

Análise de Métodos de Fluxo de Potência por Varredura para Cálculo do Desequilíbrio de Tensão em Sistemas de Distribuição Radiais

Adriano C. Marchesan

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
Farroupilha – IFFar - *Campus Jaguari*
Jaguari/RS, Brasil
adriano.marchesan@iffarroupilha.edu.br

Luana M. A. Costa; Gustavo V. Marconato; Samuel
Hunsche; Milena T. Zonin; Ghendy Cardoso Jr.

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Santa Maria/RS, Brasil
luanamaria.dc@gmail.com; gustavovmarconato@gmail.com;
samuelhunsche@gmail.com; milenatrentinz@gmail.com;
ghendy@ufsm.br

Abstract—This paper brings a complete comparison among three power flow methods used worldwide for radial distribution systems. These methods are referred to as Power Summation, Current Summation and *Ladder*. For analysis, the methods were implemented in MATLAB® platform employing object-oriented programming. Using the IEEE 13 Node Test Feeder, different loading conditions were considered, increasing the load in specific branches, causing a voltage unbalance. It allows a comparative analysis of results and performance related to processing time and number of iterations for convergence. Besides that it is possible to check if the voltage unbalance factor is acceptable by the Brazilian distribution procedures. Through this study, detailed information on the analyzed methods is provided, allowing students and researchers to choose the best alternative for the desired application.

Keywords—power flow methods, radial distribution systems, performance analysis, voltage unbalance factor.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição possuem um papel fundamental no fornecimento de energia elétrica, visto que são responsáveis pela interligação de unidades geradoras com os consumidores finais. Nesses sistemas, encontram-se a maior causa dos desequilíbrios de tensão devido à distribuição irregular de cargas por fases, que varia constantemente ocasionada pela inserção ou retirada de cargas [1].

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de um determinado sistema trifásico, e/ou na

defasagem elétrica entre as tensões do mesmo sistema [2]. Esse desequilíbrio pode causar severos danos aos equipamentos, como reduzir sua vida útil e desempenho, além de aumentar suas perdas elétricas, comprometendo o seu funcionamento.

O cálculo do Fator de Desequilíbrio (FD), visa compreender o desbalanço de tensão ao qual a rede elétrica está submetida, permitindo assim, à análise desse fenômeno. Os métodos mais difundidos para o cálculo do FD são o Método das Componentes Simétricas e os métodos propostos pelo *Council on Large Electric Systems* (CIGRÉ) e pelo *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) [1]. Para a determinação do FD, primeiramente é necessário conhecer a magnitude e a fase das tensões em cada barra do sistema, o que é obtido através do fluxo de potência.

Para o cálculo do fluxo de potência em sistemas de distribuição, destacam-se os métodos Somatório de Potências (SP), Somatório de Correntes (SC) e *Ladder* (LD). Esses possuem melhor robustez que os métodos clássicos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson (e suas versões desacopladas), em virtude de características peculiares aos sistemas de distribuição, como topologia predominantemente radial, existência de ramais monofásicos e bifásicos, linhas com baixa relação X/R, desequilíbrio de carga entre fases, cargas de naturezas diferentes, dentre outras [3]. Para avaliação do FD, mais especificamente, é imprescindível a utilização de um método de fluxo de potência que apresente boa performance em sistemas com desequilíbrio de carregamento entre fases.

Neste contexto, o presente trabalho realiza uma análise comparativa de desempenho dos métodos SP, SC e LD para cálculo do fluxo de potência em sistemas de distribuição radiais, frente a diferentes níveis de desequilíbrio de tensão no sistema, visando averiguar seu comportamento. Através deste estudo, são fornecidas informações detalhadas sobre os métodos analisados, permitindo que estudantes e pesquisadores escolham a melhor alternativa para a aplicação desejada.

Os autores agradecem o suporte técnico e financeiro do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração distribuída (INCT-GD), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES - nº 23038.000776/2017-54), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - nº 465640/2014-1), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS - nº 17/2551-0000517-1), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e do Programa Institucional de Incentivo à Qualificação Profissional dos Servidores do Instituto Federal Farroupilha (PIQP 2018/I).

Na Seção II deste artigo é apresentado em detalhe o equacionamento utilizado para aplicação dos métodos SP, SC e LD propostos em [4], [5] e [6], respectivamente. Na seção III é feita uma revisão sobre os métodos para cálculo do desequilíbrio de tensão. Na Seção IV é realizada uma breve revisão a respeito da modelagem dos principais elementos presentes em redes de distribuição. Já na Seção V são abordados Estudos de Caso para a análise em questão. Na Seção VI são discutidos os resultados obtidos através dos estudos e, por fim, na Seção VII são apresentadas as conclusões do trabalho.

II. MÉTODOS DE CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Os três métodos analisados utilizam os procedimentos de cálculo em varredura (*sweep*) denominados *backward* / *forward*. Na primeira etapa (*backward*), os cálculos são processados percorrendo o sistema de distribuição radial com origem nas suas extremidades e com destino a barra de referência (subestação). Na segunda etapa (*forward*), os cálculos são processados com origem na barra de referência e com destino as extremidades do sistema. A ordem com que as barras (ou nós) são percorridas depende da metodologia adotada.

Em [6] o sistema é percorrido ramal a ramal, migrando de um para outro sempre que um ponto de “junção” é encontrado. Já em [4] e [5] é utilizado um procedimento com base na classificação das barras em camadas (*layers*). Estas são enumeradas de acordo com a posição em relação a barra de referência.

Convém destacar que os procedimentos de varredura da rede não interferem na convergência e nos resultados numéricos obtidos com os métodos de fluxo de potência analisados. No entanto, podem influenciar em seu tempo de processamento conforme destacado em [7].

A. Somatório de Potências

Na etapa *backward* do método Somatório de Potências são calculadas as potências equivalentes de cada barra i da rede elétrica, a qual é composta pelo somatório das potências equivalentes de todas as j barras adjacentes, mais a própria potência da barra i e somatório das perdas nas interligações entre a barra i e as j barras conectadas após a mesma, conforme equação (1). No caso da potência reativa, deve ser considerada também na soma a potência reativa *shunt* injetada na barra i , conforme equação (2). Este procedimento é realizado em cada fase do sistema.

$$P_i^{eq} = \sum P_j + P_i + \sum PL_{ij} \quad (1)$$

$$Q_i^{eq} = \sum Q_j + Q_i + \sum QL_{ij} + Q_i^{sh} \quad (2)$$

Na etapa *forward*, são calculados os módulos das tensões em cada barra j do sistema através da equação biquadrada (3).

$$AV_j^4 + BV_j^2 + C = 0 \quad (3)$$

em que, os coeficientes A , B e C são obtidos por meio de (4), (5) e (6), respectivamente.

$$A = G_{ij}^2 + B_{ij}^2 \quad (4)$$

$$B = 2(P_j^{eq} G_{ij} - Q_j^{eq} B_{ij}) - y_{ij}^2 V_i^2 \quad (5)$$

$$C = (P_j^{eq}) + (Q_j^{eq}) \quad (6)$$

A influência das impedâncias mútuas pode ser considerada inserindo previamente fontes de tensão dependentes de corrente a barra i . Este procedimento é descrito em detalhe em [4]. Já o ângulo de fase da tensão em cada barra j é determinado pela expressão (7).

$$\delta_j = \delta_i + \theta_{ij} + \tan^{-1} \left(\frac{Q_j^{eq} - B_{ij} V_j^2}{P_j^{eq} + G_{ij} V_j^2} \right) V_j^2 \quad (7)$$

O cálculo das perdas de potência só é realizado ao final da primeira iteração, fornecendo dados para a próxima etapa *backward*. Este cálculo é realizado de forma matricial para incluir diretamente a influência das impedâncias mútuas.

$$[I_{ij}] = [Y_{ij}] \cdot [E_i] - [E_j] + j[b_{sh}] \cdot [E_i] \quad (8)$$

$$[I_{ji}] = [Y_{ij}] \cdot [E_j] - [E_i] + j[b_{sh}] \cdot [E_j] \quad (9)$$

O procedimento restante para a determinação das perdas é realizado de forma independente para cada fase do sistema através da expressão (10).

$$S_L = P_L + jQ_L = E_i I_{ij}^* + E_j I_{ji}^* \quad (10)$$

B. Somatório de Correntes

Na etapa *backward* do método Somatório de Correntes são calculados os fasores de corrente em cada fase do ramo que interliga a barra i a barra adjacente j . Isso é realizado através da soma das correntes injetadas na barra j e dos fasores de corrente que fluem em todos os ramos de interligação entre a barra j e as k barras conectadas após a mesma. Este procedimento é equacionado em (11).

$$I_{ij} = I_j + \sum I_{jk} \quad (11)$$

Na etapa *forward*, calcula-se os fasores de tensão em cada barra j do sistema a partir da tensão conhecida na barra i a montante e da queda de tensão entre barras i e j (12). A determinação das perdas é realizada ao final do processo iterativo empregando as equações (8), (9) e (10).

$$[E_j] = [E_i] - [Z_{ij}] \cdot [I_{ij}] \quad (12)$$

C. Ladder

Inicialmente, destaca-se que a denominação das etapas de varredura *backward* / *forward* utilizada em [6] para descrever o método *Ladder* é contrária a empregada nos métodos Somatório de Potências e Somatório de Correntes apresentados anteriormente. No entanto, para que não ocorra confusão, neste trabalho a denominação já utilizada será mantida.

Dito isso, na etapa *backward* do método Ladder são calculados os fasores de tensão (13) e de corrente (14) em cada barra i do sistema a partir da barra j adjacente. No caso de barras i que são pontos de “junção”, adota-se a última tensão calculada a partir de todas as barras diretamente ligadas a ela e a corrente resultante da aplicação da Lei de Kirchhoff das Correntes.

$$[V_{abc}]_i = [a] \cdot [V_{abc}]_j + [b] \cdot [I_{abc}]_j \quad (13)$$

$$[I_{abc}]_i = [c] \cdot [V_{abc}]_j + [d] \cdot [I_{abc}]_j \quad (14)$$

Já na etapa *forward*, os fasores de tensão nas barras j são calculados em função da tensão conhecida da barra i e da corrente calculada na etapa *backward* (15). As matrizes de coeficientes $[a]$, $[b]$, $[c]$, $[d]$, $[A]$ e $[B]$ são determinadas em função da modelagem dos elementos do sistema, discutida na próxima seção.

$$[V_{abc}]_j = [A] \cdot [V_{abc}]_i - [B] \cdot [I_{abc}]_i \quad (15)$$

III. MÉTODOS DE CÁLCULO DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Dentre os métodos para o cálculo do Fator de Desequilíbrio, destacam-se o método das Componentes Simétricas [8] e os propostos pelo CIGRÉ [1] e NEMA [9].

A. Método das Componentes simétricas

O método das Componentes Simétricas é fundamentado na decomposição de um sistema trifásico desequilibrado em três sistemas simétricos e equilibrados, que são chamados de sequência zero, sequência positiva e sequência negativa.

Dito isso, um sistema é considerado desequilibrado se possuir mais de uma componente de sequência concomitantemente. Logo, para o sistema ser equilibrado, as componentes de sequência zero e negativa devem ser nulas. Desta maneira, o grau de desequilíbrio de tensão é definido pela relação entre os módulos das tensões de sequência negativa e da sequência positiva [2].

$$FD\% = \frac{V_{negativa}}{V_{positiva}} \cdot 100 \quad (16)$$

B. CIGRÉ

O método proposto pelo *Conseil International des Grands Réseaux Electriques* (CIGRÉ) utiliza o módulo das tensões de linha para calcular o Fator de Desequilíbrio de Tensão, conforme as equações (17) e (18).

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (17)$$

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (18)$$

Esse método se assemelha ao método das Componentes Simétricas. Ele é empregado nos casos em que os aparelhos de

medição realizam leituras apenas dos módulos das tensões (tensão eficaz) [2].

C. NEMA

De acordo com norma MG1-14.34 da *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), o desequilíbrio percentual de tensão é dado pela razão entre o desvio máximo de tensão com relação a tensão média e a tensão média [9].

$$FD\% = \frac{\Delta V_{max}}{V_{medio}} \cdot 100 \quad (19)$$

IV. ASPECTOS GERAIS DE MODELAGEM

A. Linhas de distribuição

Para representação das linhas de distribuição em estudos de fluxo de potência, pode-se utilizar o modelo PI a parâmetros concentrados [6], ilustrado na Fig. 1. Este modelo é composto pelas impedâncias série dos condutores com acoplamento mútuo entre fases e as admitâncias *shunt*.

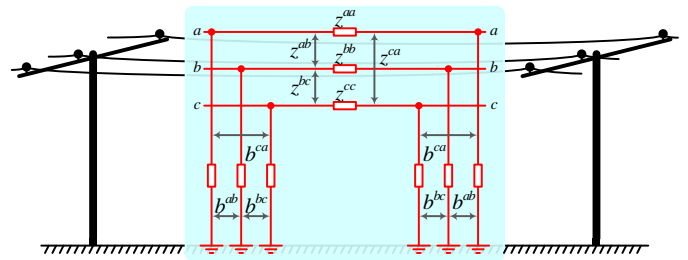


Fig. 1 - Representação do circuito PI equivalente da linha trifásica a parâmetros concentrados.

Matematicamente, este modelo pode ser expresso por uma matriz quadrada de ordem 3 com os elementos série e outra com os elementos *shunt*. Para representação dos ramos monofásicos e bifásicos, deve-se utilizar um valor elevado para a impedância própria da fase inexistente e um valor nulo para as mutuas e acoplamentos *shunt* com esta fase.

Estas matrizes são utilizadas diretamente pelos métodos Somatório de Potências e Somatório de Correntes nas etapas *backward* / *forward*. No método *Ladder*, no entanto, estas matrizes são utilizadas para determinar os coeficientes $[a]$, $[b]$, $[c]$, $[d]$, $[A]$ e $[B]$. Maiores detalhes sobre esta representação podem ser obtidos em [6].

B. Transformadores

Os transformadores utilizados para mudança de nível de tensão em sistemas de distribuição podem ser modelados como um banco sem acoplamento mútuo entre as unidades [10], conforme ilustra a Fig. 2. Este modelo baseia-se nas correntes injetadas nos nós do primário e secundário e nas suas respectivas tensões, conforme mostrado em (20).

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{ps} \\ Y_{sp} & Y_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix} \quad (20)$$

em que, os elementos Y_{pp} , Y_{ss} , Y_{sp} e Y_{ps} são compostos pelas submatrizes apresentadas em [10]. Estas, por sua vez, assumem os valores expressos por (21), (22) e (23), onde y_{cc} compreende a admitância do transformador obtido através de ensaio de curto-circuito.

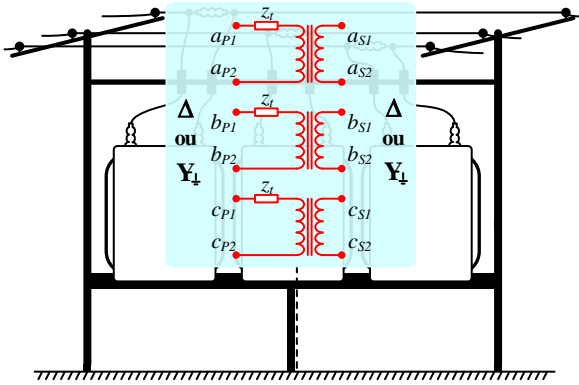


Fig. 2 - Representação do transformador trifásico.

$$Y_I = \begin{bmatrix} y_{cc} & 0 & 0 \\ 0 & y_{cc} & 0 \\ 0 & 0 & y_{cc} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$Y_{II} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 \cdot y_{cc} & -y_{cc} & -y_{cc} \\ -y_{cc} & 2 \cdot y_{cc} & -y_{cc} \\ -y_{cc} & -y_{cc} & 2 \cdot y_{cc} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$Y_{III} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -y_{cc} & y_{cc} & 0 \\ 0 & -y_{cc} & y_{cc} \\ y_{cc} & 0 & -y_{cc} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Novamente, no método *Ladder* esta representação não é utilizada diretamente, mas sim como requisito para determinação dos coeficientes matriciais [6].

C. Reguladores de tensão

Essencialmente, um regulador de tensão é constituído por um transformador com diversas derivações de seus enrolamentos, conhecidas como TAPs, e por um dispositivo de monitoramento e controle. Sua função primordial é realizar o controle automático de tensão em determinado ponto do sistema, geralmente equipado com um sistema de medição. Durante a operação, o dispositivo de monitoramento e controle verifica o valor da tensão medida e compara com o desejado, enviando um sinal de comando para alteração do TAP caso necessário.

A Fig. 3 esboça o modelo para representação do transformador de um regulador de tensão proposto em [11]. Nesta é representada o equivalente PI do modelo com as admitâncias do transformador em função do TAP t . Para facilitar a compreensão, o modelo é apresentado para uma única fase.

A troca de TAP acarreta fisicamente na modificação da relação de espiras do transformador, o que reflete em uma alteração da matriz admitância. Para representar este efeito, é necessário efetuar algumas mudanças nos elementos da matriz admitância nodal onde o transformador está inserido. Estas podem ser expressas em função da posição atual do TAP t_1 (24) e da nova posição t_2 (25).

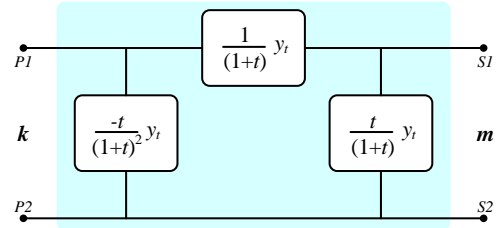


Fig. 3 - Circuito equivalente do regulador de tensão.

$$\alpha = \frac{t_1}{(1+t_1)} \quad (24)$$

$$\beta = \frac{t_2}{(1+t_2)} \quad (25)$$

Os novos valores para as admitâncias dos elementos $k-m$ da matriz admitância nodal, representados com o índice 2, são calculados conforme (26), (27) e (28). O equacionamento detalhado pode ser encontrado em [11].

$$Y_{km_2} = Y_{km_1} - (\alpha - \beta) y_t \quad (26)$$

$$Y_{kk_2} = Y_{kk_1} + [\beta^2 - \alpha^2 + 2(\alpha - \beta)] y_t \quad (27)$$

$$Y_{mm_2} = Y_{mm_1} \quad (28)$$

Para a representação de um regulador de tensão trifásico, pode-se a incorporar o modelo de transformador apresentado em (20). Assim, as equações (26), (27) e (28) são calculadas a partir do TAP de cada fase e a matriz admitância da sua ligação.

D. Cargas

Para contemplar os diferentes tipos de cargas presentes em sistemas de distribuição e representar seus efeitos sobre o sistema, pode-se utilizar o modelo ZIP. Neste, representa-se a parcela de impedância constante da carga de forma proporcional ao quadrado da magnitude da tensão, a parcela corrente constante diretamente proporcional a tensão e a parcela de potência constante independente do valor da tensão.

Os polinômios apresentados em (29) e (30) expressão o modelo ZIP para a potência ativa e reativa da carga em cada fase, respectivamente, onde $a_p + b_p + c_p = 1$ e $a_q + b_q + c_q = 1$.

$$P = a_p V^2 + b_p V + c_p \quad (29)$$

$$Q = a_q V^2 + b_q V + c_q \quad (30)$$

As duas possibilidades de conexão das cargas nas fases são ilustradas na Fig. 4.

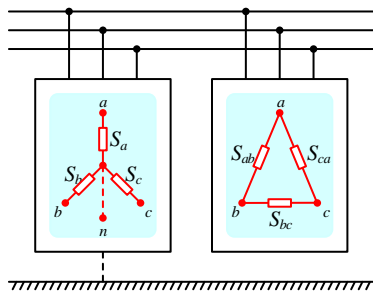


Fig. 4 – Conexão de cargas em Y e Δ.

Em sistemas de distribuição, além das cargas concentradas, é comum a representação de cargas distribuídas. Esta abordagem permite que algumas barras do sistema sejam suprimidas, reduzindo o esforço computacional na realização dos cálculos, mas mantendo a influência das cargas.

Um dos modelos de carga distribuída mais adotados na literatura é proposto em [6]. A Fig. 5 esboça sua representação, onde L corresponde ao comprimento do trecho em que a carga S encontra-se linearmente distribuída.

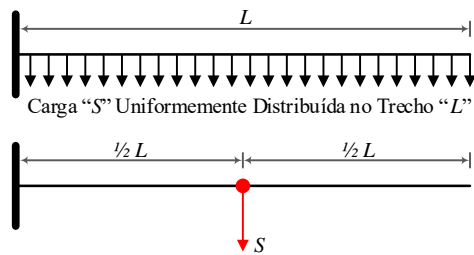


Fig. 5 - Modelo de carga distribuída.

E. Capacitores shunt

A modelagem de capacitores *shunt* para cálculo do fluxo de potência pode ser equivalente a utilizada para a representação de cargas reativas. As conexões disponíveis são as mesmas ilustradas na Fig. 4. Já a natureza do modelo segue a representação de impedância constante, na qual o valor de potência é proporcional ao quadrado da magnitude da tensão.

V. ESTUDO DE CASO

Para demonstrar o comportamento dos métodos analisados no cálculo do Desequilíbrio de Tensão, abordou-se o sistema teste de distribuição IEEE 13 barras (*IEEE 13 Node Test Feeder*), apresentado na Fig. 6. Este é composto, essencialmente por: um regulador de tensão; um transformador trifásico; linhas trifásicas, bifásicas e monofásicas; capacitores em derivação; e carregamento desequilibrado. Os dados para sua modelagem podem ser encontrados em [12].

Utilizando o sistema teste, dois estudos de caso foram realizados. O primeiro deles busca validar os resultados do cálculo de fluxo de potência de cada método, comparando-os

com o *benchmark* do sistema IEEE 13 barras [12]. No segundo caso abordado, busca-se verificar as características de convergência e robustez dos métodos frente a um aumento no desequilíbrio de tensão no sistema, principal objeto de estudo do presente trabalho.

Para a realização da análise, os métodos abordados foram implementados em ambiente MATLAB® empregando o paradigma de orientação a objeto. Os casos foram testados em um computador com processador Intel® i5-4440s de 2.8GHz, 8GB de memória e sistema operacional UBUNTU 16.04.

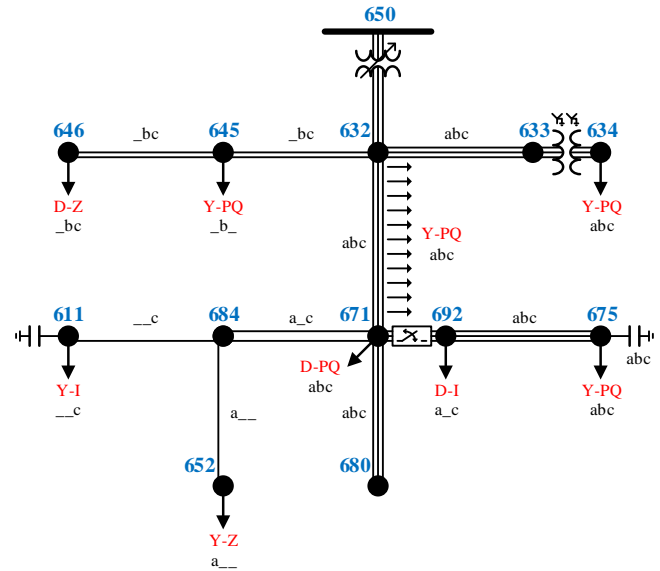


Fig. 6 - IEEE 13 Node Test Feeder.

VI. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizou-se como critério de convergência a variação da tensão entre interações subsequentes, menor ou igual a 1×10^{-6} , para todas as barras. Verificou-se que os três métodos implementados convergem para os mesmos resultados, em módulo e ângulo. Em vista disso, no primeiro estudo de caso, os resultados dos métodos apresentam o mesmo erro em relação ao *benchmark* do sistema teste [12].

Na Fig. 7 observam-se os baixos valores de erro obtidos para todas as fases de cada barra. A maior diferença é encontrada na fase C da barra 692, correspondendo a $1,739 \times 10^{-4}$ pu.

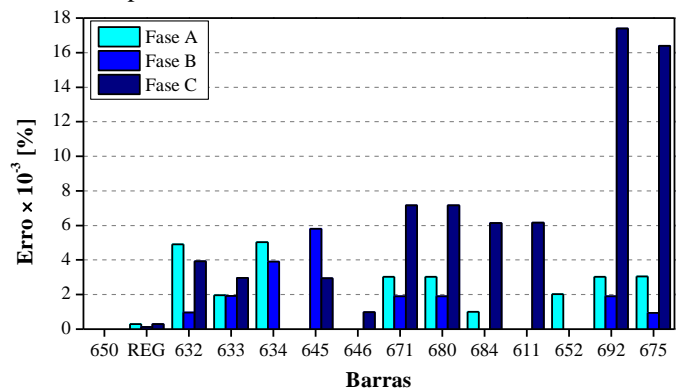


Fig 7 - Diferença da magnitude da tensão calculada com os três métodos analisados em relação ao *benchmark* do IEEE 13 barras [12].

VII. CONCLUSÃO

No segundo estudo de caso, para variar o nível de desequilíbrio de tensão no sistema, incrementou-se gradativamente as cargas dos ramais monofásicos e bifásicos até obter a falha de convergência de cada método. Nesta análise, selecionou-se a barra de número 675, visto que esta apresentou o maior nível de desequilíbrio. O FD foi calculado pelo método CIGRÉ, através das equações (17) e (18), conforme especificado em [2] e [13].

Com um FD de 8%, o método SP, parou de convergir, enquanto os métodos SC e LD chegaram a 8,75%. Na Fig. 8, apresenta-se o número de iterações sempre mais elevado do método SP em relação aos métodos SC e LD, que possuem aproximadamente o mesmo número de iterações. Porém para um FD elevado, o método SC possui um número menor de iterações.

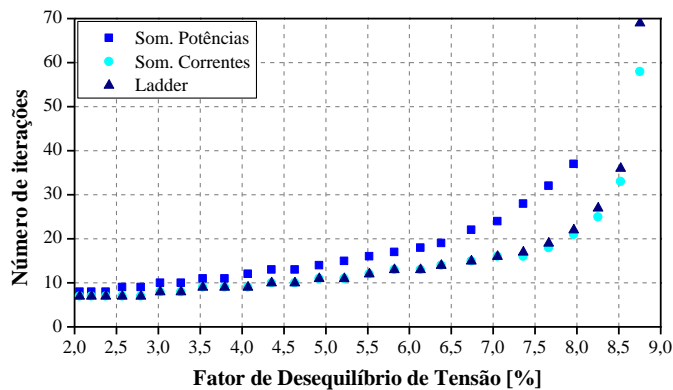


Fig 8 – Número de iterações dos três métodos de cálculo de fluxo de potência para diferentes desequilíbrios de tensão na barra número 675.

Uma característica semelhante é percebida no tempo médio de processamento, conforme a Fig. 9. Cada simulação foi executada 100 vezes, fazendo-se a média aritmética dos tempos de processamento. O método SP, necessitando de mais iterações, leva mais tempo para convergir. Os métodos SC e LD apresentam tempos semelhantes, sendo que o SC apresenta leve vantagem, principalmente em níveis elevados de FD.

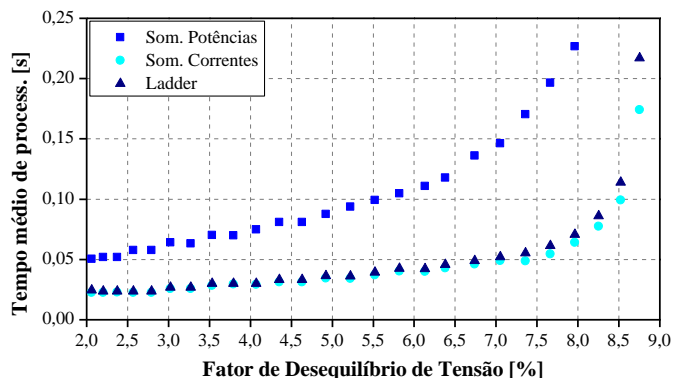


Fig 9 – Tempo de processamento dos três métodos de cálculo de fluxo de potência para diferentes desequilíbrios de tensão na barra número 675.

Neste artigo foi apresentada uma análise de desempenho de três métodos de cálculo de fluxo de potência em redes radiais para diferentes percentuais de desequilíbrio de tensão. Nele foram apresentadas simulações de tais métodos aplicados ao Sistema Teste IEEE 13 barras [12], onde apresentaram bons valores de convergência, com um erro máximo próximo a 0,02% em relação ao *benchmark*.

Para diferentes valores de FD os métodos apresentaram diferentes tempos de convergência e números de iterações entre si. A partir desta análise conclui-se que o método SC apresenta a melhor performance quando se trata de desequilíbrio de tensão, possuindo o menor tempo de processamento e menor número de iterações.

Em suma, a partir deste trabalho é possível desenvolver os conhecimentos sobre o cálculo do fluxo de carga e tomar uma decisão quanto ao método mais adequado para a aplicação em questão.

REFERÊNCIAS

- [1] R. G. Teodoro. *Metodologia Para Compensação de Desequilíbrio em Redes Elétrica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista – Ilha Solteira, 2005.
- [2] ANEEL PRODIST. “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8 Revisão 4 – *Qualidade da Energia Elétrica*”, pp 16-17, Brasília, 2012.
- [3] H. Rudnick and M. Munoz, “Influence of modeling in load flow analysis of three phase distribution systems,” in *Proc. of the 1990 IEEE Colloquium in South America*, Argentina, Brazil, Chile, 1990, pp. 173-176.
- [4] R. K. da Silva. *Análise Multifásica de Fluxo de Potência em Redes Radiais de Distribuição de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará – Belém, 1995.
- [5] C. S. Cheng and D. Shirmohammadi, “A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 671-679, May 1995.
- [6] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, Boca Raton, Florida: CRC Press, c2002 [xiii], 314 p.
- [7] A. C. Santos, M. Nanni, M. R. Mansour, A. C. B. Delbem, J. B. A. London and N. G. Bretas, “A power flow method computationally efficient for large-scale distribution systems,” in *Proc. 2008 IEEE/PES Trans. Distrib. Conf. and Exp.: Latin America*, Bogota, 2008, pp. 1-6.
- [8] C. L. Fortescue, “Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks”. *Trans. AIEE*, vol. 37, no. 2, pp. 1027-1140, 1918.
- [9] NEMA Condensed MG 1-2011, “Information Guide for General Purpose Industrial AC Small and Medium Squirrel-Cage Induction Motor Standards”, Virginia, 2014.
- [10] Mo-Shing Chen and W. E. Dillon, “Power system modeling,” in *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 7, pp. 901-915, July 1974.
- [11] P. Lynn, *Power System Load Flow Analysis*, New York: McGraw-Hill, 2004, p. 182.
- [12] IEEE Power Engineering Society, “Distribution System Analysis Subcommittee”, IEEE 13 Node Test Feeder. [Online]. Available: <https://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders>.
- [13] IEEE 1159, “*Recommended practice for monitoring electric power quality*”, New York, 2009.