

Análise do Impacto da Inserção de Capacitores no Desequilíbrio de Tensão em Sistemas de Distribuição

Suelem Christian dos Santos
Thays Gomes de Almeida
Mateus Corrêa Lima Pereira
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, Brasil
suelem.santos@engenharia.ufjf.br

Leandro Ramos de Araujo
Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo
Dept. Energia Elétrica- Faculdade de Engenharia
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, Brasil
leandro.araujo@ufjf.edu.br

Resumo—Este artigo descreve um método para a redução do desequilíbrio de tensão em sistemas de distribuição. O método utilizado é baseado em circuitos elétricos trifásicos utilizando o método de Newton-Raphson em conjunto com a otimização através dos algoritmos genéticos e a técnica de componentes simétricas aplicada aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Para isto, foi utilizado o método de alocação de bancos de capacitores através da aplicação de um algoritmo genético. O objetivo deste trabalho foi a otimização dos sistemas de distribuição através da minimização do índice de desequilíbrio de tensão proporcionados pela alocação de capacitores.

Palavras-Chaves— algoritmo genético, alocação ótima de capacitores, componente simétrica, índice de desequilíbrio de tensão, método de Newton-Raphson, otimização, sistemas de distribuição.

I. INTRODUÇÃO

O desempenho de um sistema elétrico de potência depende das configurações e das características dos equipamentos que o constituem. Sendo que todo sistema elétrico de potência possui algum grau de desequilíbrio. Por menor que seja, este desequilíbrio pode impactar na eficiência dos sistemas, sejam estes sistemas de transmissão ou de distribuição.

Durante muito tempo, por falta de recursos computacionais adequados, os sistemas elétricos de potência eram considerados equilibrados para propiciar a realização de várias análises, e as componentes de sequência eram utilizadas para modelar os sistemas elétricos e utilizadas em diversos estudos, tais como fluxo de potência, otimização, estabilidade, dimensionamento de equipamentos, etc. Atualmente, muitos projetistas e pesquisadores ainda aplicam modelos baseados em redes de sequência para a avaliação de sistemas desequilibrados. Desta forma, os erros advindos destas simplificações são ignorados. Sendo que estes erros crescem de acordo com o grau de desequilíbrio do sistema, ou seja, quanto mais desequilibrado for o sistema a ser analisado maior será o erro na análise.

Atualmente, muitos autores, consideram que as cargas, em um sistema de transmissão, são equilibradas, e que as linhas são totalmente transpostas. Em sistemas de transmissão que usualmente possuem um menor grau de desequilíbrio, estas considerações não são graves. No entanto, este fenômeno deve ser profundamente estudado, caso determinada parte do

sistema tenha uma grande quantidade de linhas de transmissão não idealmente transposta.

Por outro lado, nos sistemas de distribuição, as cargas são completamente desequilibradas e possuem ramais monofásicos e bifásicos, indução mútua entre circuitos de mesmos ou diferentes níveis de tensão, conexões complexas de transformadores, condutores de neutro, dentre outras diversas características que impossibilitam obtenção de resultados corretos quando utilizada a transformação para componentes de sequência.

Nos últimos anos, engenheiros e pesquisadores de sistemas de energia desenvolveram ferramentas computacionais avançadas para a análise dos sistemas de distribuição (DS) [1]. Estas ferramentas visam à melhoria dos cálculos de fluxo de potência, como por exemplo, [2] - [6] algoritmos de reconfiguração [7], [8], dispositivos de compensação para alcançar minimização de perdas [9], os impactos de geração distribuída [10], [11], estimação de estado [12] e desequilíbrio de tensão [13] - [16], entre outros.

Os desequilíbrios de tensão usualmente produzem condições de operação indesejáveis nos sistemas de distribuição e impactam diretamente no desempenho de equipamentos e podem aumentar as perdas elétricas.

Neste trabalho será realizada uma investigação do uso de capacitores para a redução dos desequilíbrios em sistemas de distribuição. O objetivo principal do estudo que será realizado é indicar em que barras devem ser instaladas os bancos de capacitores, a quantidade de compensação reativa em valores discretos, de forma a não violar nenhum limite operacional da rede e obter uma solução com menor custo.

Desta forma, o problema de alocação ótima de bancos de capacitores propõem um modelo de otimização complexo envolvendo restrições não-lineares, inteiras e de análise combinatória. Para a solução deste problema de otimização será utilizado um programa de cálculo do fluxo de potência trifásica acoplado a uma rotina de algoritmo genético.

Ressalta-se também que são características do problema em estudo neste artigo:

- Existência de várias soluções factíveis, resultando em uma região de solução com diversos pontos ótimos locais, dificultando a obtenção da solução ótima global.
- Elevado tempo computacional.

Na seção II serão apresentados os modelos de equipamentos utilizados neste trabalho, na seção III e IV serão apresentados o fluxo de potência trifásico simplificado e o algoritmo proposto para a redução de desequilíbrio, os resultados serão apresentados na seção V e as conclusões na seção VI.

II. MODELOS DOS EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS EM COORDENADAS DE FASE

A. Alimentadores de Distribuição

A matriz de impedâncias em coordenadas de fase utilizada neste trabalho é apresentada em (1).

$$\begin{bmatrix} V_{A,1} - V_{A,2} \\ V_{B,1} - V_{B,2} \\ V_{C,1} - V_{C,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

O circuito elétrico relativo à operação matricial utilizada (1) é apresentado na Figura 1.

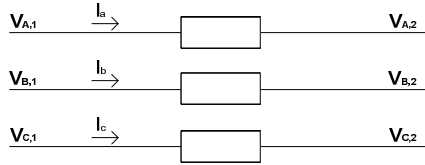


Figura 1- Circuito trifásico de Impedância Zabc.

B. Cargas

As cargas inseridas no sistema de distribuição geralmente possuem naturezas distintas como, por exemplo, potência constante, corrente constante impedância constante, ou ainda como uma composição equivalente destes três tipos, sendo que cada tipo de carga possui uma relação direta com a variação de tensão.

Matematicamente, as mesmas podem ser modeladas pelas equações apresentadas em (2).

Ressalta-se que neste artigo todas as cargas serão modeladas como potência constante, pois é a condição de maior criticidade em relação aos objetivos propostos.

$$I_A = \left(\frac{S_{A0}}{V_A} \right)^*; I_B = \left(\frac{S_{B0}}{V_B} \right)^*; I_C = \left(\frac{S_{C0}}{V_C} \right)^* \quad (2)$$

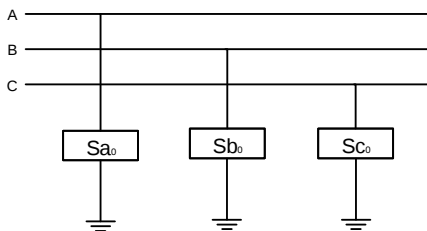


Figura 2-Cargas monofásicas desequilibradas

C. Subestação

As subestações são também responsáveis pelo controle de tensão no barramento principal de um alimentador. Nelas são definidos valores de tensão base para a distribuição de energia elétrica, sendo capaz de garantir a distribuição nos níveis especificados, como apresentado em (3).

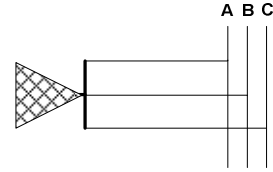


Figura 3 – Circuito Trifilar Representativo da Subestação

$$\begin{bmatrix} V_A - V_{esp} \\ V_B - V_{esp} \\ V_C - V_{esp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde:

- $V_a, V_b, e V_c$, são os valores de tensão no barramento principal do alimentador;
- V_{esp} é o valor de tensão especificado pela subestação.

D. Capacitores

Os capacitores são dispositivos elétricos constituídos de duas placas condutoras, devidamente isoladas, objetivados ao armazenamento de energia elétrica.

Nos sistemas de distribuição, a inclusão destes dispositivos ao longo do barramento apresenta uma técnica muito utilizada na melhora do perfil de tensão.

A energia armazenada nos capacitores oferece ao sistema suporte de reativos que além de ofertar a melhora dos níveis de tensão ao longo do barramento reduzem significativamente o módulo da corrente drenada do alimentador, agregando assim também, a redução das perdas.

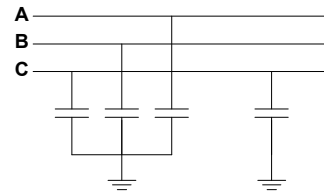


Figura 4-Alocação de Capacitores na Rede Trifásica

A injeção de corrente reativa produzida pela instalação de um capacitor em uma determinada fase pode ser descrita em (4).

$$I_{cap} = \frac{V_{fase}}{X_{cap}} \quad (4)$$

III. FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICO SIMPLIFICADO

O fluxograma da Figura 5 descreve o fluxo de potência trifásico simplificado utilizado neste trabalho.

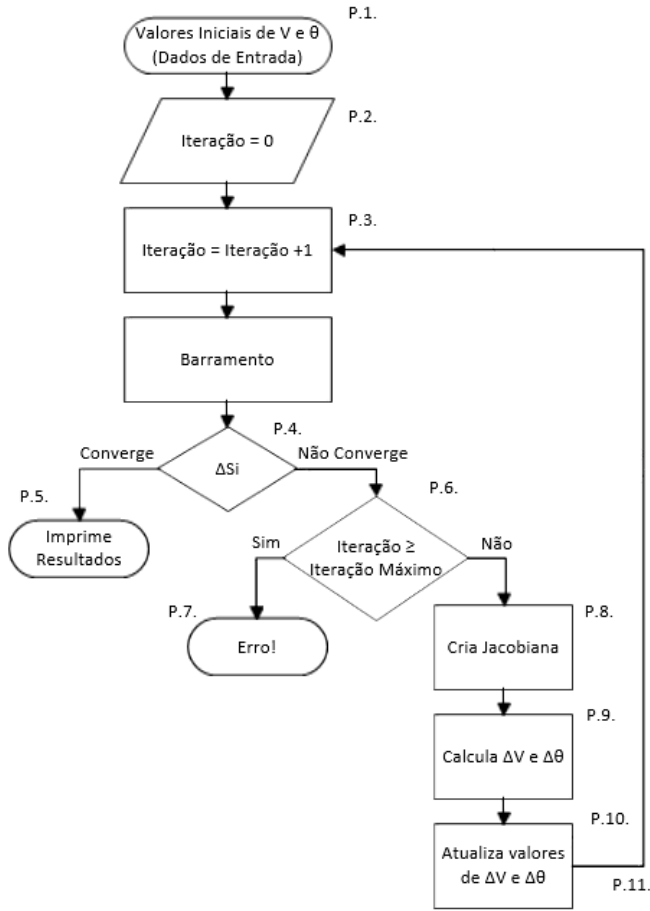


Figura 5 - Fluxograma da metodologia aplicada

Onde:

P.1 – Os valores iniciais do módulo e da fase das tensões de entrada são lidos.

P.2 – O valor de Iteração é iniciado em zero.

P.3 – O contador de iterações é atualizado.

P.4 – O valor dos resíduos de potência (ΔSi) é analisado para verificar a convergência.

P.5 – Se a variação for menor do que a margem de erro preestabelecida como aceitável (0.0001 p.u.), o processo converge e os resultados são impressos para o usuário.

P.6 – Se a variação for maior do que a margem de erro preestabelecida como aceitável (0.0001 p.u.), o processo não converge e o número de iterações é verificado.

P.7 – Se o valor da variável iterativa for o máximo e o processo não tenha convergido, uma mensagem de erro é emitida para o usuário.

P.8 – Neste passo é montada a matriz Jacobiana do sistema. A matriz Jacobiana é construída através das equações de nó do sistema analisando. Cada elemento desta matriz é obtido pelas derivadas parciais de primeira ordem das equações de nó do sistema, em relação às tensões de cada nó ou barramento.

Criada a matriz Jacobina é possível calcular o incremento de tensão ΔV para a próxima iteração dado por (5).

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & \dots & J_{1n} \\ J_{21} & J_{22} & \dots & J_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ J_{n1} & J_{n2} & \dots & J_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_2 \\ \vdots \\ \Delta I_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

P.9 – Os valores das tensões em cada barramento são calculados através do método de Newton-Raphson.

P.10 – Os valores de tensão e ângulo são atualizados.

P.11 – O processo retorna para P.3.

IV. MÉTODO PROPOSTO PARA A REDUÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Matematicamente, o índice de desequilíbrio de tensão em um barramento pode ser calculado pela razão entre as tensões de componente simétrica negativa e componente simétrica positiva, conforme definido em (6).

$$FD(\%) = \left(\frac{V_-}{V_+} \right) * 100\% \quad (6)$$

O problema de otimização proposto neste trabalho foi solucionado através do uso dos algoritmos genéticos. A função objetivo é avaliada através do cálculo dos desequilíbrios de tensão nos barramentos.

A redução de desequilíbrio se fez através da alocação de capacitores em barras estratégicas, podendo existir ou não a alocação de banco de capacitores trifásicos, (no caso, a alocação de 3 capacitores monofásicos em uma mesma barra em fases distintas) ou alocação monofásica.

Ao longo do alimentador, em cada barramento, foi considerada a possibilidade da instalação de bancos de capacitores.

Considere a Figura 6 um barramento qualquer de um sistema analisado.

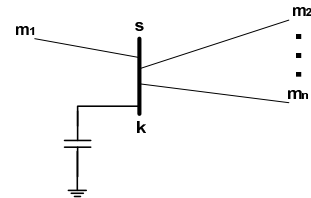


Figura 6- Barramento de um Sistema

A equação de nó para o barramento em questão é descrita em (7).

$$I_{s,m_1} + I_{s,m_2} + \dots + I_{s,m_n} + x \frac{V_k^s}{X_c^s} = 0 \quad (7)$$

Onde:

- $x \in \{0 \text{ ou } 1\}$, representando a injeção ou a não – injeção de reativo na barra.

O fluxograma da Figura 7 apresenta o método proposto de redução de desequilíbrio baseado no algoritmo genético utilizado.

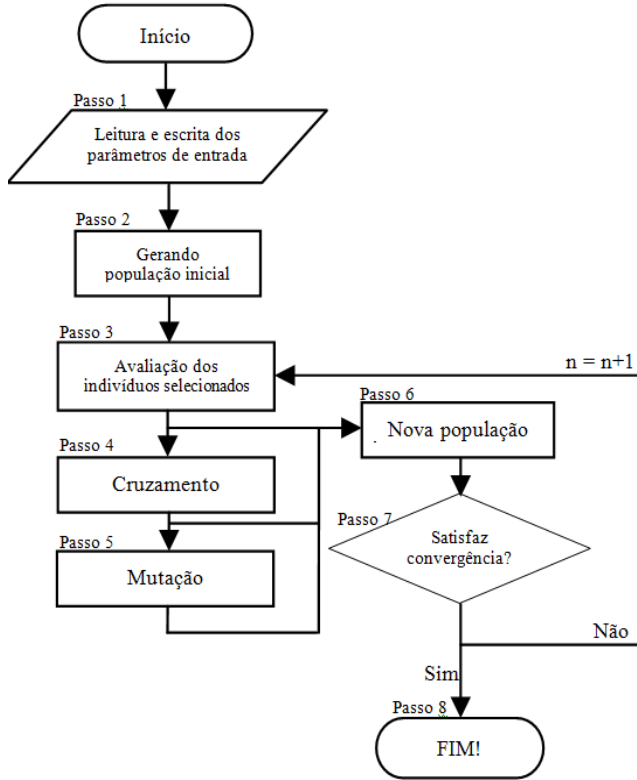


Figura 7 - Fluxograma Algoritmo Genético.

Passo 1 – são determinados os parâmetros fixos de entrada: taxa de probabilidade de cruzamento, taxa de probabilidade de reprodução, número de indivíduos na população inicial e número máximo de gerações.

Passo 2 – são gerados, de forma randômica, indivíduos para a composição da população inicial (semelhante ao método da roleta) neste passo, também ocorre à codificação fenótipo-genótipo dos indivíduos gerados.

A população inicial, assim como a de solução ótima, é constituída de informações da alocação ótima (barra estratégica, fase e carga respectivamente).

$$x_{m,n} = [Barra_1 | Barra_2 | \dots | Barra_n | Fase_1 | Fase_2 | \dots | Fase_n | Carga_1 | Carga_2 | \dots | Carga_n]$$

Onde:

- m – número de indivíduos da população;
- n – número de fenótipos de um indivíduo.

Passo 3 – os indivíduos selecionados são avaliados na função objetivo. Aos indivíduos mais aptos, ou seja, aqueles que oferecerem os melhores resultados de avaliação no processo ótimo são atribuídos maiores probabilidade de sobrevivência, sendo guardados para a composição das gerações futuras.

A função objetivo para a avaliação dos parâmetros ótimos escolhidos em cada geração é apresentada em (8).

$$FOB = Min \sum_{i \in \Omega} \frac{|V_{-, \Omega}|}{|V_{+, \Omega}|} \quad (8)$$

Onde:

- Ω - são todas as barras existentes no sistema trifásico.

Passo 4 – os indivíduos mais aptos são recombinados para inserção nas gerações futuras.

Passo 5 – os indivíduos obtidos no processo de cruzamento do passo 4 sofrerão alteração nos genes de forma aleatória para inserção nas gerações futuras.

Passo 6 – atualização da população da geração futura. Os indivíduos avaliados, cruzados e mutados são inseridos na população de avaliação da geração futura.

Passo 7 – é verificada a condição de convergência, caso o número de gerações n seja máximo, o algoritmo converge seguindo ao passo 8, caso contrário é necessária o incremento do número de gerações retornando ao passo 2 com a população atualizada no passo 6.

Passo 8 – convergência do processo ótimo, imprimir valores ótimos de avaliação.

V. RESULTADOS

O método proposto na seção IV foi testado em 3 sistemas distintos. Os sistemas testados foram: IEEE 33 barras, IEEE 50 barras e IEEE 69 barras.

O procedimento utilizado em todos os casos para a otimização foi executar o algoritmo genético três vezes para cada caso e com população inicial de 100 indivíduos e máximo de 2000 gerações.

Todas as barras do sistema foram consideradas candidatas a receber a instalação de capacitores, assim como todas as fases.

Os seguintes parâmetros do AG foram utilizados:

- Taxa de probabilidade de Reprodução: 60%.
- Taxa de probabilidade de Mutação: 1%.

A. Estudo dos Casos – Sistema IEEE 33 Barras

A Figura 8 apresenta o circuito unifilar do sistema IEEE de 33 barras.

Na Tabela 1 são apresentados os locais de instalação de capacitores considerando a possibilidade de alocação de 3, 4 e 5 banco de capacitores.

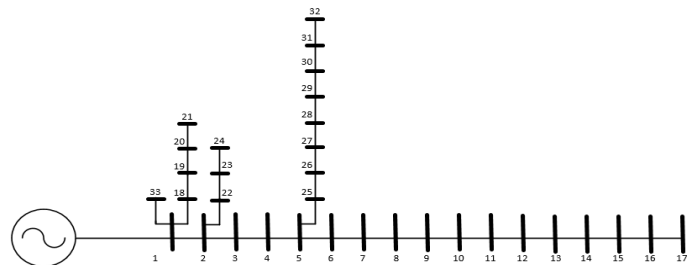


Figura 8 - Circuito unifilar do sistema IEEE de 33 barras

TABELA 1-SISTEMA 33 BARRAS
ALOCAÇÃO DE CAPACITORES DISCRETOS

Resultados Ótimos				
Caso Ótimo	Barras	Fase	Carga(Kvar)	FOB
3 Capacitores	7	A	0.25	0.1660
	18	*	0.75	
	14	B	0.25	
4 Capacitores	27	A	0.5	0.1281
	10	B	0.25	
	5	*	*	
	23	*	0.75	
5 Capacitores	4	A	*	0.0699
	8	A	0.25	
	12	B	0.25	
	28	A	*	
	3	C	0.25	

O “*” significa que não houve alocação de capacitores no barramento. Embora exista a disponibilidade de capacitores, os sistemas se encontram com baixo índice de desequilíbrio, logo a adição de mais capacitores poderia piorar o desequilíbrio de tensão do sistema.

Na Figura 9 é apresentado o fator do desequilíbrio de tensão de cada barra trifásica do Sistema IEEE 33 Barras, que foi calculado conforme indicado na equação (6), assim como nos estudos de casos apresentados em B e C. Os resultados "sem o AG" representa a configuração base do caso. Os resultados indicados como "com o AG 3-4-5", representam os valores otimizados com a alocação de 3, 4 e 5 bancos de capacitores respectivamente.

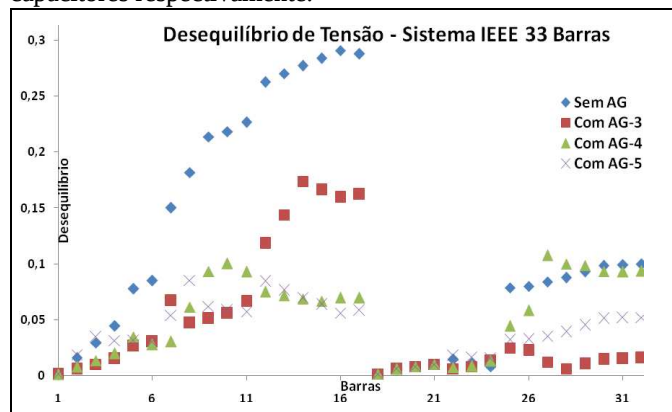


Figura 9 – Desequilíbrio de Tensão nas Barras do Sistema IEEE 33 Barras

B. Estudos Casos – Sistema IEEE 50 Barras

A Figura 10 apresenta o circuito unifilar do sistema IEEE de 50 barras.

Na Tabela 2 são apresentados os locais de instalação de capacitores considerando a possibilidade de alocação de 3, 4 e 5 banco de capacitores.

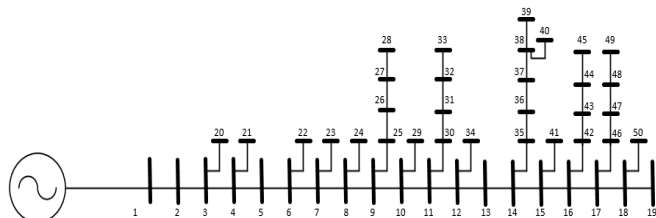


Figura 10 - Circuito unifilar do sistema IEEE de 50 barras

TABELA 2- SISTEMA 50 BARRAS
ALOCAÇÃO DE CAPACITORES DISCRETOS

Resultados Ótimos				
Caso Ótimo	Barra	Fase	Carga (Kvar)	FOB
3 Capacitores	4	B	0.75	0.1074
	10	A	0.5	
	8	A	0.25	
4 Capacitores	17	A	0.75	0.0468
	19	A	0.25	
	13	A	0.5	
	49	B	0.25	
5 Capacitores	25	A	0.5	0.0430
	34	A	0.5	
	36	B	0.25	
	12	C	*	
	42	*	0.25	

Na Figura 11 é possível analisar o comportamento do desequilíbrio de tensão ao longo das barras do Sistema IEEE 50 Barras tanto para o caso base quanto para os casos otimizados.

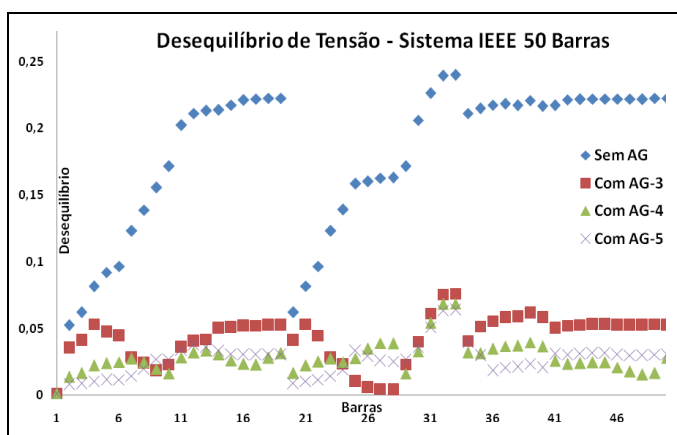


Figura 11– Desequilíbrio de Tensão nas Barras do Sistema IEEE 50 Barras

C. Estudos de Casos - Sistema IEEE 69 Barras

A Figura 12 apresenta o circuito unifilar do sistema IEEE de 69 barras.

Na Tabela 3, são apresentados os locais de instalação de capacitores considerando a possibilidade de alocação de 3, 4 e 5 banco de capacitores.

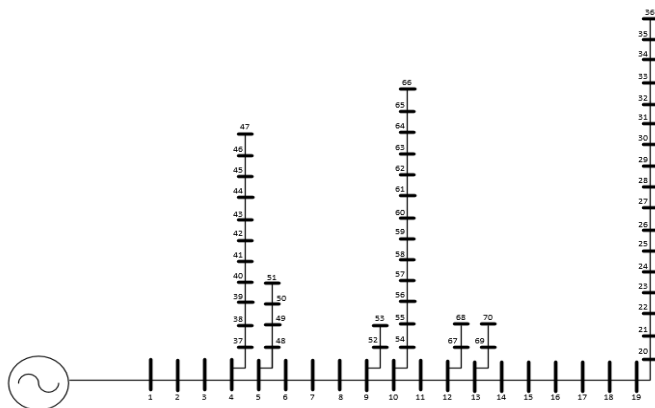


Figura 12 - Circuito unifilar do sistema IEEE de 69 barras

TABELA 3- SISTEMA 69BARRAS
ALOCÇÃO DE CAPACITORES DISCRETOS

Resultados Ótimos				
Caso Ótimo	Barra	Fase	Carga (Kvar)	FOB
3 Capacitores	62	B	0.75	9.5857
	55	*	0.5	
	12	A	0.75	
4 Capacitores	40	C	0.5	6.6461
	7	B	0.5	
	34	C	*	
	66	*	0.25	
5 Capacitores	5	B	*	5.7615
	63	B	0.25	
	20	A	0.75	
	47	A	0.25	
	21	B	*	

Na Figura 13 é possível analisar o comportamento do desequilíbrio de tensão ao longo das barras do Sistema IEEE 69 Barras tanto para o caso base quanto para os casos otimizados.

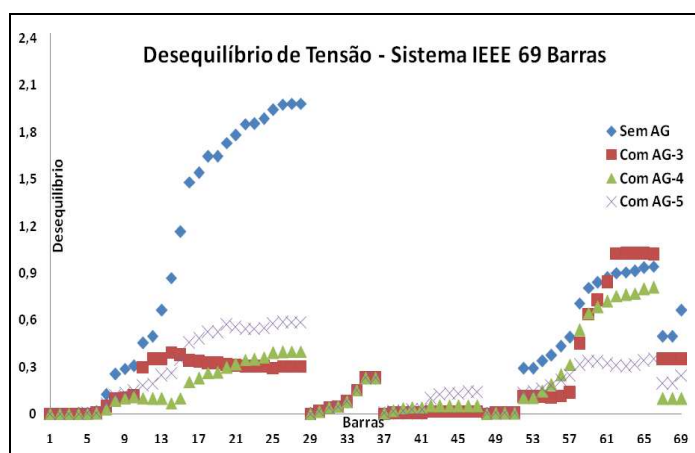


Figura 13 – Desequilíbrio de Tensão nas Barras do Sistema IEEE 33 Barras

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma técnica de otimização utilizando-se um algoritmo genético para a alocação ótima de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica com auxílio de um algoritmo de fluxo de carga. O objetivo deste trabalho foi a mitigação do desequilíbrio de tensão do sistema através da alocação de um número mínimo de capacitores.

Os resultados obtidos neste estudo atenderam de forma satisfatória a mitigação do desequilíbrio de tensão nos sistemas analisados. Pode-se perceber que em todos os casos as alocações dos capacitores reduziram de forma significativa os índices de desequilíbrio dos sistemas base.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a CNPq, FAPEMIG, UFJF e Capes pelo apoio e incentivo prestado a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

[1] IEEE Power & Energy, "Getting smart," *IEEE Power Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 41–48, Mar./Apr. 2010.

[2] P. A. N. Garcia, J. L. R. Pereira, S. Carneiro, Jr., V. M. Costa, and N. Martins, "Three-phase power flow calculations using the current injection method," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 508–514, May 2000.

[3] R. M. Ciric, A. P. Feltrin, and L. F. Ochoa, "Power flow in four-wire distribution networks—General approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 4, pp. 1283–1290, Nov. 2003.

[4] D. R. R. Penido, L. R. Araujo, S. Carneiro, Jr., J. L. R. Pereira, and P. A. N. Garcia, "Three-phase power flow based four-conductor current injection method for unbalanced distribution networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 404–503, May 2008.

[5] L. R. Araujo, D. R. R. Penido, S. Carneiro, Jr., J. L. R. Pereira, and P. A. N. Garcia, "Comparisons between the three-phase current injection method and the forward/backward sweep method," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 32, pp. 825–833, 2010.

[6] D. R. R. Penido, L. R. Araujo, S. Carneiro, Jr., and J. L. R. Pereira, "A new tool for multiphase electrical systems analysis based on current injection method," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 44, pp. 410–420, 2013.

[7] F. V. Gomes, S. Carneiro, Jr., J. L. R. Pereira, M. P. Vinagre, P. A. N. Garcia, E. J. Oliveira, and L. R. Araujo, "A new distribution system reconfiguration approach using optimum power flow and sensitivity analysis for loss reduction," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 1211–1218, Nov. 2006.

[8] Y.-K. Wu, C.-Y. Lee, L.-C. Liu, and S.-H. Tsai, "Study of reconfiguration for the distribution system with distributed generators," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 3, pp. 1678–1685, Jul. 2010.

[9] S. P. Singh and A. R. Rao, "Optimal allocation of capacitors in distribution systems using particle swarm optimization," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 1267–75, 2012.

[10] C. Mozina, "Impact of green power distributed generation," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 16, no. 4, pp. 55–62, Jul./Aug. 2010.

[11] A. Soroudi, M. Ehsan, R. Caire, and N. Hadjsaid, "Possibilistic evaluation of distributed generations impacts on distribution networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2293–2301, Nov. 2011.

[12] R. Singh, B. C. Pal, and R. B. Vinter, "Measurement placement in distribution system state estimation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 668–675, May 2009.

[13] T.-H. Chen and J.-T. Cheng, "Optimal phase arrangement of distribution transformers connected to a primary feeder for system unbalance improvement and loss reduction using a genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 3, pp. 994–1000, Aug. 2000.

[14] R. C. Pires, "Unbalanced phase-to-phase voltage compensators applied to radial distribution feeders," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, no. 2, pp. 806–812, Apr. 2004.

[15] M. G. Echeverri1, R. A. G. Rendón, and J. M. L. Lezama, "Optimal phase balancing planning for loss reduction in distribution systems using a specialized genetic algorithm," *Ing. Ciencia*, vol. 8, no. 15, pp. 121–140, 2012.

[16] C.-S. Chen, C.-T. Tsai, C.-H. Lin, W.-L. Hsieh, and T.-T. Ku, "Loading balance of distribution feeders with loop power controllers considering photovoltaic generation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1762–1768, Aug. 2011.