

REGULAÇÃO ÓTIMA DE TENSÃO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO COM DESBALANCEAMENTO DE CARGAS NA PRESENÇA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

TIAGO S. VÍTOR

Departamento de Automação, Instituto Federal de São Paulo - IFSP
Acesso Dr. João Batista Merlin, s/nº - Jardim Itália, 13872-551, São João da Boa Vista - SP
E-mail: tiagosvitor@ifsp.edu.br

JOSÉ CARLOS M. VIEIRA JR

Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade de São Paulo - USP
Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Centro, 13566-590, São Carlos - SP
E-mail: jcarlos@sc.usp.br

Abstract— This paper proposes optimal voltage control strategies for distribution systems that have multiple voltage regulator devices. The system must operate reaching desirable voltage profiles for scenarios that consider extreme loading (heavy and light), load unbalanced and distributed generation connection. The problem is modeled as an optimization problem that ensures the attendance of the constraints related to voltage limits, power balance and power rating of the equipment. The decision variables are the taps of the voltage control devices, which play an important role on Volt/Var control. A genetic algorithm implemented through a computer interface between Matlab and OpenDSS packages determines the number of control operations. It is assumed that the distribution system has a centralized control with all necessary communication infrastructure. To confirm the validity of the proposed method, simulations were performed using the IEEE 34 node test feeder. The results showed that the strategies contributed to reduce the voltage deviation along the feeder, the voltage unbalance and the total feeder losses.

Keywords— Distributed generation, Volt/Var control, coordinated control, centralized control, genetic algorithms.

Resumo— Este artigo propõe estratégias de regulação ótima de tensão em sistemas de distribuição que possuam múltiplos dispositivos reguladores de tensão e geradores distribuídos. O sistema deve operar alcançando perfis de tensão desejáveis para cenários que consideram extremos de carregamento (pesado e leve), desbalanceamento de carga e conexão de geração distribuída. O problema é modelado como um problema de otimização que permita assegurar importantes restrições do sistema relacionadas aos limites de tensão, balanço de potência e capacidade operativa de equipamentos. As variáveis de decisão são os *taps* dos dispositivos de controle de tensão, que desempenham papel importante no controle Volt/Var. A quantidade de operação de controle é determinada por um algoritmo genético implementado por meio de uma interface entre os pacotes computacionais Matlab e OpenDSS. É admitido que o sistema de distribuição possua um controle centralizado com toda infraestrutura de comunicação necessária. Para confirmar a validade do método proposto, simulações foram feitas usando o sistema IEEE 34 barras. Como resultado, foram alcançadas contribuições para a redução dos desvios de tensão ao longo do alimentador, redução do desequilíbrio de tensão entre fases devido ao desbalanceamento de cargas e redução nas perdas totais do circuito.

Palavras-chave— Geração distribuída, controle Volt/Var, controle coordenado, controle centralizado, algoritmos genéticos.

1 Introdução

Com o crescimento da geração distribuída nos sistemas de distribuição, mudanças nas tensões nodais podem se tornar um problema impactando na qualidade da energia elétrica. Neste sentido, os dispositivos reguladores de tensão são fundamentais para o controle Volt/Var (Ranamuka et al., 2014). Os equipamentos convencionais são: comutadores de *tap* sob carga em transformadores, autotransformadores reguladores de tensão e capacitores chaveados (Bignucolo et al., 2008). Muitos pesquisadores têm concentrado esforços para investigar como a presença de geradores distribuídos afeta o controle de tensão realizado por estes dispositivos (Jenkins et al., 2000).

A tarefa de manter a tensão do sistema dentro de limites permitidos é significativa para uma adequada operação dos equipamentos conectados na rede pelos consumidores (Le et al., 2006). Tais limites são de-

terminados por agências reguladoras do sistema elétrico. O controle de tensão é um dos tópicos mais amplamente estudados, sendo um dos sistemas mais amadurecidos em redes de distribuição (Isle et al., 2014). É comum nos projetos de controle de tensão, que se analise primeiramente a interação entre os dispositivos reguladores de tensão para o ajuste da coordenação entre os mesmos. Esta coordenação permite selecionar uma combinação desses dispositivos de forma ordenada a fim de atingir um fim determinado, como: redução de perdas, manutenção dos níveis de tensão dentro de limites permitidos, minimização de custos de operação, etc. Com a conexão de geração distribuída nas redes de distribuição, é necessário investigar os seus impactos nos esquemas de regulação de tensão. Logo, torna-se desejável projetar um esquema de operação para os dispositivos reguladores de tensão de tal forma que esta integração se torne factível (Padilha, 2008).

Modelar essa coordenação entre os dispositivos reguladores de tensão e a geração distribuída como

um problema de otimização é uma maneira de se obter as melhores configurações de operação desses dispositivos para atender determinados objetivos. O problema é geralmente modelado como um problema de programação não-linear inteira mista (Paaso et al., 2014), por apresentar funções objetivo não-lineares, parte das variáveis inteira e outra parte contínua. Também existem modelos que usam programação inteira (Borghetti et al., 2015) e, além de métodos de otimização clássicos, é possível usar técnicas de algoritmos evolutivos para determinar a operação do controle (Senjyu et al., 2008). É importante notar que um controle centralizado requer uma infraestrutura de comunicação difundida no sistema para que seja possível a implementação de operações otimizadas.

O principal objetivo deste artigo é formular um problema de otimização que minimize desvios de tensão ao longo do sistema de distribuição atendendo aos limites de tensão mesmo diante da variação nas condições de carga. Além disso, o problema de otimização deve considerar situações de desbalanceamento de cargas e presença de geração distribuída. As variáveis de decisão a serem otimizadas são as posições de *tap* dos dispositivos reguladores de tensão. As restrições compreendem limites de tensão, faixa de posição de *taps* e equações de fluxo de potência. Portanto, para problemas com soluções factíveis, espera-se encontrar perfis de tensão otimizados que mesmo sob condições adversas de cargas e presença de GD permaneçam dentro de limites permitidos. Algoritmos genéticos são usados para determinar a operação deste controle.

Este artigo é subdividido nas seguintes seções: (2) Sistema base para simulações, (3) formulação do problema de otimização, (4) algoritmo para regulação de tensão ótima, (5) resultados e (6) conclusões.

2 Sistema Base

O sistema de distribuição base para as simulações deste artigo é conhecido como IEEE 34 barras (Kersting, 2001). A Figura 1 ilustra o diagrama unifilar.

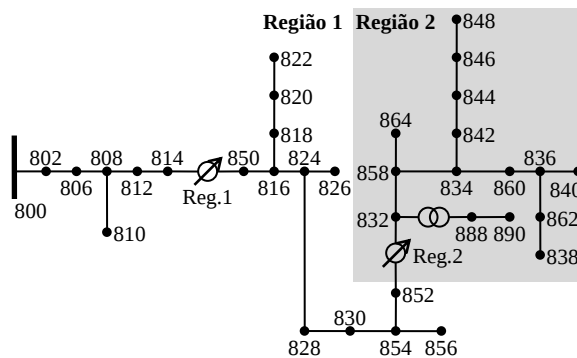


Figura 1. Diagrama unifilar do sistema IEEE 34 barras

Seu alimentador de 24,9 kV é longo e levemente carregado, possui 2 (dois) reguladores de tensão, 1 (um) transformador de linha abaixador de 24,9 : 4,16

kV, cargas desequilibradas, 2 (dois) capacitores shunt e carga total de 1769 kW + 1044 kVar.

Devido às características de desbalanceamento de cargas e do longo comprimento do alimentador, os capacitores *shunt* nas barras 844 e 848 são considerados por fase para possibilitar um maior controle Volt/Var.

3 Formulação do Problema

3.1 O problema de otimização

A operação dos dispositivos reguladores de tensão é determinada pela formulação a seguir:

$$\min \quad \omega_1 \sum_{k \in \Omega_B} (V_{ref} - V_k)^2 + \omega_2 \sum_{n \in \Omega_T} LVUR_n \quad (1)$$

s.a.

$$\Delta P = P_k^{esp} - P_k = 0 \quad (2)$$

$$\Delta Q = Q_k^{esp} - Q_k = 0 \quad (3)$$

$$V_k^{\min} < V_k < V_k^{\max} \quad (4)$$

$$t_i^{\min} < t_i < t_i^{\max}, (i = t, r, c) \quad (5)$$

em que,

Ω_B é o conjunto de todas as barras do sistema;

Ω_T é o conjunto das barras trifásicas;

V_{ref} é o valor de tensão de referência;

V_k é o valor de tensão na barra k ;

ΔP e ΔQ são os *mismatches* de potência;

P_k^{esp} e P_k são as potências ativas especificada e calculada pelas equações de balanço de potência;

Q_k^{esp} e Q_k são as potências reativas especificada e calculada pelas equações de balanço de potência;

$V_k^{\min}$ e $V_k^{\max}$ são os limites de tensão das barras;

t_i é a posição de *tap* dos dispositivos para controle de tensão ($i = t$ para transformador, $i = r$ para auto-transformadores reguladores de tensão e $i = c$ para capacitores);

$t_i^{\min}$ e $t_i^{\max}$ são os valores limites de *tap*;

ω_1 e ω_2 são ponderações;

$LVUR_n$ é o fator de desequilíbrio de tensão (*line voltage unbalance rate*) na barra n .

De acordo com a definição NEMA (Pillay and Manyage, 2001) do fator de desequilíbrio de tensão, tem-se:

$$LVUR_n = \Delta U / U_{avg} \quad (6)$$

na qual,

U_{avg} é a média das tensões de linha das 3 fases da barra n ;

ΔU é o máximo desvio de tensão em relação à U_{avg} .

O problema de otimização modelado em (1) visa minimizar desvios das tensões nodais e desequilíbrio de tensão. Cada objetivo é ponderado a fim de se obter uma regulação de tensão desejável. As restrições de balanço de potência em (2) e (3) asseguram a operação em regime permanente. Limites de tensão em (4) devem ser atendidos, assim como os limites de *taps* em (5) dos múltiplos dispositivos de regulação de tensão, responsáveis pelo controle de tensão.

3.2 Limites de tensão

A conformidade das tensões nodais está relacionada com a comparação do valor de tensão de leitura (TL) no ponto de conexão em relação ao nível de tensão de referência (TR). As faixas de tensão de atendimento em regime permanente podem ser classificadas em: adequada, precária e crítica (ANEEL, 2016). A Tabela 1 contém os limites para pontos de conexão em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.

Tabela 1. Faixas de classificação de tensões.

Classificação	Faixas de Tensão
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

3.3 Limites de Tap

As variáveis de decisão a serem otimizadas são as posições de *tap* dos dispositivos reguladores de tensão. Os valores considerados neste trabalho são:

- Comutador de *tap* sob carga no transformador da subestação - variação de 0,95 a 1,05 p.u. em passos de 0,25 p.u.: $t_t \in \{0,950; 0,975; 1,000; 1,025; 1,050\}$;
- Autotransformadores reguladores de tensão - variação de 0,90 a 1,10 p.u. em passos de 0,00625 p.u.: $t_r \in \{0,90000; 0,90625; \dots; 1,00000; \dots; 1,09375; 1,10000\}$;
- Chaveamento de capacitores *shunt* por fase na barra 844 - variação de 0 a 100 kVar em passos de 25 kVar: $t_c \in \{0; 1; 2; 3; 4\}$;
- Chaveamento de capacitores *shunt* por fase na barra 848 - variação de 0 a 150 kVar em passos de 25 kVar: $t_c \in \{0; 1; 2; 3; 4; 5; 6\}$.

A potência reativa de cada banco de capacitores é dada por:

$$Qsh_n = t_c \cdot Qsh_n^{\text{mod}} \quad (7)$$

em que Qsh_n e Qsh_n^{mod} são, respectivamente, as potências reativas total injetada na barra n e elementar de cada módulo na barra n .

3.4 Geração Distribuída

O sistema deve acomodar uma central de geração distribuída (trifásica) com capacidade de 1 MVA, instalada na barra 830. Sua operação fornece 1 MW continuamente com fator de potência unitário.

3.5 Cenários

Diferentes cenários são considerados. Deseja-se obter regulação de tensão ótima, na presença ou não de GD, que permita a operação do sistema em condições extremas de carga pesada e leve, correspondentes a 90% e 30%, respectivamente, da carga total do sistema. Portanto, tem-se:

- Carga pesada: 1592 kW + 940 kVar;
- Carga leve: 531 kW + 313 kVar.

Os perfis ótimos de tensão são aqueles em que as tensões ao longo do alimentador se mantêm próximas da referência de 1 pu. Considera-se a existência de cargas sensíveis ao desequilíbrio de tensão.

4 Regulação de Tensão Ótima

A solução do problema de otimização proposto consiste na implementação de um algoritmo genético (AG) no Matlab com interface para o OpenDSS, cuja finalidade é realizar os cálculos de fluxo de potência.

As principais características implementadas são:

- Seleção método do torneio (p jogadores):

Consiste na seleção aleatória de indivíduos para uma competição. Aquele que vencer (melhor *fitness*) é selecionado para aplicação do operador genético.

- Crossover aritmético:

Dada uma determinada probabilidade, o operador faz uma combinação linear (fator β) das informações genéticas dos pais selecionados (Pai_1 e Pai_2) gerando filhos ($Filho_1$ e $Filho_2$) que herdam tais informações de seus progenitores.

$$Filho_1 = \beta \cdot Pai_1 + (1 - \beta) \cdot Pai_2 \quad (8)$$

$$Filho_2 = (1 - \beta) \cdot Pai_1 + \beta \cdot Pai_2 \quad (9)$$

- Mutação:

Dada uma determinada probabilidade, o operador substitui genes dos filhos por valores aleatórios.

- Elitismo:

Os k melhores indivíduos, i.e., que possuem os melhores valores *fitness*, são preservados para a próxima geração, garantindo que o desempenho do AG sempre cresça com a evolução.

Os valores dos parâmetros do AG estão na Tabela 2. Eles foram encontrados de forma empírica associada às práticas comuns na literatura de probabilidade de alta para crossover e baixa para mutação.

Tabela 2. Valores dos parâmetros do AG.

Parâmetros	Valores
Gerações	600
População	40
Seleção	$p = 2$
Elitismo	$k = 2$
Probabilidade de Crossover	80,0%
Probabilidade de Mutação	0,5%

A ponderação da função objetivo visa equilibrar quantitativamente os termos relacionados ao desvio de tensão e desequilíbrio. Os valores usados são: $\omega_1 = 1$ e $\omega_2 = 1,3$.

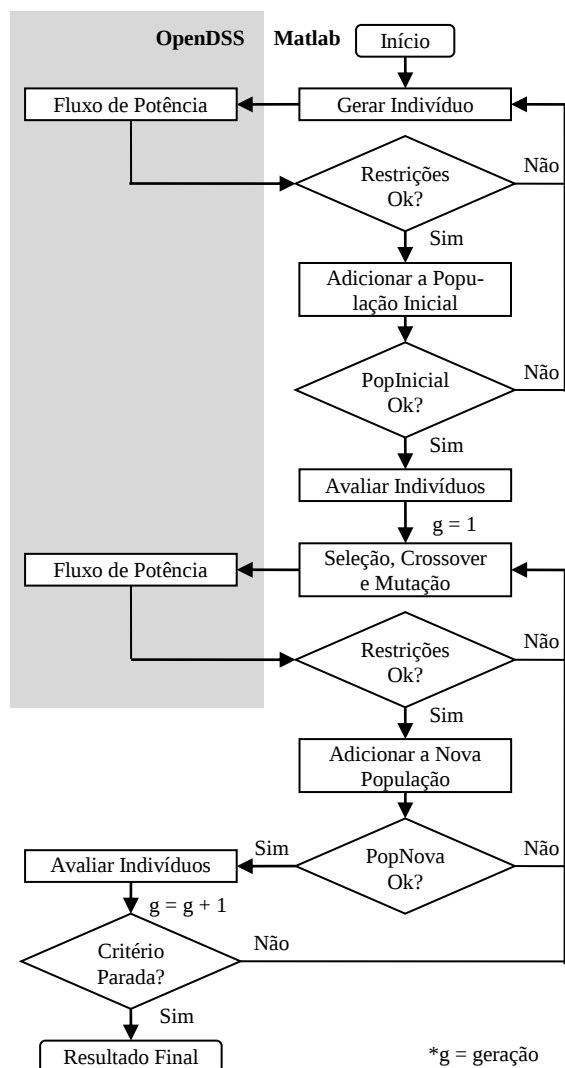


Figura 2. Diagrama de blocos do algoritmo

A Figura 2 ilustra o algoritmo. Na parametrização do problema, o indivíduo carrega informações relacionadas aos *taps* dos dispositivos reguladores de

tensão. Inicialmente, cada um deles é gerado aleatoriamente e o fluxo de potência é executado. Caso as restrições (limites de tensão, capacidade operativa dos dispositivos e balanço de potência) sejam satisfeitas, o indivíduo é adicionado à população inicial. Ao atingir o tamanho da população definido, os indivíduos são avaliados pela função objetivo, submetidos às operações genéticas e ao fluxo de potência. Caso as restrições sejam satisfeitas, os novos indivíduos gerados são adicionados à nova população até que esta fique completa. A nova população é avaliada. Se o número de gerações é alcançado, termina-se o algoritmo, do contrário, retorna-se às operações genéticas.

5 Resultados

Para uma melhor visualização dos resultados, o sistema de distribuição foi dividido em 2 (duas) regiões de acordo com a distância de cada barra em relação à Subestação, conforme mostra a Figura 1.

As Figuras 3 a 6 mostram os resultados para o sistema carregado em 90%, com e sem GD, para as regiões 1 e 2. As Figuras 7 a 10 mostram os resultados para o sistema carregado em 30%.

As Tabelas 3 e 4 resumem os resultados para cada cenário de simulação.

Tabela 3. Valores resultantes da regulação ótima de tensão.

Resultados	Carga: 90%		Carga: 30%	
	Sem GD	Com GD	Sem GD	Com GD
<i>Fitness</i>	0,1962	0,1552	0,0437	0,0325
Tensão Média [pu]	1,0213	1,0182	1,0061	0,9997
Desvio Padrão [pu]	0,0276	0,0235	0,0100	0,0081
Σ LVUR [%]	7,15	6,17	2,46	2,08
Perdas/Carga [%]	16,85	8,81	4,14	4,00

Tabela 4. Valores de *tap* da subestação, *taps* por fase dos reguladores e kVar por fase dos capacitores.

Dispositivos	Carga: 90%		Carga: 30%	
	Sem GD	Com GD	Sem GD	Com GD
Subestação [<i>tap</i>]	1,050	1,025	1,025	1,000
Reg.1.A [<i>tap</i>]	1,09375	1,06250	1,00625	0,98125
Reg.1.B [<i>tap</i>]	1,05000	1,03125	1,00000	0,98125
Reg.1.C [<i>tap</i>]	1,05000	1,03125	1,00000	0,97500
Reg.2.A [<i>tap</i>]	1,08125	1,06875	1,01875	1,00625
Reg.2.B [<i>tap</i>]	1,08125	1,06875	1,01875	1,00625
Reg.2.C [<i>tap</i>]	1,08125	1,06875	1,01875	1,00625
Cap.844.A [kVar]	100	50	100	100
Cap.844.B [kVar]	0	50	0	25
Cap.844.C [kVar]	100	0	0	100
Cap.848.A [kVar]	25	100	75	125
Cap.848.B [kVar]	75	50	100	150
Cap.848.C [kVar]	25	75	125	100

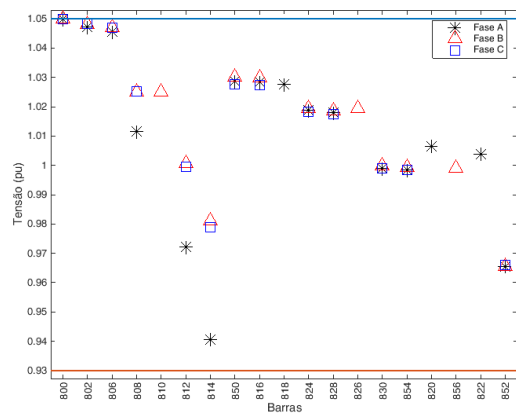


Figura 3. Perfil de tensão: carga pesada, sem GD, região 1

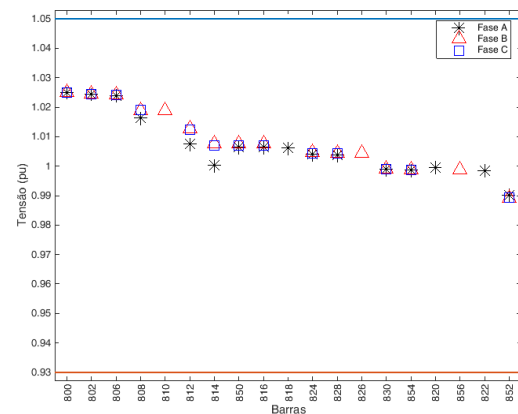


Figura 7. Perfil de tensão: carga leve, sem GD, região 1

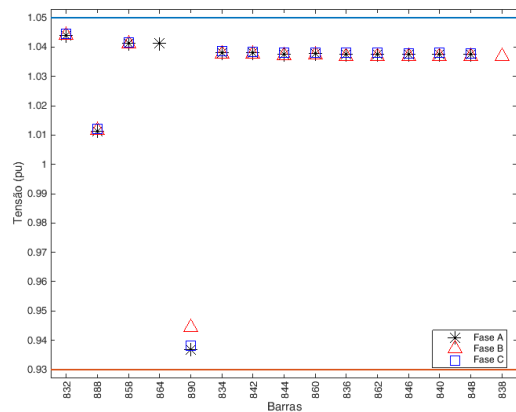


Figura 4. Perfil de tensão: carga pesada, sem GD, região 2

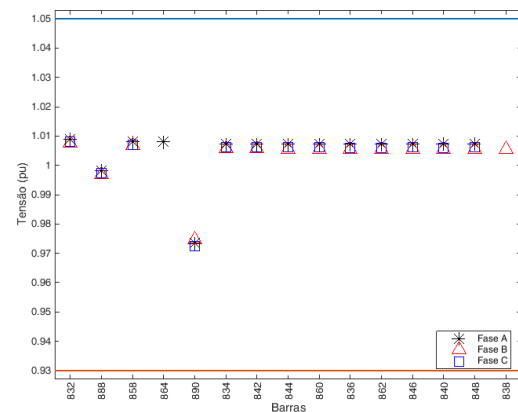


Figura 8. Perfil de tensão: carga leve, sem GD, região 2

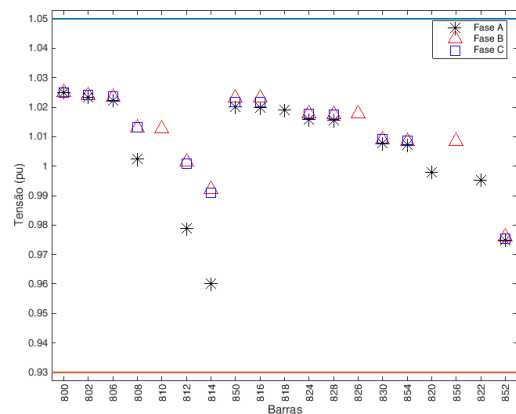


Figura 5. Perfil de tensão: carga pesada, com GD, região 1

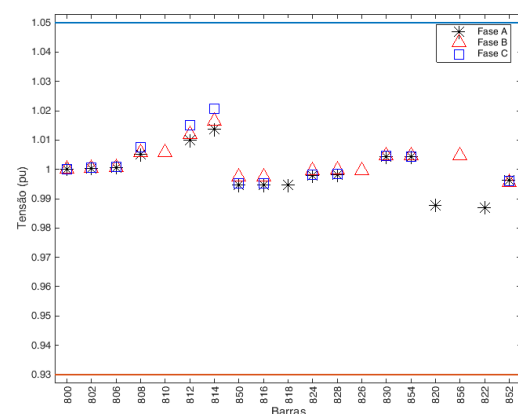


Figura 9. Perfil de tensão: carga leve, com GD, região 1

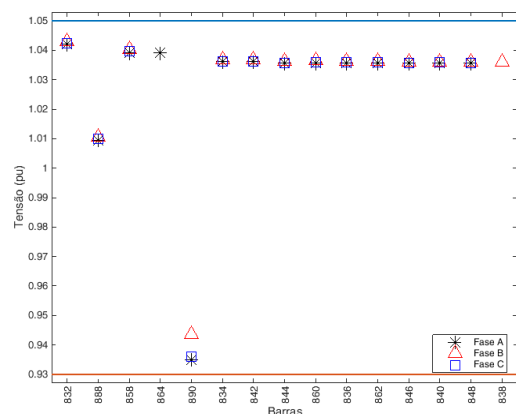


Figura 6. Perfil de tensão: carga pesada, com GD, região 2

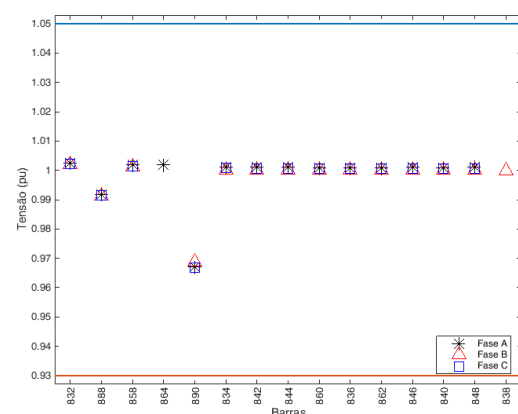


Figura 10. Perfil de tensão: carga leve, com GD, região 2

Observando as Figuras 3 a 10, todas as tensões nas barras estão dentro dos limites considerados adequados pelo PRODIST. Portanto, esta importante restrição do problema é alcançada pelo método proposto. As soluções tendem a acomodar o perfil de tensão do alimentador em torno do valor de referência de 1 p.u., que é confirmado pelo valor de tensão média na Tabela 3 com valores pequenos de desvio padrão. Restrições de balanço de potência são garantidas pela simulação do sistema no OpenDSS.

Resultados interessantes e desejáveis podem ser observados com a inserção de GD. Para ambos os carregamentos, pesado e leve, desequilíbrio de tensão e total de perdas são atenuados. Isso reflete na diminuição do *fitness* da equação objetivo (Tabela 3).

Observa-se que os 3 (três) valores de potência reativa dos capacitores em cada fase, por barra, não coincidem. Portanto, o chaveamento independente de capacitores por fase tem um papel importante para o balanço de tensão ao longo da região 2 (Tabela 4). Como esperado, os *taps* dos autotransformadores reguladores de tensão diminuem com a inclusão de GD e com a diminuição de carregamento.

O comutador sob carga da subestação desempenha uma importante função para a regulação de tensão, sendo a parte central para o ajuste geral do perfil de tensão, cabendo aos demais dispositivos o ajuste específico em determinadas regiões de influência.

6 Conclusão

Neste artigo foi apresentado um método de controle coordenado ótimo para a obtenção de perfis desejáveis de tensão de um sistema de distribuição. O problema foi modelado, para uma análise estática, como um problema de otimização permitindo lidar com diferentes cenários de operação, tais como: extremos de carregamento, desbalanceamento de carga e conexão de GD. A solução do problema assegura importantes restrições relacionadas aos limites de tensão, balanço de potência e capacidade operativa de equipamentos. As variáveis de decisão são os *taps* dos dispositivos de controle de tensão que desempenham o controle Volt/Var. A quantidade de operação de controle é determinada por um algoritmo genético implementado no Matlab com interface para o OpenDSS. O algoritmo garante soluções subótimas.

Condições de operação otimizadas para o funcionamento da geração distribuída foram obtidas. A estratégia de regulação ótima de tensão permitiu contribuições para a redução dos desvios de tensão ao longo do alimentador, redução do desequilíbrio de tensão entre fases devido a desbalanceamento de cargas e redução nas perdas totais do circuito.

Pretende-se investigar a aplicação do método para a operação diária do sistema de distribuição considerando diferentes curvas de demanda. Nestas condições, a minimização do número de chaveamento de *taps* deve ser integrada à formulação do problema.

Referências Bibliográficas

- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, (2016). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST), Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.
- Bignucolo, F., Caldon, R. and Prandoni, V. (2008). Radial MV networks voltage regulation with distribution management system coordinated controller. *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, No. 4; pp. 634- 645.
- Borghetti, A., Napolitano, F. and Nucci, C. A. (2015). Volt/var optimization of unbalanced distribution feeders via mixed integer linear programming. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 72; pp. 40– 47.
- Isle, D., Vaziri, M., Zarghami, M. and Vadhva, S. (2014). Review of concepts to increase distributed generation into the distribution network. In: *Sixth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*. Corpus Christ, TX: IEEE, pp. 118- 125.
- Jenkins, N., Allan, R., Crossley, P., Kischen, D. and Strbac, G. (2000). *Embedded generation*. London: The Institute of Electrical Engineers, p. 292.
- Kersting, W. H. (2001). Radial distribution test feeders. In: *PES Winter Meeting*. Columbus, OH: IEEE, Vol. 2, pp. 908- 912.
- Le, A., Kashem, M., Negnevitsky, M. and Ledwich, G. (2006). Distributed generation control using protection principles. In: *Australasian Universities Power Engineering Conference*. Australia: QUT, pp.1- 6.
- Padilha, L. N. (2010). *Análise comparativa de estratégias para regulação de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica na presença de geradores distribuídos*. Dissertação de Mestrado. USP São Carlos.
- Paaso, E. A., Liao, Y. and Cramer, A. M. (2014). Formulation and solution of distribution system voltage and VAR control with distributed generation as a mixed integer non-linear programming problem. *Electric Power Systems Research*, Vol. 108; pp. 164– 169.
- Pillay, P. and Manyage, M. (2001). Definitions of voltage unbalance. *IEEE Power Engineering Review*, Vol. 21, pp. 50- 51.
- Ranamuka, D., Agalgaonkar, A. P. and Muttaqi, K. M. (2014). Online voltage control in distribution systems with multiple voltage regulating devices. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 5, No. 2; pp. 617- 628.
- Senjyu, T., Miyazato, Y., Yona, A., Urasaki, N. and Funabashi, T. (2008). Optimal distribution voltage control and coordination with distributed generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 23, No. 2; pp. 1236- 1242.