

Alocação Ótima de Reguladores de Tensão em Sistemas de Distribuição Baseada na Busca Tabu

José Ubirajara Núñez de Nunes
Departamento de Engenharia Elétrica
Instituto Federal Sul-rio-grandense (IFSul)
Pelotas-RS, Brasil
jnunes@pelotas.ifsul.edu.br

Arturo Suman Bretas
Departamento de Engenharia Elétrica e Computação
Universidade da Flórida (UF)
Gainesville, USA
arturo@ece.ufl.edu

Resumo— Este trabalho apresenta uma metodologia de otimização baseada na busca tabu para a solução do problema de alocação de reguladores de tensão em sistemas de distribuição de energia. O principal objetivo consiste em encontrar o equilíbrio entre a redução dos custos relacionados ao planejamento do sistema e o atendimento aos níveis de tensão dentro dos limites preestabelecidos pela ANEEL. Análises do perfil de tensão e função objetivo são realizadas em ambiente MATLAB para um alimentador de distribuição típico. Os resultados indicam a alta robustez do método e potencial para aplicações em sistemas de distribuição reais.

Palavras-chave— Alocação de Reguladores de Tensão, Busca Tabu, Sistemas de Distribuição de Energia.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a reestruturação do setor elétrico deu origem a um mercado competitivo, aumentando as exigências com relação a qualidade, continuidade e segurança no fornecimento de energia elétrica. Dentro deste contexto, os Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) têm uma grande responsabilidade na qualidade do serviço prestado ao consumidor.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [1], através de sua resolução 395/2009, regula e fiscaliza os níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente. Caso a concessionária não atenda os níveis de tensão exigidos pela ANEEL, esta será penalizada pelo órgão regulador em forma de multa.

A correção da magnitude das tensões num SDEE dentro de uma faixa pré-determinada pode ser assegurada através da instalação de Reguladores de Tensão (RT). O RT é basicamente formado de dois enrolamentos eletricamente conectados com alguns *taps* e um circuito de controle responsável pela comutação destes *taps* sempre que necessário. Os benefícios obtidos pelo emprego destes dispositivos dependem de sua localização, capacidade e ajuste.

Para a solução do problema de Alocação de Reguladores de Tensão (ART) em SDEE foram propostas diversas metodologias, em sua grande maioria, baseadas em abordagens heurísticas. Dentre elas, destaca-se pelo pioneirismo os métodos propostos na década de oitenta em [2]-[5], os quais tratam separadamente o problema de alocação de reguladores e de capacitores.

Outras abordagens relacionadas à ART recentemente propostas tratam a solução do problema através de algoritmos evolutivos [6] e de algoritmos genéticos [7].

Dentre as abordagens heurísticas usadas para a solução de problemas de otimização, destaca-se a metaheurística Busca Tabu ou *Tabu Search* (TS). Esta técnica apresenta grande soluções de melhor qualidade em problemas de alta complexidade [8].

O presente trabalho propõe o desenvolvimento e a implementação do método TS para a solução do problema de ART em SDEE, motivado especialmente por dois fatores: a complexidade do problema de ART em SDEE; e a eficiência do método TS na solução de problemas de ordem complexa.

O principal objetivo deste trabalho consiste em encontrar um ponto de equilíbrio entre os custos relacionados ao planejamento do sistema e o atendimento aos níveis de tensão dentro de limites preestabelecidos pela ANEEL. Análises de perfis de tensão e de parâmetros da função objetivo são executadas em ambiente MATLAB [9] através de uma rotina de fluxo de potência baseada na técnica *ladder* para um alimentador de distribuição típico [10].

Este artigo está estruturado conforme segue: a Seção II apresenta o problema de ART proposto; na Seção III é descrita a metaheurística TS para a solução do problema; a Seção IV apresenta um estudo de caso e os resultados obtidos; e por fim, na Seção V é descrita as conclusões deste trabalho.

II. ALOCAÇÃO DE REGULADORES DE TENSÃO

A ART em redes de distribuição é um problema de natureza combinatória, no qual deseja-se determinar os locais e a quantidade de dispositivos a fim de obter um melhor desempenho do sistema elétrico. Para a solução deste problema foi implementado um algoritmo que divide-se em duas etapas, como mostra a Fig. 1.

A primeira etapa, proposta inicialmente por [2]-[4], define uma solução inicial para o problema, ou seja, o número de reguladores necessários para corrigir o perfil de tensão do sistema e as suas barras de alocação. Entretanto, esta forma de solução nem sempre fornece é a alternativa mais econômica para o problema.

A segunda etapa do algoritmo, entretanto, consiste em avaliar soluções factíveis que sejam economicamente mais viáveis e retornar na saída a solução ótima para o problema, ou próxima desta. Em outras palavras, esta etapa do algoritmo

avalia diversas soluções obtidas pelo método de otimização para ART a partir da solução inicial e escolhe dentre elas, a que apresenta menor custo anual.

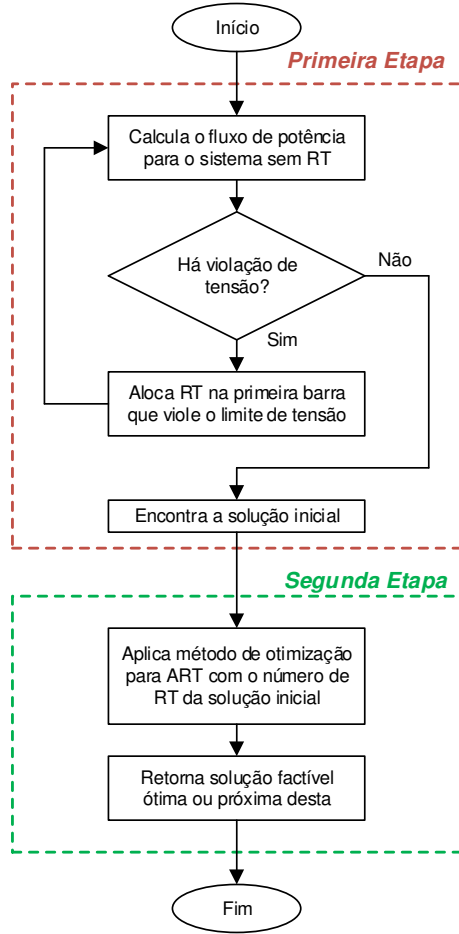


Fig. 1. Fluxograma do algoritmo heurístico usado para a solução do problema de ART em SDEE.

A. Codificação do Problema e Função Objetivo

A localização dos reguladores é representada por uma variável binária, sendo atribuído o valor 1 para a barra que contenha o RT e o valor 0 para em caso contrário.

As soluções vizinhas geradas são representadas por um vetor binário. Cada posição do vetor representa uma barra e os valores atribuídos a estas barras representam a presença ou não de regulador. A Fig. 2 ilustra a composição de uma solução possível.

	barra 1	barra 2		barra j
$S_i =$	a_{i1}	a_{i2}		a_{ij}

Sendo $a_{ij} = 0$ ou $a_{ij} = 1$.

Fig. 2. Composição das soluções possíveis.

A função objetivo depende de análises de fluxo de potência para cada solução possível, de onde se avaliam as perdas ativas do sistema elétrico em análise. O método de fluxo de potência usado neste trabalho é baseado na técnica *ladder* que envolve duas varreduras para a estimação das tensões e correntes nas barras do sistema: a varredura direta, ou *forward sweep* e a varredura reversa, ou *backward sweep*. A convergência do método ocorre quando a tensão na barra subestação obtida com a varredura reversa aproxima-se dentro de uma dada tolerância do valor da tensão nominal do sistema.

B. Formulação do Problema

A fim de avaliar as soluções mais viáveis economicamente, o presente trabalho considera a minimização dos custos relacionados ao planejamento do SDEE, conforme expresso através da função objetivo dada por (1):

$$FO = \min \{Custos\} \quad (1)$$

Os custos (em R\$) são calculados de acordo com (2):

$$Custos = C_E E_{perdas} + N_{reg} C_{reg} + C_{DV} DV \quad (2)$$

onde:

C_E custo da energia, em R\$/kWh;

E_{perdas} energia de perdas, em kWh;

N_{reg} número de reguladores;

C_{reg} custo do investimento e manutenção anual de cada regulador, em R\$;

C_{DV} penalidade por violação de limites de tensão, em R\$;

DV somatório dos desvios de tensão.

A potência de perdas ativa (P_{perdas}) é obtida pelo somatório das perdas ativas em cada ramo do sistema, conforme a equação (3)

$$P_{perdas} = \sum_{i=1}^{NS} R_i |I_i|^2 \quad (3)$$

onde R_i é a resistência da seção de linha i ; I_i é a corrente na seção i ; e NS é o número total de seções de linha.

A energia de perdas em SDEE pode ser determinada a partir da integração das perdas de potência ativa ao longo do horizonte de planejamento considerado:

$$E_{perdas} = \int_0^T P_{perdas} dt \quad (4)$$

O somatório dos desvios de tensão é determinado por (5)

$$DV = \sum_{k=1}^{NB} dv_k \quad (5)$$

onde dv_k representa o desvio de tensão na barra k e NB representa o número de barras do sistema.

O desvio de tensão em cada barra é calculado por (6):

$$dv_k = \begin{cases} 0, & \text{se } V_{\min} < V_k < V_{\max} \\ V_{\min} - V_k, & \text{se } V_k < V_{\min} \\ V_k - V_{\max}, & \text{se } V_k > V_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

III. BUSCA TABU APLICADA AO PROBLEMA DE ART

A Busca Tabu ou *Tabu Search* (TS) é uma metaheurística desenvolvida por F. Glover [8] cuja ideia principal é a de evitar que a busca retorne a soluções previamente visitadas (ciclagem) através de uma lista de tabus de curto prazo.

O método TS funciona de uma forma que serão armazenados em uma lista os movimentos reversos das melhores soluções encontradas em cada iteração. Os movimentos armazenados nesta lista ficam proibidos nas próximas iterações, com o intuito de evitar mínimos locais e, por fim, encontrar a solução desejada.

A. Algoritmo TS

O algoritmo TS usado para ART em SDEE é descrito conforme as etapas a seguir.

1. Inicializa o contador de iterações $k = 0$, a lista de tabus, $T = \emptyset$, e define como solução inicial s_0 aquela obtida na primeira etapa do algoritmo heurístico de ART (Fig. 1). Nesta etapa, faça:

$$s \leftarrow s_0 ; s^* \leftarrow s$$

$$f(s^*) \leftarrow f(s) ; A(f(s)) \leftarrow f(s^*)$$

2. Realiza uma busca em um subconjunto $V(s_k)$ da vizinhança $N(s_k)$ da solução s_k .
3. Atualiza lista de tabus T com o movimento reverso da melhor solução vizinha;
4. Considera $s \leftarrow s'$.
5. Calcula $f(s)$ e verifica $f(s) < f(s^*)$. Se verdadeiro, então faça:

$$s^* \leftarrow s$$

$$f(s^*) \leftarrow f(s)$$

Caso contrário, a solução incumbente s^* se mantém inalterada.

6. Incrementa o contador de iterações: $k \leftarrow k + 1$;
7. Atualiza função de aspiração:

$$A(f(s)) \leftarrow f(s^*)$$

8. Testa o critério de parada. Se satisfeito, o algoritmo é finalizado retornando a melhor solução incumbente testada, ou seja, as barras de alocação de reguladores correspondente ao menor valor da potência de perdas encontrado. Caso contrário, o algoritmo retorna ao passo 2.

B. Procedimento de Busca Local

No processo de busca local é feita uma escolha do melhor vizinho imediato à solução experimental atual, que não seja descartado pela sua condição de tabu. O processo de busca

local correspondente ao passo 2 do algoritmo TS é descrito a seguir.

1. Recebe a solução atual (S), número de reguladores (NR) e barras candidatas à ARTs;
2. Considera-se o número máximo de reguladores ($NR_{\max}$) permitido igual ao número de reguladores obtido na solução inicial ($NR_{\max} = NR$);
3. Inicializa o processo de busca com número de reguladores igual a 1 ($NR = 1$);
4. Gera um conjunto de soluções vizinhas a partir da solução atual, do número de reguladores atual e do conjunto de barras candidatas;
5. Executa o fluxo de potência para cada uma das soluções vizinhas, obtendo o estado da rede (tensões nas barras), a potência de perdas para cada uma destas soluções e calcula a função objetivo para cada solução (*Custos*);
6. Armazena conjunto de soluções referente ao número atual de reguladores (NR);
7. Se $NR < NR_{\max}$, executa-se

$$NR \leftarrow NR + 1$$

e retorna-se ao passo 4. Caso contrário, o algoritmo segue.

8. Determina $s' \leftarrow s \oplus m$ como o melhor elemento $V(s_k) \subseteq N(s)$ tal que o movimento m não seja tabu ($m \notin T$) ou s' atenda a condição de aspiração $f(s') < A(f(s))$.

C. Estrutura da Vizinhança

A estrutura da vizinhança depende exclusivamente do número de reguladores, definido na primeira etapa do algoritmo heurístico de ART (Fig. 1) e de um conjunto de barras candidatas, definido na entrada de dados do programa. A escolha destas barras candidatas à ART depende de bom censo. No presente trabalho, foram escolhidas como barras candidatas todas as barras pertencentes ao tronco principal do alimentador, excluindo a barra da subestação.

Supondo que sejam necessários N reguladores para corrigir o perfil de tensão do sistema serão gerados N conjuntos vizinhos. Cada conjunto é gerado através da seguinte combinação: fixando $N-1$ elementos e deslocando apenas um em passos discretos ao longo do vetor, a montante e a jusante de sua posição atual.

A Fig. 3 ilustra um exemplo simplificado de geração de vizinhança a partir de uma dada solução atual. Neste exemplo, o vetor solução S_i é composto pelas variáveis a_{ik} e a_{ip} . O conjunto vizinho Ω_1 é formado por combinações do elemento de a_{ik} fixo com deslocamentos do elemento a_{ip} a montante (entre as posições p e k do vetor) e a jusante (a partir da posição k do vetor em diante). De modo similar, o conjunto vizinho Ω_2 é formado por combinações do elemento a_{ip} fixo

com os deslocamentos do elemento a_{ik} no vetor binário a montante (entre as posições k e 1) e a jusante (entre as posições k e j). A linha pontilhada indica a ordem de deslocamentos em passos discretos de cada elemento ao longo do vetor binário. A vizinhança $V(s)$ é formada pela união dos conjuntos Ω_1 e Ω_2 e gerada para variáveis binárias contendo a informação da presença ou não de reguladores.

O esquema mostrado na Fig. 3 corresponde ao passo 4 do algoritmo de busca local, sendo executado sempre que o número de reguladores atual (NR) for menor ou igual ao número máximo de reguladores ($NR_{\max}$), definido no algoritmo de solução inicial.

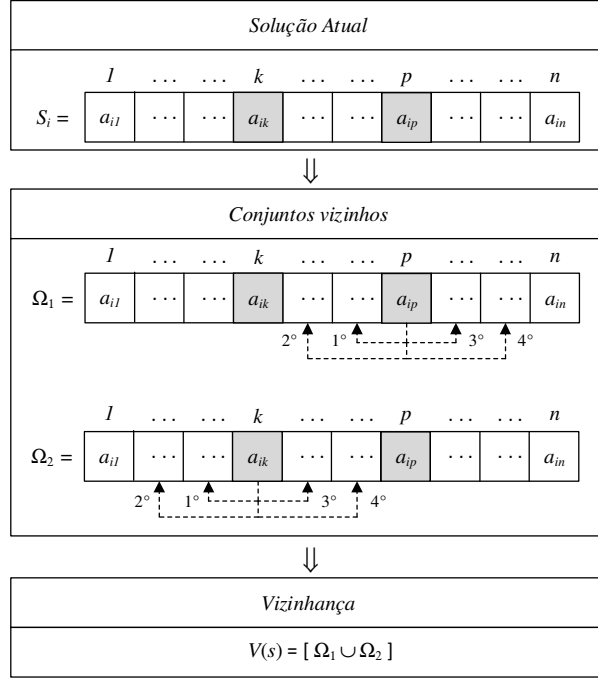


Fig. 3. Exemplo de geração da vizinhança para $NR = 2$.

D. Formato e Duração da Lista de Tabus

A lista de tabus armazena os movimentos reversos obtidos com a mudança da solução atual para uma nova solução. A Tab. I ilustra um exemplo de como funciona a construção da lista de tabus.

TAB. I. EXEMPLO DE LISTA DE TABUS COM 2 POSIÇÕES PARA $NR = 2$

Soluções	BRT-1	BRT-2	Lista T
S_0	5	13	$\emptyset$
S_1	4	16	$\begin{bmatrix} 4-5 ; 16-13 \\ 0-0 ; 0-0 \end{bmatrix}$
S_2	6	23	$\begin{bmatrix} 6-4 ; 23-16 \\ 4-5 ; 16-13 \end{bmatrix}$
S_3	5	25	$\begin{bmatrix} 5-6 ; 25-23 \\ 6-4 ; 23-16 \end{bmatrix}$

A lista de tabus apresenta duas posições, de modo que o tempo de duração desta lista é válido somente por duas iterações do algoritmo TS. Toda vez que uma movimentação de tabus é acrescentada à lista cheia, a movimentação mais antiga da lista é automaticamente eliminada.

E. Regra de Parada

Neste trabalho, o critério de parada estabelecido foi o de três (3) iterações sem uma melhoria na função objetivo. Neste caso, o algoritmo TS retorna a melhor solução experimental encontrada em qualquer das iterações como sendo a solução final para o problema.

IV. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

O desempenho do método TS foi testado para diferentes condições de simulação usando o sistema de distribuição do IEEE de 34 barras [10], ilustrado in Fig. 4. Este sistema cujo comprimento total é de aproximadamente 93,1 km consiste de 33 seções de linha de diferentes comprimentos com impedância de $(0,831 + j0,829) \cdot 10^{-3} \Omega/\text{metro}$, e 33 barras de carga, com carregamento igualmente distribuído entre as barras.

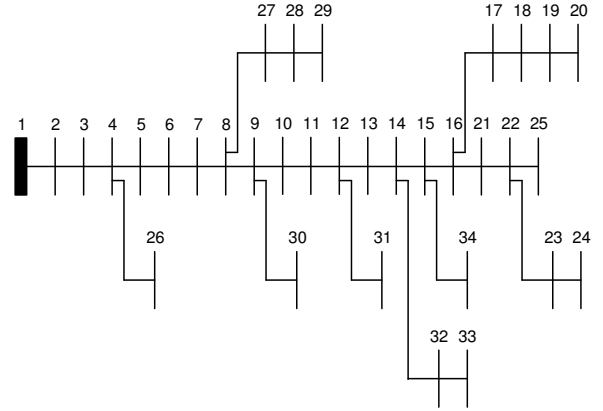


Fig. 4. Sistema de distribuição IEEE de 34 nós.

O sistema apresenta classe de tensão de 23,1 kV e potência nominal de 2,23 MVA com fator de potência de 0,89 indutivo.

O espaço de busca para o problema de ART pode ser obtido por análise combinatória, onde o número de combinações de NB elementos tomados N a N é definido como

$$C_{NB}^N = \frac{NB!}{N!(NB - N)!} \quad (7)$$

sendo NB o número barras da rede e N o número de reguladores.

Para o sistema da Fig. 4, que tem 33 barras (excluindo a da subestação), o número de combinações possíveis é igual a 528 para 2 RTs e 33 para 1 RT, conforme a equação (7).

A Tab. II apresenta os parâmetros financeiros anuais da função objetivo adotados neste trabalho.

TAB. II. PARÂMETROS FINANCEIROS ANUAIS DA FUNÇÃO OBJETIVO

Parâmetro	Custo
C_E	R\$ 0,22638 por kWh
C_{reg}	R\$ 20.000,00
C_{DV}	R\$ 0,24

As condições de simulação neste trabalho são apresentadas a seguir:

- Carga pesada: 100% da carga nominal com tempo total de 18 h de duração;
- Carga leve: 70% da carga nominal com tempo total de 6 h de duração.

A. Influência do Nível de Carregamento do Sistema na Função Objetivo (Custos)

Analisando os resultados da Tab. III, percebe-se que para a condição máxima de carregamento (plena carga) o algoritmo TS parte da solução inicial nas barras 5 e 13, e encontra a solução ótima para o problema na barra 6, com perfis de tensão ilustrados na Fig. 5. O trajeto da solução incumbente para este caso é mostrado na Fig. 6 onde pode ser visualizada uma

redução no custo de R\$ 15.950,00 entre as duas soluções. Observa-se, de acordo com a Fig. 5, que a solução encontrada para o carregamento máximo apresenta uma violação de tensão na barra 5. Como a função objetivo proposta no presente trabalho utiliza uma penalização por violação de tensão, ao invés de restrição, esta pode ser considerada uma solução aceitável visto que o sistema opera com carga máxima, justificando o não investimento na compra de um novo regulador.

De acordo com a Tab. III, na condição de carga leve (70% da carga nominal), o algoritmo TS parte da solução inicial na barra 5, para uma solução final na barra 6, com perfis de tensão mostrados na Fig. 7. Semelhante a situação anterior, percebe-se um pequeno desvio de tensão na barra 6 para a solução final (com RT na barra 7). A redução do custo para esta solução foi de R\$ 3.383,00.

TAB. III. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SOLUÇÕES INICIAL E FINAL PARA DIFERENTES MODELOS DE CARGA E DIFERENTES NÍVEIS DE CARREGAMENTO

Modelo de carga	Carregamento	Sol. Inicial		Sol. Final		Perdas (kW)		FO (Custos, em R\$)		Economia (R\$)
		RT ₁	RT ₂	RT ₁	RT ₂	P _{inicial}	P _{final}	C _{inicial}	C _{final}	
Potência constante	Pesado	5	13	6	0	83.79	86.45	162.920,00	146.970,00	15.950,00
	Leve	5	0	7	0	43.44	40.92	43.439,00	40.056,00	3.383,00
Impedância constante	Pesado	5	13	6	0	77.55	74.52	153.760,00	130.740,00	23.020,00
	Leve	6	0	5	0	37.03	35.44	38.105,00	37.321,00	784,00

B. Influência do Modelo de Carga nas Perdas Ativas

Com base na Tab. III, observa-se que há um aumento no valor das perdas ativas, em kW, do modelo potência constante para o modelo impedância constante, para as mesmas condições de análise (mesmo número de RTs).

Por exemplo, para uma solução inicial com 2 RTs e condição de carregamento máxima, o modelo potência constante apresenta aproximadamente 84 kW, enquanto o modelo impedância constante apresenta um valor em torno de 78 kW, havendo uma redução no valor das perdas no último caso. Este comportamento também é verdadeiro para a condição de carga leve.

C. Influência dos Desvios de Tensão na Função Objetivo

O desvio de tensão é um importante parâmetro na análise da função objetivo apresentada neste trabalho. A Fig. 8 ilustra a influência deste parâmetro na obtenção da solução final para o problema.

Analisando o perfil de tensão da Fig. 8, verifica-se que a solução final encontrada para o problema com penalização por violação de tensão apresenta um pequeno desvio na barra 6. Isto ocorre porque o algoritmo encontrou a melhor solução (menor custo) com RT alocado na barra 7. Por outro lado, aumentando o custo da penalização por violação de tensão em 10 vezes, o algoritmo TS encontra como solução final um RT alocado na barra 6, ao invés de 7, (solução com penalidade). Nesta última solução não ocorre desvio de tensão em nenhuma barra do sistema. Portanto, verifica-se que um aumento na penalização por desvio de tensão, na prática, pode ter o mesmo efeito da restrição por violação de tensão.

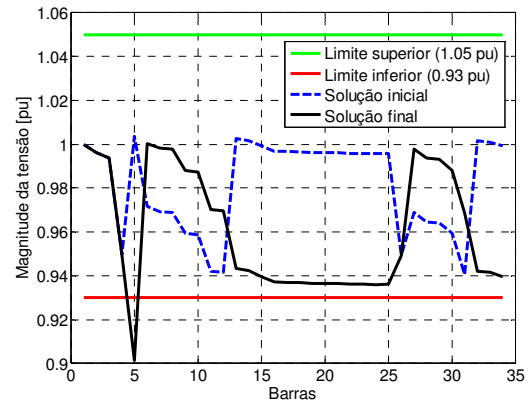


Fig. 5. Perfis de tensão para carregamento nominal considerando modelo de carga potência constante.

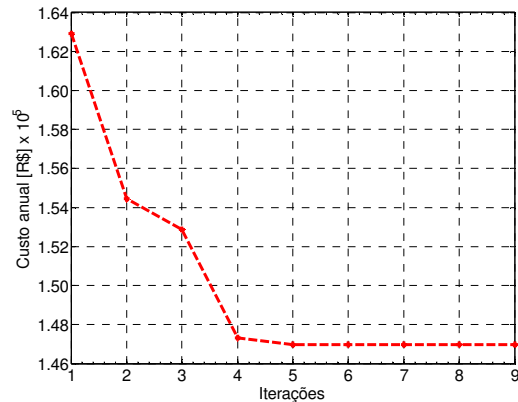


Fig. 6. Função incumbente versus iterações do algoritmo TS.

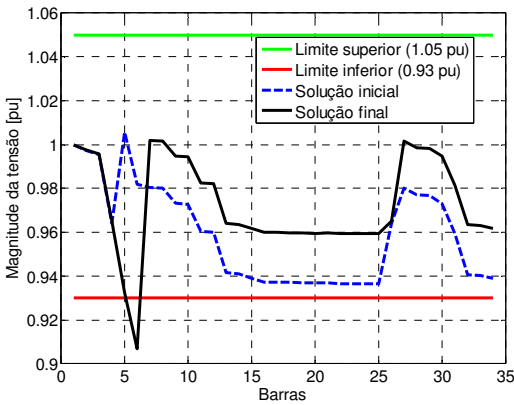


Fig. 7. Perfis de tensão para 70% do carregamento nominal considerando modelo de carga potência constante.

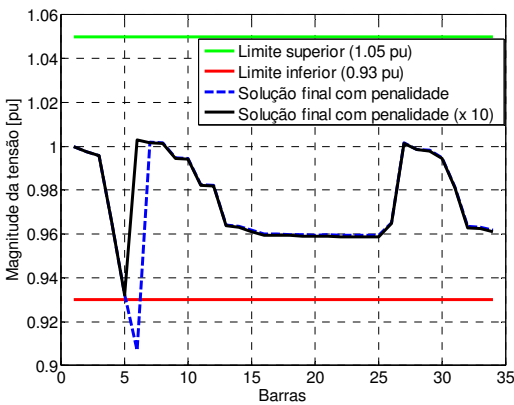


Fig. 8. Influência da penalidade na obtenção da solução final para carga leve considerando modelo de carga potência constante.

V. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o tratamento da função objetivo em termos de parâmetros financeiros oferece uma grande flexibilidade na obtenção de uma solução para o problema de alocação de reguladores. A manipulação da penalização por violação de tensão é um grande exemplo desta flexibilidade. O valor deste parâmetro

pode impor a concessionária a tarefa de investir em unidades reguladoras, garantindo ao consumidor uma maior qualidade no fornecimento de energia. Por outro lado, a ausência ou a redução no valor deste parâmetro, juntamente com o aumento do custo de cada unidade reguladora pode desestimular as empresas distribuidoras no investimento em melhorias na rede.

O método de otimização busca tabu mostrou ser uma ferramenta eficiente e rápida para a solução do problema de alocação de reguladores em sistemas de distribuição sendo capaz de fornecer a solução final em poucas iterações.

REFERÊNCIAS

- [1] Resolution 395, december 15, 2009: Electric Energy National Agency, Brasília, 2009. [Online]. Available: <http://www.aneel.gov.br/>.
- [2] J. J. Grainger and S. Civanlar, "Volt/Var Control on Distribution System with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators, Part I: The Overall Problem." *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 104, No. 11, pp. 3278-3283, November, 1985.
- [3] S. Civanlar and J. J. Grainger, "Volt/Var Control on Distribution System with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators, Part II: The Solution Method." *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 104, No. 11, pp. 3284-3290, November, 1985(a).
- [4] S. Civanlar and J. J. Grainger, "Volt/Var Control on Distribution System with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators, Part III: The Numerical Results." *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 104, No. 11, pp. 3291-3297, November, 1985(b).
- [5] M. M. A., Salama, N. Manojlovic, V. H. Quintana, A. Y. Chikhani. "Realtime Optimal Reactive Power Control for Distribution Networks." *IEEE International Journal Electrical Power & Energy Systems*, vol. 18, No. 3, pp. 185-193, March, 1996.
- [6] M. L., Alves. Módulo de Alocação Otimizada de Reguladores de Tensão e Bancos de Capacitores em Alimentadores de Distribuição. 130 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2005.
- [7] J. E., Mendoza, D. A., Morales, R. A., López, E. A., López, J. Vanner, C. A. C., Coello. "Multiobjective Location of Automatic Voltage Regulators in a Radial Distribution Network Using a Micro Genetic Algorithm." *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, No. 1, pp. 404-412, February, 2007.
- [8] F. Glover, M. Laguna. *Tabu Search*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [9] Mathworks Matlab. Natick, MA, 2009. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/>.
- [10] IEEE 34 Node Test Feeder. Distribution System Analysis Subcommittee Report [Online] Available: <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>.