans. Power Syst., vol. 14, no. 4, pp. 1320-1326, 1999.
- [4] R. G. Wasley and M. A. Shlash. "Newton-Raphson algorithm for 3-phase load flow," in *Proc. Institution of Electrical Engineering*, 1974, pp. 630-638.
- [5] K. A. Birt, J. J. Graffy, J. D. McDonald and A. H. El-Abiad. "Power flow solution by Newton's method," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 95, no. 1, pp. 59-65, 1976.
- [6] F. Zhang and C. S. Cheng. "A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis," IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, no. 1, pp. 389-397, 1997.
- [7] H. L. Nguyen. "Newton-Raphson method in complex form," IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, no. 3, pp. 1355-1359, 1997.

- [8] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen and G. X. Luo. "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks," IEEE Trans. Power Syst., vol. 3, no. 2, pp. 753-762, 1988.
- [9] G. R. Céspedes. "New method for the analysis of distribution networks," IEEE Trans. Power Del., vol. 5, no. 1, pp. 391-396, 1990.
- [10] M. E. Baran and F. F. Wu. "Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system," IEEE Trans. Power Del., vol. 4, no. 1, pp. 735-743, 1989.
- [11] C. S. Cheng and D. Shirmohammadi. "A three-phase power flow method for real-time distribution systems analysis," IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, no. 2, pp. 671-679, 1995.
- [12] L. F. Ochoa and A. Padilha-Feltrin. "Distribution line models analysis for loss calculation within three-phase three-wire power flow algorithms," in *Proc. IEEE/PES T&D Latin America*, 2004, São Paulo - SP, pp. 173-178.
- [13] M. E. Baran and F. F. Wu. "Optimal capacitor placement on a radial distribution systems," IEEE Trans. Power Del., vol. 4, no. 1, pp. 725-734, 1989.
- [14] A. C. Rueda-Medina, J. F. Franco, M. J. Rider, A. Padilha-Feltrin and R. Romero. "A mixed-integer linear programming approach for optimal type, size and allocation of distributed generation in radial distribution systems," *Elec. Power Syst. Res.*, vol. 97, no. 1, pp. 133-143, 2013.
- [15] J. A. Taylor and F. S. Hover. "Convex models of distribution system reconfiguration," IEEE Trans. Power Syst., vol. 27, no. 3, pp. 1407-1413, 2012.
- [16] H. Mori and Y. Yamada. "An EPSO-based method for state estimation in radial distribution systems," in *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2006, Taipei - Taiwan, pp. 1855-1860.
- [17] R. S. Rao, S. Narasimham and M. Ramalingaraju. "Optimization of distribution network configuration for loss reduction using artificial bee colony algorithm," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems Engineering*, pp. 116-122, 2008.
- [18] W. H. Kersting. "Radial distribution test feeders," in *Proc. of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2001, Columbus, Ohio, USA, pp. 908-912.