

FLUXO DE POTÊNCIA EM ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO FRACAMENTE MALHADOS

GUSTAVO M. HEBLING, JULIO A. D. MASSIGNAN, LEANDRO T. MARQUES, JOÃO B. A. LONDON JR

Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

Av. Trabalhador São Carlense, 400 – Pq. Arnold Schmidt – São Carlos/SP
E-mails: gustavo.hebling@usp.br, julio.massignan@usp.br,
leandrotolomeu@gmail.com, jbalj@sc.usp.br

MARCOS H. M. CAMILLO

COPEL Distribuição S/A
Rua Chile, 10 – Vila Brasil – Londrina/PR
E-mails: marcos.camillo@copel.com

Abstract— The load flow calculation is a fundamental tool for determining the operational conditions of electric power systems. This motivated the development of several methods for load flow calculation in transmission and distribution systems. Computationally efficient methods were developed for distribution systems, using particular characteristics these systems, such as the typical operation as radial systems, called Backward and Forward Sweep methods. These methods were adapted to enable their application for distribution systems with meshed operation. However, there are a few scenarios of meshed operation that pose some challenges for the direct application of the load flow calculation methods. This is related mainly because of these methods requires the definition of on bus as angular reference. This paper presents a detailed study of these scenarios, some not yet with detailed analyses in the literature, highlighting the difficulties for the load flow solution and proposing alternative modelling to overcome these difficulties. To illustrate the main theoretic conclusions, several studies are presented and analysed using a distribution test feeder from the literature and its inclusion in the National Transmission System.

Keywords— Distribution Systems, Load Flow, Energy Restoration, Weakly Meshed Networks, Distribution Operation.

Resumo — O cálculo de fluxo de potência é uma ferramenta fundamental para determinação das condições operacionais de um sistema elétrico de potência. Isso motivou o desenvolvimento de diversos métodos para cálculo de fluxo de potência em sistemas de transmissão e de distribuição. Para sistemas de distribuição foram desenvolvidos métodos eficientes computacionalmente, que aproveitam as características particulares desses sistemas, como o fato de eles usualmente operarem de forma radial, chamados métodos de Varredura Direta e Inversa. Para possibilitar a execução desses métodos para sistemas operando em malha, os mesmos foram adaptados. Entretanto, existem alguns possíveis cenários de operação em malha que dificultam a aplicação direta dos métodos desenvolvidos para cálculo de fluxo de potência. Isto principalmente em razão de esses métodos exigirem a definição de uma barra como referência angular. Este artigo apresenta um estudo detalhado desses cenários, alguns ainda não analisados de forma detalhada na literatura, destacando as dificuldades para solução do problema de fluxo de potência e propondo modelagens alternativas para contornar essas dificuldades. Para ilustrar as principais conclusões teóricas, serão apresentados e analisados resultados obtidos de diversos estudos de caso realizados sobre um alimentador de distribuição de teste da literatura e a inclusão deste alimentador no Sistema Interligado Nacional.

Palavras-chave— Sistemas de Distribuição, Fluxo de Potência, Restabelecimento de Energia, Redes Fracamente Malhadas, Operação da Distribuição.

1 Introdução

Os Sistemas de Distribuição (SDs) geralmente operam com topologia radial e fluxo unidirecional. Porém, em algumas situações a rede pode ter que operar na presença de algumas malhas, como: durante o processo de restabelecimento de energia por meio de reconfiguração de redes (Camillo et al., 2016); e propostas de operação normal com a presença de malhas nos SDs (Chen et al., 2004).

Ademais, para que as redes de distribuição operem de maneira segura e adequada, inclusive durante o período de tempo em que estão operando em malha, é necessária a verificação da ausência de violação de seus limites operacionais. Para isso, faz-se necessária a execução de cálculos de fluxo de potência (Monticelli, 1983). Dentre os métodos de cálculo de fluxo de potência, os mais comumente aplicados à SDs são os métodos baseados em Varredura Direta e

Inversa (VDI), devido a sua simplicidade e eficiência computacional e numérica. Além disso, embora tenham sido inicialmente propostos para redes radiais, estes métodos possuem extensões para o tratamento de redes fracamente malhadas, chamadas de Método de VDI Compensada (Shirmohammadi et al., 1988; M. Baran & Wu, 1989). Ressaltam-se também outros métodos de cálculo de fluxo de potência como o de Newton-Raphson (Monticelli, 1983), mais tradicional se tratando de sistemas de transmissão, e o de injeções de corrente (Araujo et al., 2010), outra abordagem para SDs.

Uma das situações sob condição temporária de malha nos SDs é na obtenção de soluções para o problema de restabelecimento de energia (Camillo et al., 2016). Durante o processo de restabelecimento, chaves do SD devem ser operadas de modo que, ao reconectar consumidores saudáveis que foram desligados, não ocorram desligamentos, mesmo que temporários, de outros consumidores. Neste

processo, podem ser geradas malhas temporárias.

A operação malhada de redes de distribuição também tem sido foco de pesquisas que visam avaliar a viabilidade de operação de alimentadores de distribuição permanente malhados (Chen et al., 2004; Huang & Chen, 2002), isto é, em operação normal, e não somente em situações de contingência, que são temporárias.

Em face destes fatos, os métodos de fluxo de potência para redes de distribuição malhadas continuam sendo alvo de pesquisas e de publicações recentes na literatura (Kersting, 2015; Li et al., 2016; Dimitrovski & Melhorn, 2015). No entanto, estes trabalhos carecem de uma formalização de todos os casos de malha que podem ocorrer em SDs e que influenciam no cálculo de fluxo de potência. Um exemplo disto é a ausência de formalização teórica do caso de malha entre subestações distintas.

Deste modo, este artigo apresenta um estudo da aplicação de métodos de VDI Compensada nos três diferentes casos possíveis de malha nos SDs. Estes casos diferem-se entre si pela posição da chave que fecha a malha no sistema de distribuição. A contribuição deste trabalho consiste em abordar as dificuldades para solução do problema de fluxo de potência nestes casos possíveis de malha, algumas ainda não analisadas de forma detalhada na literatura, propondo modelagens alternativas para contorná-las. Para ilustrar as principais conclusões teóricas foram realizadas simulações computacionais utilizando um alimentador de distribuição de teste da literatura e a inclusão deste alimentador no Sistema Interligado Nacional (SIN). Apesar da escolha do método de VDI para o cálculo de fluxo de potência, as considerações apresentadas neste trabalho podem ser estendidas para os demais métodos.

2 Fluxo de Potência para Redes de Distribuição Fracamente Malhadas

Os métodos de VDI, assim como outros métodos de fluxo de potência, visam calcular as tensões complexas nodais em todas as barras do sistema e os fluxos de potência e correntes nos ramos. Dentre os métodos de VDI destacam-se o método de VDI por *Soma de Corrente* (Shirmohammadi et al., 1988) e o método de VDI por *Soma de Potência* (M. Baran & Wu, 1989). A principal diferença está no cálculo da etapa inversa do método, que será explicada na sequência. Neste trabalho será utilizado método VDI de soma de correntes, para redes radiais, e também o Método de VDI Compensada, para redes fracamente malhadas (Shirmohammadi et al., 1988).

2.1 Método de Varredura Direta e Inversa para redes radiais

Os métodos de VDI para redes radiais consistem de duas etapas iterativas: (1º) cálculo das correntes

nos ramos (ou de potência, no caso do método de VDI por Soma de Potência) partindo das barras terminais do alimentador (nós folhas) até a barra da subestação (nó raiz); e (2º) cálculo das tensões nodais partindo-se da barra da subestação até as barras terminais. A primeira etapa é chamada de Varredura Inversa, enquanto a segunda é denominada por Varredura Direta. Como apresentado, o método é iterativo e converge quando a diferença de tensão entre duas iterações sucessivas for menor que uma tolerância pré-especificada.

Para obtenção das equações de corrente, considere o modelo de rede apresentado na Figura 1.

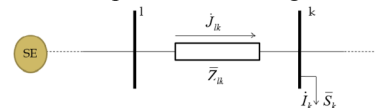


Figura 1: Modelo simplificado de um ramo entre duas barras.

A corrente complexa I_k , que representa a injeção na barra k , pode ser calculada através da equação (1).

$$I_k = \left(\frac{S_k}{V_k} \right)^* \quad (1)$$

na qual S_k é a potência complexa na barra k , e V_k é a tensão complexa na barra k .

A etapa de varredura inversa é executada através do cálculo das correntes em todos os ramos da rede elétrica, desde as barras terminais até a subestação:

$$J_{lk} = I_k + \sum_{m \in M} J_{km} \quad (2)$$

na qual M é o conjunto de ramos adjacentes e à jusante da barra k .

Na etapa de varredura direta são atualizadas as tensões complexas nas barras através da equação (3).

$$V_k = V_l - Z_{lk} J_{lk} \quad (3)$$

2.2 Método de Varredura Direta e Inversa Compensada

O método de VDI Compensada, proposto em Shirmohammadi et al. (1988), permite, a partir de uma rede fracamente malhada, a obtenção de uma rede radial equivalente. Para tal, visando compensar o efeito das malhas, são incluídas injeções de corrente nas duas barras de um “ponto de quebra”. Este consiste em duas barras, uma original e outra fictícia, resultantes da quebra de uma das barras pertencente à malha. A Figura 2 apresenta o diagrama de uma rede na presença de uma malha, com destaque para um ponto de quebra escolhido arbitrariamente. Também ilustra a nova topologia da rede após a divisão do ponto de quebra em duas barras: (i), que já existia, e a (i') fictícia.

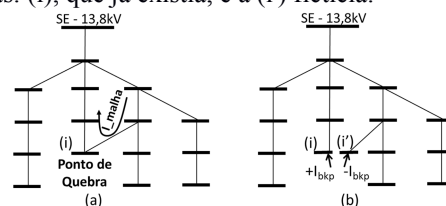


Figura 2: Separação do “ponto de quebra”: rede malhada (a) e rede radial equivalente após a divisão do “ponto de quebra” (b).

A malha é representada por injeções de corrente de mesma magnitude e sentidos opostos inseridas nas barras do “Ponto de Quebra”. Estas correntes são chamadas correntes de compensação (I_{bcp}). As correntes de compensação da malha são calculadas iterativamente, a partir do Equivalente de Thévenin, entre as barras criadas a partir do “Ponto de Quebra”. A impedância de Thévenin (Z_{th}) é a soma das impedâncias dentro da malha formada pelas barras i e i' . A tensão V_{th} consiste na diferença entre as tensões V_i e $V_{i'}$, que são obtidas através do cálculo de fluxo de potência na rede radial. A Figura 4 apresenta o circuito equivalente da rede visto pelas barras do “Ponto de Quebra”.

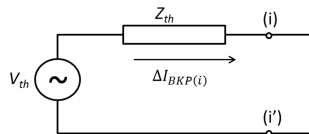


Figura 3: Equivalente de Thévenin do sistema.

A corrente de compensação injetada no “Ponto de Quebra” (I_{bcp}) é calculada utilizando o circuito equivalente de Thévenin, através da equação (4).

$$\Delta I_{BKP(i)}^{(m)} = Z_{th}^{-1} \cdot V_{th}^{(m)} \quad (4)$$

Assim, a corrente de compensação é atualizada a partir da equação (5), para cada iteração m .

$$I_{BKP(i)}^{(m+1)} = I_{BKP(i)}^{(m)} + \Delta I_{BKP(i)}^{(m)} \quad (5)$$

O método de compensação converge quando a diferença entre as tensões nas barras (i) e (i') é menor que uma tolerância pré-especificada. O algoritmo do método VDI Compensada pode ser apresentado segundo o fluxograma da Figura 9.

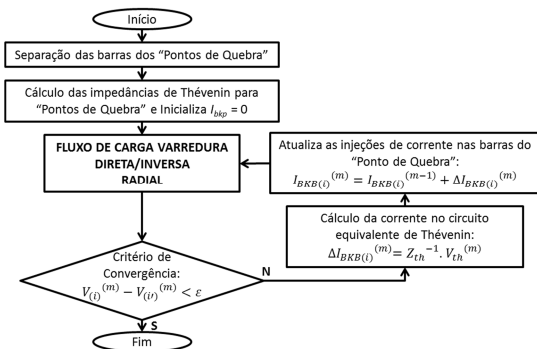


Figura 4: Algoritmo do método de VDI Compensada.

Para múltiplas malhas, o equacionamento anterior é estendido através de uma formulação matricial, como apresentado em Shirmohammadi et al. (1988) e M. Baran & Wu (1989).

3 Casos de Malha em Sistemas de Distribuição

Embora sejam inúmeras as possibilidades de malhas em SDs, estas podem ser divididas em três casos distintos, de acordo com os elementos da rede que estarão interligados em malha. Outros casos de malha podem ser descritos como combinações destes três. Estes casos de malhas são definidos como:

- *Caso 1:* entre duas barras pertencentes a um mesmo alimentador ou entre alimentadores conectados a um mesmo transformador de subestação;
- *Caso 2:* entre duas barras pertencentes a alimentadores conectados a diferentes transformadores da mesma subestação;
- *Caso 3:* entre duas barras pertencentes a alimentadores diferentes conectados em subestações distintas.

A Figura 5 ilustra os possíveis casos:

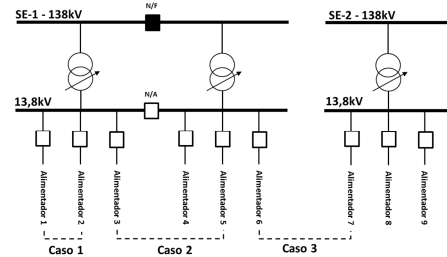


Figura 5: Casos de malha em SDs.

É importante destacar que cada um destes casos de malha implicará em desafios específicos para a execução de um algoritmo de fluxo de potência, como será ilustrado na sequência. Isto em razão de o cálculo de fluxo de potência exigir a utilização de uma barra como referência angular para a rede.

Estes desafios estão relacionados ao fato de que uma baixa quantidade de informações sobre o sistema de transmissão está disponível aos operadores dos SDs. Geralmente limitando-se a algumas informações sobre as subestações que alimentam a rede primária.

3.1 Cálculo de Fluxo de Potência para o Caso 1

Este caso de malha pode ser ilustrado pela Figura 2, no qual todas as barras pertencentes à malha estão num mesmo alimentador. Dessa forma, são alimentadas pela mesma barra secundária da subestação de distribuição, que pode ser utilizada como barra de referência para cálculo de fluxo de potência. Consequentemente, esse cálculo pode ser realizado pela aplicação direta do método VDI Compensada, apresentado na seção 2.2, isto é, sem nenhuma consideração adicional àquelas feitas em (Shirmohammadi et al., 1988).

3.2 Cálculo de Fluxo de Potência para o Caso 2

Este caso de malha envolve dois alimentadores distintos, de uma mesma subestação, que estão conectados em barras secundárias diferentes, na subestação de distribuição. Para possibilitar o cálculo do fluxo de potência, neste caso, é necessário estender a modelagem da rede até a barra primária (i.e., de alta tensão) da subestação, para possibilitar a utilização de uma única barra de referência angular para os dois alimentadores. Dessa forma, o método de VDI Compensada pode ser aplicado, obtendo a solução do fluxo de potência.

Face ao exposto, faz-se necessário incluir, na modelagem da rede, os transformadores da subestação. Isto é feito inserindo-se a impedância dos transformadores e modelando o comutador de *tap* sob carga no transformador. Além disto, os demais alimentadores, não envolvidos na malha, são representados como injeções de potência ativa e reativa na barra secundária da subestação.

A Figura 6 ilustra a topologia com a barra de alta tensão adicionada, o transformador modelado e os demais alimentadores radiais agrupados como carga.

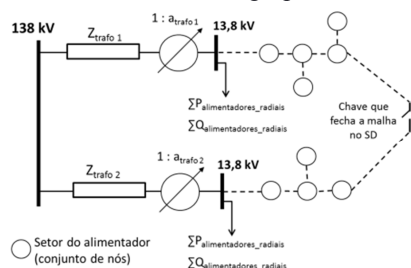


Figura 6: Diagrama da rede para a solução do Caso 2 de malha.

3.3 Cálculo de Fluxo de Potência para o Caso 3

Para possibilitar o cálculo de fluxo de potência neste caso de malha, assim como no Caso 2, torna-se necessário estender a modelagem da rede até uma barra comum. Porém, tendo em vista que neste caso a barra comum está na alta tensão, essa extensão da modelagem é de difícil execução prática. Isto porque seria necessário modelar, também, o sistema de transmissão até a barra comum entre ambos os alimentadores e subestações interligadas. No entanto, podem existir muitas barras e linhas, acima do nível dos alimentadores interligados, e estas informações geralmente não são de fácil acesso aos operadores da distribuição. Assim, a dificuldade de se obter uma barra de referência única dificulta a aplicação do método VDI Compensada e outros métodos de fluxo de potência (Monticelli, 1983; Araujo et. al., 2010) neste caso de malha.

Dada esta dificuldade, este trabalho propõe utilizar, como barra de referência, a barra secundária de uma das subestações envolvidas na malha ($V_{SE1}=1,0$ p.u e $\theta_{SE1}=0^\circ$), e especificar a magnitude e ângulo de tensão para a barra da outra subestação envolvida na malha. A magnitude de tensão, nesta segunda barra, é especificada como a tensão nominal do sistema (1,0 pu), mas o ângulo de fase depende da topologia, parâmetros e condição operacional do sistema de transmissão. Neste sentido, propõem-se três estratégias para especificar o ângulo da segunda barra de subestação, representando de maneira simplificada a influência do sistema de transmissão, conforme a quantidade de informações disponíveis deste sistema aos operadores da distribuição:

- Sem informação da diferença angular entre as barras das subestações, ou seja, $\theta_{SE1} = 0^\circ$ e $\theta_{SE2} = 0^\circ$;
- Com informação da diferença angular entre

as barras das subestações na situação pré-malha. Assim, $\theta_{SE1} = 0^\circ$ e $\theta_{SE2} = \Delta\theta_{\text{pré-malha}}$.

- Com informação da diferença angular entre as barras das subestações na situação malhada. Assim, $\theta_{SE1} = 0^\circ$ e $\theta_{SE2} = \Delta\theta_{\text{malhada}}$;

onde $\Delta\theta_{\text{pré-malha}}$ e $\Delta\theta_{\text{malhada}}$ representam a diferença entre os ângulos das barras das subestações para a situação antes e após o fechamento da chave que caracteriza a malha, respectivamente.

Outras representações para esta segunda barra, como barras PQ e PV não são adequadas. Isto porque ambas as subestações envolvidas na malha serão responsáveis pelo balanço de potência na rede malhada, o que exige o cálculo das injeções de potência ativa e reativa das duas subestações envolvidas na malha.

4 Resultados de Simulações

A fim de avaliar a eficácia das estratégias apresentadas anteriormente para lidar com cada um dos casos de falta, foram realizadas simulações computacionais utilizando o alimentador de distribuição de 32 barras, com tensão nominal de 13,8 kV, apresentado em M. E. Baran & Wu (1989). Os resultados foram obtidos por meio do método de VDI Compensada, que foi implementado em MATLAB. Para validação dos resultados obtidos com a implementação realizada do método de VDI foi utilizado o *software* ANAREDE (CEPEL, 2014), que utiliza o método de Newton-Raphson (Monticelli, 1983) para solução do problema de fluxo de potência. As subseções a seguir apresentarão os resultados para cada um dos três casos de malha.

4.1 Caso 1: malha entre duas barras pertencentes a um mesmo alimentador

A Figura 7 ilustra a topologia e a localização do caso de malha tipo 1 simulado. A linha vermelha indica a chave que fechou a malha, interligando as barras 15 e 27 do alimentador.

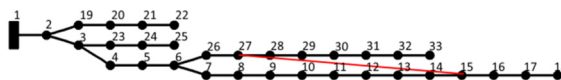


Figura 7: Diagrama do alimentador para simulação do caso 1.

Após a execução de 4 iterações, o programa implementado obteve os valores das tensões complexas. A Tabela I apresenta as diferenças entre os valores determinados pelo programa implementado e pelo método de Newton-Raphson.

Tabela I: Diferença dos resultados obtidos - método de VDI Compensada e método de Newton-Raphson - caso 1.

Diferença de cálculo	Magnitude (V)	Ângulo (graus)
Máxima	5,8142	0,0147
Média	2,3749	0,0041
Mínima	0,0004	0,0001
Desvio Padrão	1,6418	0,0034

Dado que a máxima diferença de magnitude de tensão foi de menos de 6V, num SD com tensão nominal de 13,8 kV, pode-se observar que para o caso 1, ambos os métodos convergiram para a mesma solução de fluxo de potência.

4.2 Caso 2: malha entre dois alimentadores diferentes conectados a uma mesma subestação

O caso 2 de malha simulado é apresentado na Figura 8, que apresenta também os transformadores que precisaram ser adicionalmente modelados, conforme apresentado na seção 3.2.

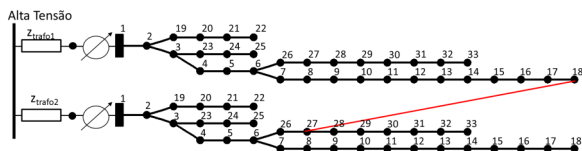


Figura 8: Diagrama dos alimentadores para simulação do caso 2.

As diferenças entre os valores determinados pelo programa implementado e pelo método de Newton-Raphson são apresentadas na Tabela II.

Tabela II: Diferença dos resultados obtidos - método de VDI Compensada e método de Newton-Raphson - caso 2.

Diferença de cálculo	Magnitude (V)	Ângulo (graus)
Máxima	6,6031	0,0470
Média	2,7327	0,0115
Mínima	0,0004	0,0001
Desvio Padrão	1,9179	0,0114

Pode-se observar que, para o caso 2, ambos os métodos também convergiram para mesma solução de fluxo de potência. Logo, pode-se concluir que também neste caso 2 o método de VDI Compensada foi capaz de obter a mesma precisão do método de Newton-Raphson, sem perder as vantagens dos métodos de VDI.

4.3 Caso 3: malha entre dois alimentadores diferentes conectados em subestações distintas

Para analisar a estratégia proposta de lidar com o caso 3 de malha, o alimentador de 32 barras foi inserido em duas subestações do SIN¹ presentes na região de Londrina/PR. Com isto obteve-se o modelo completo, transmissão e distribuição, para representar o caso 3 de malha, o qual será utilizado como referência para avaliação das três estratégias propostas para especificação dos ângulos para as subestações. A Figura 9 apresenta o diagrama unifilar do sistema de transmissão na região de Londrina/PR, com a indicação das subestações envolvidas na malha.

Determinaram-se, então, os valores de ângulo de tensão nas barras do sistema de transmissão da Figura 9, em situações de pré-malha e malhada, por meio do *software* ANAREDE, e que serão utilizados

como base para as análises posteriores.

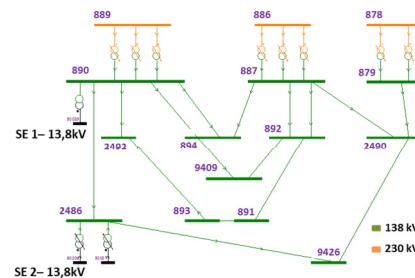


Figura 9: Sistema de transmissão da região de Londrina/PR.

Os valores de ângulo de tensão das barras das subestações (SE1 e SE2) e o fluxo de potência ativa e reativa no sentido das subestações para os alimentadores, obtidos pelo ANAREDE através do modelo completo da rede, são apresentados na Tabela III. Note que houve uma diferença angular de $-1,92^\circ$ na rede pré-malha e de $-0,58^\circ$ na rede malhada, entre as barras da SE1 e SE2.

Tabela III: Fluxo de potência para os alimentadores em malha do Caso 3 utilizando o modelo completo transmissão e distribuição.

	SE1			SE2		
	θ ($^\circ$)	P(MW)	Q(MVAr)	θ ($^\circ$)	P(MW)	Q(MVAr)
Pré-Malha	-28,30	3,72	2,30	-30,22	2,12	1,28
Malhada	-29,00	6,41	-0,42	-29,58	-0,54	4,02

Em seguida, o método de VDI Compensada foi aplicado no sistema de distribuição da Figura 10, para avaliação das estratégias propostas para especificação dos ângulos das barras das subestações apresentadas na seção 3.3. Os resultados obtidos para os fluxos de potência no sentido das subestações para os alimentadores são apresentados na Tabela IV.

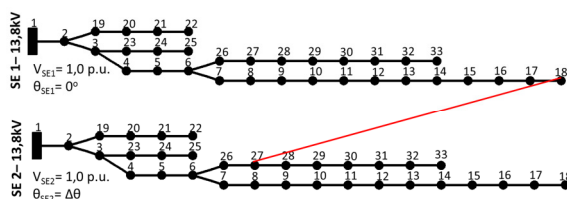


Figura 10: Diagrama dos alimentadores para simulação do caso 3.

Tabela IV: Fluxo de potência para os alimentadores em malha do caso 3 utilizando as estratégias para especificar o ângulo da SE2.

	SE1		SE2	
	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
Ângulo SE2: $\Delta\theta = 0^\circ$	4,32	2,62	1,50	0,96
Ângulo SE2: $\Delta\theta = -1,92^\circ$	11,43	-7,49	-5,25	11,30
Ângulo SE2: $\Delta\theta = -0,58^\circ$	6,43	-0,47	-0,56	4,07

Desprezando a diferença angular entre as barras das subestações, isto é, para $\Delta\theta = 0^\circ$, obtêm-se uma condição diferente para os fluxos de potência nos alimentadores. Nota-se que, além de diferentes magnitudes de fluxo de potência, a condição de fluxo reverso observada no modelo completo não é evidenciada utilizando esta estimativa angular.

Utilizando a diferença angular pré-malha, obtém-se uma condição conservadora do fluxo de potência

¹ O modelo do SIN utilizado é referente ao mês de outubro de 2015 com cenário de carga pesada (disponível em (ONS 2015)).

nos alimentadores. Apesar de as magnitudes dos fluxos de potência serem ainda diferentes da solução do modelo completo, é evidenciada a situação de fluxo reverso. Neste caso, a obtenção da diferença angular entre as subestações na situação pré-malha pode ser feita simulando diferentes cenários de carga e contingências para o sistema de sub-transmissão, não necessitando da inclusão dos alimentadores no sistema de transmissão.

Somente na situação em que a diferença angular no caso malhado é conhecida, os resultados se aproximam do modelo completo. Porém é difícil conhecer antecipadamente esta diferença angular no cenário malhado, uma vez que a chave de malha pode assumir diversas posições dentro da topologia do SD e é difícil obter o modelo completo para todos os possíveis cenários de malha, fugindo assim da realidade prática.

A Tabela V apresenta o fluxo de potência ativa e reativa, em MW e MVar respectivamente, na chave que fecha a malha entre as subestações.

Tabela V: Fluxo de potência na chave que fecha a malha do caso 3

	Anarede		VDI Compensada		
	Pré Malha	Malhado	$\Delta\theta = 0^\circ$	$\Delta\theta = -1,92^\circ$	$\Delta\theta = -0,58^\circ$
P_{27-18}	0,00	2,69	0,61	7,69	2,71
Q_{27-18}	0,00	-2,72	0,31	-9,80	-2,77

Note que os resultados são similares aos das análises anteriores para cada estratégia de ângulo. Observa-se também que a estratégia adotada tem influência nos fluxos de potência dos alimentadores como um todo e não somente na subestação.

5 Conclusão

Este trabalho apresentou um estudo no qual o método de VDI Compensada foi aplicado em três casos distintos que englobam as possíveis configurações malhadas que podem ocorrer em SDs.

As dificuldades na solução do problema de fluxo de potência de cada caso de malha são apresentadas, assim como estratégias de modelagem para contorná-las. Vale ressaltar que outros métodos de cálculo de fluxo de potência do VDI também apresentam as mesmas dificuldades. De um modo geral, estas dificuldades estão relacionadas com a necessidade da utilização de uma barra única como referência angular para os alimentadores envolvidos na malha. Esta barra de referência geralmente se localiza no sistema de transmissão e a falta de informações deste sistema aos operadores dos SDs acarreta nas dificuldades adicionais para a solução do problema de fluxo de potência.

Espera-se utilizar em trabalhos futuros representações dos sistemas de transmissão através de equivalentes de rede para melhorar a qualidade da solução do fluxo de potência em casos de malha entre subestações distintas. Além disto, levar em consideração o aspecto trifásico dos SDs, tratando as

dificuldades adicionais que esta modelagem impõe.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP - processo nº 2013/13236-2), FIPAI e COPEL pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- Araujo, L. R. et. al. 2010. Comparisons between the three-phase current injection method and the forward/backward sweep method. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 32(7), pp.825-833.
- Baran, M. & Wu, F., 1989. Optimal capacitor placement on radial distribution systems. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 4(1).
- Baran, M.E. & Wu, F.F., 1989. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 4(2), pp.1401-1407.
- Camillo, M.H.M. et al., 2016. Determination of Switching Sequence of Service Restoration in Distribution Systems : application and analysis on a real and large-scale radial system. Em *IEEE T&D Conference and Exposition*. Dallas.
- CEPEL, 2014. ANAREDE - Análise de Redes Elétricas. Disponível em: <http://www.anarede.cepel.br/>.
- Chen, T.H. et al., 2004. Feasibility study of upgrading primary feeders from radial and open-loop to normally closed-loop arrangement. *IEEE Trans. on Power Systems*, 19(3), pp.1308-1316.
- Dimitrovski, A. & Melhorn, A.C., 2015. Three-phase probabilistic load flow in radial and meshed distribution networks. *IET G, T & D*, 9(16), pp.2743-2750.
- Huang, W.T. & Chen, T.H., 2002. Assessment of upgrading existing primary feeders from radial to normally closed loop arrangement. *IEEE T&D Conference and Exhibition. Asia Pacific*.
- Kersting, W.H., 2015. The Simulation of Loop Flow in Radial Distribution Analysis Programs. *IEEE Trans. on Industry Applications*, 51(2), pp.1928-1932.
- Li, H. et al., 2016. An improved hybrid load flow calculation algorithm for weakly-meshed power distribution system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 74, pp.437-445.
- Monticelli, A.J., 1983. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*, São Paulo: Edgard Blucher.
- ONS, 2015. Casos de Referência - Diretrizes para a Operação Elétrica Mensal. Disponível em: http://www.ons.org.br/operacao/regime_permanente.aspx [Acessado 8 de abril de 2016].
- Shirmohammadi, D. et al., 1988. Compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Trans. on Power Systems*, 3(2), pp.753-762.