Um Algoritmo para o Cálculo de Fluxo de Potência em Redes de Distribuição Fracamente Malhadas Considerando Geração Distribuída

César Augusto Santana Castelo Branco[1], Helton do Nascimento Alves[2]

[1]Graduando de Engenharia Elétrica Industrial – IFMA. Bolsista da FAPEMA. e-mail: santana_castelo@hotmail.com
[2]Professor Doutor do Departamento de Eletroeletrônica - IFMA. e-mail: helton@ifma.edu.br

Resumo: Neste trabalho é proposto um algoritmo o para cálculo de fluxo de potência em redes de distribuição radiais e fracamente malhadas considerando a inserção da geração distribuída. O algoritmo é baseado no modelo linear do circuito da rede, modelado com base nas leis de Kirchhoff e na lei dos bipolos. O controle da tensão nas barras de tensão controlada (ou PV) é realizado por meio de um mecanismo de ajuste iterativo da injeção líquida de potência reativa nas mesmas, o qual é executado durante a solução do estado da rede. Após a exposição e o detalhamento da metodologia proposta é feita uma análise comparativa do desempenho da mesma em relação ao de outra técnica encontrada na literatura. Os resultados indicam a eficiência do método proposto.

Palavras–chave: fluxo de potência, geração distribuída, redes de distribuição.

1. INTRODUÇÃO

A inserção de Geradores distribuídos (GDs) em sistemas de distribuição proporciona algumas vantagens técnicas para a operação (FALAGHI & HAGHHIFAM, 2005) e (ZHU & TOMOSOVIC, 2007), dentre as quais podemos citar a redução das perdas de potência, o aumento na confiabilidade e a melhora no perfil de tensão da rede. Contudo, surgem alguns problemas como a perda da seletividade do sistema de proteção e o aumento do nível das correntes de curto-circuito (GATTA, ILICETO, LAURI, & MASATO, 2003). Considerando as características adquiridas pelas atuais redes de distribuição com a presença de GDs, torna-se evidente a necessidade de realização de pesquisas voltadas para o desenvolvimento de ferramentas computacionais eficientes e robustas para análise e planejamento dessas redes.

O cálculo do fluxo de potência (FP) em sistemas de energia é um instrumento fundamental para o planejamento e operação da rede e consiste na obtenção dos valores de potencia ativa e reativa e das tensões e correntes em todos os pontos do mesmo. É utilizado nas fases de projeto, planejamento da expansão, planejamento da operação e operação propriamente dita, podendo servir apenas como um objeto para análise da rede ou mesmo como parte integrante de estudos mais complexos, como os de otimização, estabilidade, controle e supervisão. A maioria dos estudos de FP para sistemas de distribuição têm direcionado especial atenção para a técnica chamada de varredura *Backward/Forward* (SHIRMOHAMMADI, HONG, SEMLYEN & LUO, 1988), dada a sua robustez e eficiência computacional, além da facilidade para modelar novos elementos a serem conectados na rede. As equações empregadas beneficiam-se da configuração radial predominante na grande maioria dos sistemas de distribuição a qual propicia um cálculo ordenado e eficiente.

Entretanto, a grande maioria dos sistemas de distribuição existentes não foi concebida para suportar a inserção de GDs. O aparecimento de fluxos de potência contrários ao convencional, no sentido da carga para a geração, pode prejudicar o funcionamento das redes passivas tradicionais, projetadas para um fluxo unidirecional desde a subestação até os consumidores finais. Isto pode resultar em uma maior complexidade no planejamento, operação e manutenção da rede, sem contar os altos custos das tecnologias empregadas (PAIVA, VILLA & ZÜRN, 2009). Daí a necessidade de aprimorar as ferramentas existentes destinadas à análise do sistema de distribuição, de forma a garantir o bom funcionamento do mesmo e proporcionar um uso eficiente da energia produzida pelas fontes descentralizadas.

ISBN 978-85-62830-10-5

Em *Shirmohammadi et al (1988)* o algoritmo para a solução da rede radial é combinado com a metodologia da compensação de *Tinney (1972)* para a resolução de redes fracamente malhadas. A inserção da GD é considerada em *Luo & Semlyen (1990)* na aplicação da compensação também para as barras PV. Já em *Shirmohammadi & Cheng (1995)* as barras que possuem GDs são tratadas separadamente, além de a solução ser estendida para sistemas trifásicos desequilibrados. Em *Zhang et al (1995)* um método de compensação híbrido é utilizado para comportar a análise de curto-circuito em tempo real. O algoritmo exposto em *Peñuela, Granada & Mantovani (2010)* aplica a técnica de *Zhang et al (1995)* a cada atualização dos níveis de tensão, enquanto que o de *Zhu & Tomosovic (2002)* estende a análise a cenários mais complexos, com a presença de bancos de capacitores, reguladores de tensão e cargas não lineares. O método de *Palma et al (2010)* faz o controle das tensões nas barras PV pelo líquido da injeção de potência reativa nas mesmas.

Neste trabalho é proposto um algoritmo para o cálculo do FP em redes de distribuição fracamente malhadas com a presença da GD baseado no modelo linear da rede. Uma solução iterativa baseada na obtenção das tensões nodais e nos ramos (TORRES NETO, 2010) é empregada, auxiliada por um controle da tensão nas barras PV através da potência reativa fornecida pelo GD. A convergência do algoritmo é aprimorada com a adoção de um fator adimensional (acelerador), de modo a diminuir o número de iterações no processo de controle da tensão nas barras PV. Para validar a metodologia proposta serão realizados testes em um alimentador de 69 barras (BARAN & WU, 1989) considerando diversos cenários da rede. Em todos os testes realizados, o método da compensação iterativa servirá como parâmetro para a comparação do desempenho computacional do algoritmo proposto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. MÉTODO DAS TENSÕES NODAIS E DE RAMOS

O método apresentado em *Torres Neto (2010)*, capaz de solucionar redes radiais e fracamente malhadas, trabalha baseado no modelo linear do circuito da rede, modelado a partir das leis de Kirchhoff das tensões e das correntes, e da lei dos bipolos, todas em suas formas matriciais, como segue:

$$C_{nxnr} IB_{nr} = -I_n \tag{1}$$

$$C^T_{nrxn} V_n = U_{nr} \tag{2}$$

$$U_{nr} = Z_{nrxnr} IB_{nr} \tag{3}$$

Onde C_{nxnr} é a matriz de incidência reduzida, associada à topologia da rede, U_{nr} e IB_{nr} são respectivamente os vetores das quedas de tensão e das correntes nos ramos, Z_{nrxnr} é a matriz diagonal que contém as impedâncias dos ramos, V_n é o vetor das tensões nas barras (nós), n e nr representam respectivamente o número de barras e de ramos da rede. Na iteração k as injeções de corrente nas barras são calculadas por:

$$I_i^k = \left(\frac{S_i}{V_i^{(k-1)}} \right)^* \tag{4}$$

Então, $U^{(k)}$ e $V^{(k)}$ são atualizadas sequencialmente mediante a manipulação de (1), (2) e (3), até

que a convergência seja alcançada. No caso de redes fracamente malhadas, (2) não envolve os elementos fechando malha. Portanto, equações independentes de tensões ao longo dos percursos fechados correspondentes às malhas presentes devem completar a representação da LTK para a rede. Desta forma, as equações lineares para um circuito contendo malhas expressas por meio das magnitudes das tensões nos ramos, são:

$$C_{nxnr} Z^{-1}_{nrxnr} U_{nr} = -I_n \tag{5}$$

$$Ma_{(nr-n)xnr} U_{nr} = 0_{nr-n} \tag{6}$$

Onde *Ma* é denominada de matriz de malhas e é usada para descrever a LTK aplicada nos percursos fechados que contém os ramos componentes das malhas do sistema, o qual possui *nr-n* malhas; é construída de forma que as últimas colunas, referentes aos ramos que fecham malhas, formem uma matriz identidade. Já (5) é formada a partir de (1) e (3) e o termo $C_{nxnr} Z^{-1}_{nrxnr}$ é chamado de matriz dos coeficientes e pode ser montado a partir dos dados do sistema, e 0_{nr-n} é um vetor nulo.

A solução para uma rede fracamente malhada pode ser obtida a partir da partição e manipulação direta das matrizes envolvidas em (2), (5) e (6). Cada uma das matrizes *C*, *Z*, *Ma* e *U* deve ser particionada em duas sub-matrizes, uma representando a árvore principal (elementos da parte radial) e outra representando os ramos de fecho, ou seja, elementos que definem os percursos fechados (malhas) da rede. Portanto, (5) e (6) podem ser reescritas e agrupadas da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} C^{árv} Z^{árv\,-1} & C^{fecho} Z^{fecho\,-1} \\ Ma^{árv} & Ma^{fecho} \end{bmatrix}_{nrxnr} \begin{bmatrix} U^{árv} \\ U^{fecho} \end{bmatrix}_{nr} = \begin{bmatrix} -I \\ 0 \end{bmatrix}_{nr} \tag{7}$$

Onde os sobrescritos *árv* e *fecho* representam respectivamente a árvore principal e os elementos fechando malhas da rede. Como $[Ma^{fecho}]$ é na verdade uma matriz identidade, realizando as devidas operações tem-se que:

$$U^{fecho} = -Ma^{árv} U^{árv}. \tag{8}$$

Então, substituindo (8) em (7), e de (2), obtém-se:

$$\left[C^{árv} Z^{árv\,-1} - C^{fecho} Z^{fecho\,-1} Ma^{árv} \right] U^{árv} = -I \tag{9}$$

$$C^{árv\,T} V = U^{árv} \tag{10}$$

O termo $[C^{fecho}][Z^{fecho}]^{-1}[Ma^{árv}]$ é obtido a partir da topologia e dos parâmetros dos ramos de fechamento de malhas e é denominado matriz de efeito das malhas, pois informa qual a perturbação que a malha impõe à árvore. Desta forma, para a resolução de uma rede fracamente malhada, basta aplicar o mesmo processo iterativo utilizado no caso radial, atualizado sequencialmente os valores de $U^{(k)}$ e $V^{(k)}$ pelas equações (9) e (10), respectivamente.

Na solução de uma rede puramente radial, retira-se a matriz de efeito das malhas de (9), o que resulta em uma equação idêntica a (5). Isto mostra que o cálculo do FP para um sistema puramente

radial torna-se apenas um caso particular do cálculo para redes fracamente malhadas. Deve-se notar que é necessário inicializar o vetor das tensões nodais *V* com o valor da tensão da subestação antes de iniciar o processo iterativo, e subtrair em cada iteração o valor da tensão de subestação de cada elemento do vetor das tensões nos ramos da árvore em (10) antes de se calcular as tensões nodais.

2.2. INSERÇÃO DOS GDs NO FP

Existem três formas pelas quais um GD pode operar (ZHANG ET AL, 1995): fornecendo valores fixos de potência ativa e reativa; suprindo potência com um fator de potência constante; ou fornecendo potência a uma tensão de saída fixa. Nos dois primeiros casos, o GD se comporta basicamente como uma barra PQ, ou seja, assemelha-se às demais barras de carga no FP. Já no terceiro, o GD deve ser modelado como uma barra PV, onde se faz necessário um mecanismo de controle para manter a sua tensão de saída em um valor especificado. O algoritmo proposto nesse trabalho efetua este controle por meio da injeção de potência reativa do GD, obedecendo aos limites de fornecimento de cada gerador.

Como a inserção de GDs resulta na alteração do comportamento da rede, faz-se necessário realizar algumas modificações no algoritmo do FP de forma que seja considerada a influência desses elementos no estado da rede em um determinado momento. Devem-se considerar os valores de potência e, consequentemente, os de corrente injetados pelos GDs em suas respectivas barras. Deste modo, na iteração *k*, a corrente injetada na barra *i* pelo seu respectivo GD é dada por:

$$IG_i^{(k)} = \left(\frac{SG_i^{(k)}}{V_i^{(k-1)}} \right)^* \tag{11}$$

Onde $V_i^{(k-1)}$ é a tensão na barra *i* calculada na iteração anterior e $SG_i^{(k)}$ é a potência complexa fornecida pelo GD calculada na iteração *k*, dada por:

$$SG_i^{(k)} = PG_i^{(k)} + jQG_i^{(k)} \tag{12}$$

Onde $PG_i^{(k)}$ e são, respectivamente, a potência ativa e a reativa injetadas na barra *i* pelo GD na iteração *k*. Se o gerador for do tipo PV, *PG* é um valor constante. Desta forma, para a inserção dos GDs no FP, (9) deverá ser reescrita da seguinte forma:

$$\left[C^{árv} \bar{Z}^{árv\,-1} - C^{fecho} \bar{Z}^{fecho\,-1} Ma^{árv} \right] U^{árv} = -I + IG \tag{13}$$

Onde *IG* representa o vetor das correntes injetadas pelos GDs nas suas respectivas barras. Para as barras que não possuem GDs conectados, o valor do elemento correspondente de *IG* é nulo.

2.3. CONTROLE DA TENSÃO NAS BARRAS PV

Para o controle da tensão nas barras PV foi estabelecida uma relação de sensibilidade entre o erro da tensão calculada em relação à especificada e a potência reativa injetada pelo GD na barra. Na iteração *k*, a potência reativa injetada pelo GD na barra *i* será atualizada por:

$$QG_i^{(k)} = QG_i^{(k-1)} + \alpha^{(k)} \left(V_{esp,i} - V_{calc,i}^{(k)} \right) \tag{14}$$

Onde $V_{esp,i}$ é o valor especificado para a tensão de saída do gerador PV na barra *i*. O fator de sensibilidade α é formado pelo produto de dois termos. O primeiro deles é o quociente entre o módulo da injeção líquida de potência complexa e o valor especificado para a tensão na barra *i*. O segundo é um fator adimensional definido experimentalmente com o objetivo de acelerar convergência do algoritmo, reduzindo o número de iterações na resolução do FP (PALMA ET AL, 2010). Assim, define-se α como:

$$\alpha^{(k)} = \omega * \frac{S_{liq,i}^{(k)}}{V_{esp,i}} \tag{15}$$

Onde:

$$S_{liq,i}^{(k)} = \left| V_{calc,i}^{(k)} \right| \left[I_i^{(k)} - IG_i^{(k)} \right]^* \tag{16}$$

Durante a execução do algoritmo do FP, observou-se que os maiores saltos de convergência acontecem geralmente nas cinco primeiras iterações, seguidos de pequenos incrementos nas iterações subsequentes. Isto resulta em um número elevado de iterações necessárias para que os valores do FP convirjam. Daí a importância da adoção do fator adimensional ω, o qual é proporcional à diferença entre os valores de tensão na barra *i* com e sem a presença da GD. Observou-se dos testes realizados que a escolha de um valor adequado para ω pode reduzir em até 70% o número de iterações do FP.

O processo iterativo atuará até que o erro entre a magnitude das tensões especificadas e calculadas para as barras onde existem GDs seja menor do que uma tolerância ε especificada, ou seja, de (14):

$$\left| V_{esp,i} - V_{calc,i}^{(k)} \right| < \varepsilon \tag{17}$$

Contudo, o ajuste iterativo da variável de controle *QG* para as barras PV está condicionado aos limites máximos e mínimos de fornecimento de reativos do GD. Assim, na iteração *k*, a injeção de potência reativa do GD na barra *i* será ajustada apenas enquanto:

$$QG_i^{\min} \le QG_i^{(k)} \le QG_i^{\max} \tag{18}$$

Caso o valor de *QG* ultrapasse algum dos limites de fornecimento especificados, o valor desse limite será injetado na barra *i* e a mesma passará a ser tratada como do tipo PQ.

Na implementação do algoritmo do FP proposto por este trabalho, os valores de *QG* foram todos inicializados com o valor zero, antes da execução do processo iterativo. O mecanismo proposto para o controle da tensão nas barras PV atende perfeitamente às necessidades de se elevar ou reduzir os níveis de tensão das barras em questão, pois, de acordo com (14), o sinal do erro da variável de controle indicará resultará em um aumento ou diminuição do fornecimento de reativos pelo GD.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para validar a eficiência da metodologia proposta foram realizados testes em um sistema de distribuição de 69 barras disponível em *Baran & Wu, 1989*. Foram realizadas análises na versão radial original e em outras com uma e três malhas da rede em questão, obtidas a partir da original com o intuito de mostrar a flexibilidade do método operando sob as mais variadas configurações. A Figura 1 ilustra o sistema de 69 barras com as malhas adicionadas, representadas pelos ramos em vermelho.

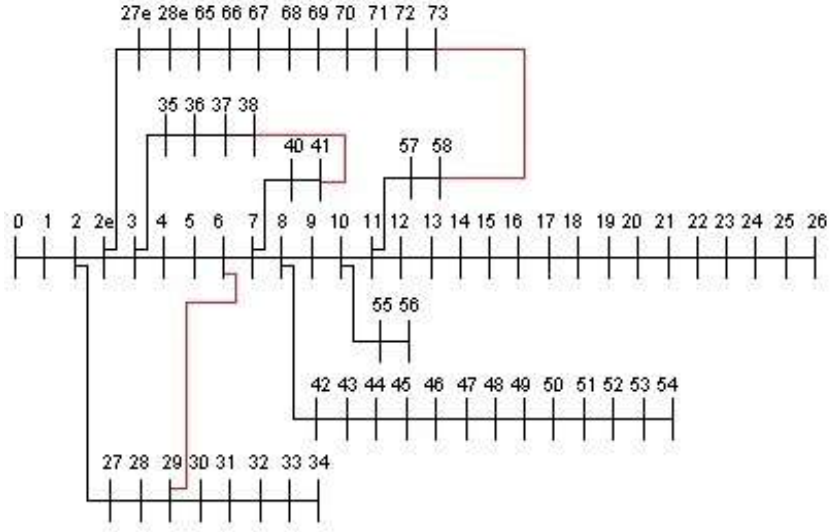

Figura 1 - Sistema com 69 barras

O algoritmo proposto foi implementado em linguagem MATLAB e os testes executados em um computador com processador Intel® Core™ B950 com um clock de 2.1GHz, 2MB cache L3, e uma memória RAM DDR3 de 4GB. A tolerância ε adotada foi de 10^{-2}. A metodologia da compensação de [9] foi utilizada como parâmetro para validar a eficiência computacional do método proposto. Para realizar o controle da tensão foram inseridos dois GDs do tipo PV nas barras 26 e 54 do alimentador. A Tabela 1 contém os dados dos GDs e a Tabela 2 os dados das malhas que foram inseridas na rede.

Tabela 1 – Dados dos GDs

Barra (i)	$V_{esp,i}$ (pu)	PG_i^{esp} (kW)	QG_i^{max} (kVAr)	QG_i^{min} (kVAr)
26	0.98	150	100	-70
54	0.95	600	300	-140

Tabela 2 - Dados dos ramos fechando malhas

Barra inicial	Barra final	Impedância	
		R (Ω)	X (Ω)
38	41	0.90	0.70
06	29	0.90	0.70
58	73	0.90	0.70

Com base nos testes realizados, os valores escolhidos para o parâmetro ω foram 100 para o caso radial, 135 para o caso com uma malha (1-M) e 145 para o caso com três malhas (3-M). A Tabela 3 contém os resultados das simulações de controle da tensão nas barras PV, enquanto que a Tabela 4 ilustra o desempenho computacional da metodologia proposta em relação à da compensação iterativa.

No caso da rede puramente radial, os GDs não foram capazes de fornecer os reativos necessários para que as tensões nas barras 26 e 54 atingissem os valores especificados, como pode ser observado pela tabela 3. Após os limites de reativos dos GDs terem sido ultrapassados, os mesmos foram fixados nas respectivas barras que passaram a ser tratadas como do tipo PQ. Nota-se também

que a inserção das malhas contribuiu significativamente para que houvesse um aumento do perfil da tensão em todo o alimentador, diminuindo a diferença entre os valores de tensão com e sem a presença dos GDs.

Tabela 3 - Resultados das Simulações

Rede	Barra (*i*)	V^{semGD} (pu)	V^{comGD} (pu)	$QG^{injetada}$ (kVAr)
Radial	26	0.9563	0.9724	100
	54	0.9092	0.9489	300
1-M	26	0.9686	0.9800	56.1360
	54	0.9142	0.9500	198.1790
3-M	26	0.9701	0.9800	33.0637
	54	0.9195	0.9500	46.8647

Tabela 4 – Comparação do desempenho das metodologias

Rede	Método Proposto		Compensação	
	Iterações	Tempo de CPU (ms)	Iterações	Tempo de CPU (ms)
Radial	23	1,80	15	1.52
1-M	23	2.34	52	2.08
3-M	21	2.08	51	2.60

A metodologia proposta apresentou um desempenho bastante satisfatório em comparação com a técnica utilizada como parâmetro, demonstrando uma maior flexibilidade e robustez para a resolução de redes fracamente malhadas ao alcançar a convergência para esses casos com cerca de 50% a menos de iterações do que o método da compensação. De fato, o tempo de resolução do método proposto tende a diminuir ou permanecer em uma determinada faixa quando a relação entre o número de malhas e o número de barras do alimentador tende a aumentar enquanto que, para o outro método, quanto maior for o número de malhas da rede, maior será o tempo necessário para que a convergência seja atingida. Além disso, observou-se que o algoritmo proposto para o controle da tensão nas barras PV atinge os valores especificados com injeções de reativos significativamente menores do que os encontrados através da compensação.

4. CONCLUSÕES

Os SDEE têm adquirido cada vez mais dinamismo e complexidade em virtude da inserção de novos equipamentos tais como reguladores de tensão, bancos de capacitores e GDs. Entretanto, as ferramentas tradicionais voltadas para a análise da rede não foram desenvolvidas de para comportar os fluxos de potência contrários ao convencional provocados pela inserção e pene-tração dos GDs no sistema. Portanto tornam-se evidentes as necessidades de uma modelagem eficiente e de modificações nos algoritmos de solução do FP de forma a comportar a influência destes elementos, os quais interferem de forma ativa e dinâmica no comportamento da rede. Neste trabalho foi apresentado um algoritmo para o cálculo de FP em redes de distribuição fracamente malhadas com GD. A metodologia proposta mostrou ter um desempenho e uma eficiência computacional satisfatória me relação a outras técnicas de resolução do FP, demonstrando flexibilidade e robustez ao lidar com redes fracamente malhadas. A inserção de GDs na rede, tratados principalmente como barras de tensão controlada pela injeção de reativos no algoritmo do FP, mostrou também ter uma boa convergência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFMA (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão) e à FAPEMA (Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão) pelo apoio ao desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

BARAN, M. E., WU, F. F. 1989. Optimal capacitor placement on radial distribution systems, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 4, pp 725-34.

FALAGHI, H., & HAGHHIFAM, M.-R. 2005. Distributed Generation Impacts on Electric Distribution Systems Reliability: Sensitivity Analysis. *In*: THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AS A TOOL, EUROCON 2005, Belgrade, Serbia & Montenegro, pp 1465-1468.

GATTA, F. M., ILICETO, F., LAURI, S., & MASATO, P. 2003. Modeling and Computer Simulation of Dispersed Generation in Distribution Networks. Measures to Prevent Disconnection During System Disturbance. *In*: POWER TECH CONFERENCE, 2003. Bologna, Italy.

LUO, G. X., & SEMLYEN A. 1990. Efficient load flow for large weakly meshed networks, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, pp. 1309–1316.

PAIVA, R. R. C., VILLA, L. F. L. & ZÜRN, H. H. 2009. Algoritmo para Avaliação de Impacto da Geração Distribuída em Redes de Distribuição. *In*: DÉCIMO TERCER ENCUENTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ, 2009, Puerto Iguazú, Argentina.

PALMA, A. S., OKUDA, B. S., CAMARGO, C. C. B., SICA E. T., BRIGATO G. A. A., & CARVALHO, R. T. 2010 Uma Contribuição ao Estudo do Fluxo de Potência em Redes de Distribuição com inserção de Unidades de Geração Distribuída pelo Método da Soma das Potências Modificado. Congresso Internacional de Distribuición Electrica, Buenos Aires, Argentina.

PEÑUELA, C. A., GRANADA, M., MANTOVANI, J. R. S. 2010. Ferramentas Computacionais para o Planejamento de Redes de Distribuição Desbalanceadas Considerando a Geração Distribuída. *In*: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2010, Bonito, Mato Grosso do Sul.

SHIRMOHAMMADI, D., & CHENG, C. S. 1995. A Three-phase Power Flow Method for Real Time Distribution System Analysis. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10 No 2, pp 671-679.

SHIRMOHAMMADI, D., HONG, H. W., SEMLYEN, A., & LUO, G. X. 1988. A compensation-based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks. IEEE Trans on Power System, Vol 3 No 2, pp 753-762.

TINNEY, W. F. 1972. Compensations Methods for Network Solutions by Triangular Fatorization. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, Issue 1, pp 123-127.

TORRES NETO, F. **Cálculo de fluxo de potência em alimentadores de distribuição baseado em tensões nodais e de ramos.** 2010. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

ZHU, Y., & TOMOSOVIC, K. 2002. Adaptive Power Flow Method for Distribution Systems With Dispersed Generation. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 3, pp 822-827.

ZHU, Y., & TOMOSOVIC, K. 2007. Optimal Distribution Power Flow for System with Distributed Energy Resources. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol 29, Issue 3, March 2007, pp 260-267.