

BUSCA TABU APLICADA À OTIMIZAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES EM SISTEMAS SECUNDÁRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

LEANDRO DOS SANTOS COELHO

*Laboratório de Automação e Sistemas, Grupo Produtônica
Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, PUCPR / PPGEPS
Imaculada Conceição, 1155, CEP 80215-901 Curitiba, PR
E-mails: leandro.coelho@pucpr.br*

Abstract¼ Capacitors placement determines the size and location of capacitors to be installed on a radial distribution feeder. This paper presents a capacitors placement method that employs a taboo search approach. The taboo search is compared with other optimization methods to a 9-section feeder problem. Simulation results show that the validated taboo search approach can be potential for capacitors placement problems in electrical systems.

Keywords¼ Capacitors placement, distribution of electrical energy, optimization, taboo search.

Resumo¼ A alocação de capacitores determina o tamanho e a localização dos capacitores a serem instalados em um alimentador de distribuição radial. Este artigo apresenta um método para alocação de capacitores que emprega uma abordagem de busca tabu. A busca tabu é comparada com outros métodos de otimização para um problema de alimentador com 9 barras. Os resultados de simulação mostram que a abordagem de busca tabu pode ser promissora para problemas de alocação de capacitores em sistemas elétricos.

Palavras-chave¼ Alocação de capacitor, distribuição de energia elétrica, busca tabu.

1 Introdução

Na literatura tem sido apresentados os resultados de várias pesquisas sobre otimização de sistemas de distribuição de energia elétrica e alocação de capacitores (Baghzouz e Ertem, 1990; Wakileh e Pahwa, 1997; Hong e Huang, 2003).

Este trabalho enfoca a utilização de diferentes abordagens de busca tabu para determinação da melhor configuração de capacitores para um determinado sistema de distribuição de energia elétrica, especificamente um estudo de caso com 9 barras.

A busca tabu é um método heurístico de otimização aplicado, com sucesso, em problemas de otimização combinatória e também de otimização contínua. A busca tabu foi proposta inicialmente por Glover (Glover, 1989b, 1989b) e Hansen (1986) para resolução de problemas de otimização. A busca foi projetada para determinar boas aproximações para a solução de problemas de otimização, possuindo habilidade de guiar o procedimento de busca de métodos iterativos de melhoria. Neste contexto, a busca tabu fornece meios de explorar o espaço de soluções com maior profundidade, de forma a alcançar pontos mais distantes dentro do espaço de busca (Martins, 2002).

O restante do artigo é organizado da seguinte forma. A descrição do estudo de caso para um sistema de distribuição de energia elétrica com 9 barras é detalhada na seção 2. O procedimento de otimização usando busca tabu é detalhado na seção 3. A análise dos resultados obtidos é apresentada na

seção 4. Finalmente, a conclusão é apresentada na seção 5.

2 Exemplo de um Sistema com 9 Barras

Este exemplo descreve o problema de alocação de banco de capacitores em um sistema simplificado de distribuição de energia elétrica. Neste exemplo, o objetivo é minimizar o custo anual de manutenção do sistema, sujeito às restrições operacionais. Geralmente, este é um problema de difícil solução e por simplificação as questões de implementação da solução (custos de operacionais de adição de capacitores na rede), custos de operação e de manutenção não são abordados neste trabalho.

Neste estudo de caso são consideradas três fases balanceadas. As cargas são assumidas invariantes no tempo para evitar que a troca do capacitor e das perdas da associação de energia seja reduzida. Matematicamente, a função objetivo (a ser minimizada) do problema é descrita por:

$$\min(F) = \min(\text{Custo}) \quad (1)$$

O termo *Custo*, neste contexto, se baseia no custo das perdas de energia e da localização do capacitor. O valor da tensão para cada barramento precisa ser mantido dentro de limites exigidos e são matematicamente descritos por

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (2)$$

onde V_i é o valor da tensão do trecho i e V_{\min} e V_{\max} são os limites mínimos e máximos, respectivamente. Aplicando um método simples de

avaliação de fluxo de potência, são necessárias algumas fórmulas matemáticas de fluxo de potência em linhas de distribuição para evitar a utilização do processo complexo da iteração para a análise de fluxo de potência aplicado.

Considerando o exemplo de um diagrama de um alimentador com várias cargas da Figura 1 pode-se equacionar um fluxo de potência:

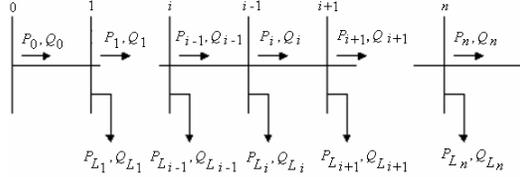


Figura 1. Diagrama do alimentador.

A seguir, as equações utilizadas para o cálculo do fluxo de potência utilizado são apresentadas (Su e Tsai, 1996; Su e Lee, 2002):

$$P_{i+1} = P_i - P_{Li+1} - R_{i,i+1} \left[\frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V|^2} \right] \quad (3)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_{Li+1} - X_{i,i+1} \left[\frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V|^2} \right] \quad (4)$$

$$|V_{i+1}|^2 = |V_i|^2 - 2(R_{i,i+1}P_i + X_{i,i+1}Q_i) + (R_{i,i+1}^2 + X_{i,i+1}^2) \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{|V|^2} \quad (5)$$

onde P_i e Q_i são, respectivamente, a potência real e a potência reativa calculadas fora da barra i , e P_{Li} e Q_{Li} são a potência real e potência reativa na barra i , respectivamente. A resistência e a reatância de uma linha entre as barras i e $i+1$ são $R_{i,i+1}$ e $X_{i,i+1}$ respectivamente.

A perda de potência, na linha conectada entre os trechos i e $i+1$, pode ser calculada pela equação (6), onde

$$P_{perdas}(i, i+1) = R_{i,i+1} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (6)$$

O valor total das perdas no alimentador $P_{perdas}(i, i+1)$ pode ser determinada somando as perdas, em todas as linhas do alimentador, dado por:

$$P_{total, perdas} = \sum_{i=0}^{n-1} P_{perdas}(i, i+1) \quad (7)$$

A finalidade de colocar capacitores de compensação, ao longo da linha de distribuição, é a de diminuir as perdas de potência e o custo total de operação.

Considerando a associação de capacitores existe um número finito de tamanhos padrões com múltiplos do menor tamanho Q_0^c . Adicionalmente o custo por kVAr varia de um para o outro. Em geral, capacitores

de grande capacidade têm um pequeno preço por kVAr. O capacitor disponível é limitado por:

$$Q_{max}^c = LQ_0^c \quad (8)$$

onde L é um inteiro. Conseqüentemente, cada local de instalação possui L tamanhos de capacitores disponíveis $\{Q_0^c, 2Q_0^c, \dots, LQ_0^c\}$.

O custo correspondente equivalente anual por kVAr para o tamanho dos capacitores é, $\{K_1^c, K_2^c, \dots, K_l^c\}$, e o custo anual de instalação dos capacitores para cada compensação pode ser determinado a partir disto.

O custo para o barramento i é C_i^c , e o custo total devido à colocação do capacitor e perdas de potência pode ser determinado pela equação:

$$C_{total} = K_p P_{perdas} + \sum_{i=1}^n K_i^c Q_i^c = K_p P_{perdas} + \sum_{i=1}^n C_i^c \quad (9)$$

onde K_p é o custo anual equivalente por unidade e perda de potência em \$(KW-ano), \$ é uma unidade monetária fictícia, e $i=1,2,3,\dots,n$ são os índices das barras selecionadas para a compensação. A compensação da potência reativa está sujeita a:

$$Q_i^c \leq \sum_{i=1}^n C_{li} \quad (10)$$

onde Q_i^c é a compensação da potência reativa na barra i . Este problema mencionado pode ser classificado como um problema de otimização não-linear.

3 Fundamentos da Busca Tabu

A busca tabu é um tipo de procedimento adaptativo que pode guiar um algoritmo de busca local na exploração contínua do espaço de busca, sem ser encerrado prematuramente pela ausência de vizinhos que melhorem a solução corrente. A busca tabu é caracterizada pelo uso de uma memória flexível. Caso ocorram retornos a um ótimo local previamente visitado (condição desejada, mas não necessária), a busca tabu, através de seus mecanismos de controle, permite que a exploração do espaço de soluções prossiga, evitando ciclagem. O procedimento de otimização da busca tabu transcende a otimalidade local e é baseado em uma função de avaliação, que escolhe, a cada iteração, o "movimento" com a melhor avaliação (Martins, 2002).

As etapas genéricas de um procedimento de otimização por busca tabu são:

1. Escolher uma solução inicial S ;
2. Enquanto um critério de término não for satisfeito, avalie a lista de candidatos a movimento. Selecionar a melhor solução admissível, S_{melhor} (onde: S_{melhor} é a melhor solução entre todas $S' \in V(S)$: S' não pertencendo

à lista tabu, ou mesmo que satisfaça a algum critério de aspiração;

3. Atualizar a solução corrente $S \rightarrow S_{melhor}$ e também atualizar a lista tabu;
4. Se o critério de parada foi satisfeito, parar retornando o melhor resultado, caso contrário voltar a etapa 2.

A função de avaliação escolhe o movimento que produz a maior melhoria, ou a menor piora na função objetivo. O melhor movimento admissível num dado instante é aquele com melhor avaliação na vizinhança da solução corrente em termos de valor de função objetivo e restrições do tipo tabu.

A fim de guardar informações dos movimentos realizados ou apenas para proibir que este ou aquele movimento de troca seja realizado por um determinado número de iterações, uma lista de elementos tabu é gerada. A lista tabu vai garantir que futuros movimentos que apresentam característica tabu, sejam proibidos de serem executados, permitindo que o algoritmo prossiga, saindo de uma possível situação de ciclagem.

A aceitação de movimentos que não melhorem a solução atual possibilita o retorno a soluções já visitadas, portanto ciclos poderão ocorrer, porém, estes não representarão problema, pois a função da lista tabu é exatamente evitar que tais ciclos ocorram. Assim é necessário restringir a busca através de uma estratégia de proibição cuja função seja controlar e atualizar a lista tabu. O objetivo da estratégia de proibição é evitar que seqüências de soluções sejam repetidas, induzindo a exploração de novas regiões.

A busca tabu utiliza estruturas flexíveis de memória para armazenar o conhecimento sobre o espaço de busca adquirido durante o processo de exploração do espaço de soluções, contrariamente a algoritmos que não utilizam memória (tal como o *simulated annealing* (Kirkpatrick *et al.*, 1983)) ou que utilizam estruturas rígidas de memória, tal como o algoritmo *branch-and-bound*.

A busca tabu está centrada em três princípios básicos: (i) uso de uma estrutura de dados do tipo fila para guardar o histórico da evolução do processo de busca; (ii) uso de um mecanismo de controle para fazer o balanceamento entre a aceitação, ou não, de uma nova configuração, com base nas informações registradas na “fila tabu” representando o conjunto de restrições e o critério de aspiração desejado; e (iii) incorporação de procedimentos que alternam as estratégias de diversificação e intensificação.

A busca tabu faz uma exploração agressiva, fazendo sempre o melhor movimento possível em qualquer instante, podendo melhorar ou não a solução atual, o que permite alternar os processos de diversificação e intensificação através da análise dos atributos proibidos guardados em uma lista tabu (Glover e Laguna, 1997).

A memória pode ser várias dimensões, de que pode-se ressaltar as que medem o momento de

ocorrência de um dado evento (uso de um operador, por exemplo) ou, ainda, a frequência com que determinado evento ocorreu. Na primeira dimensão, porque são guardadas as ocorrências mais recentes, pode-se dizer que consiste de uma memória de curto prazo, enquanto na segunda dimensão, ao se guardar as situações mais antigas, pode-se designá-la como memória de longo prazo. Neste contexto, na busca tabu, a memória pode ser utilizada segundo diferentes estratégias: para intensificar a busca na vizinhança de soluções de boa qualidade ou para diversificar a busca em regiões do espaço de busca ainda não visitadas (Costa e Simões, 2004).

Na **diversificação**, o objetivo é direcionar a busca para novas regiões, de forma a atingir todo o espaço de busca evitando assim que a busca pare numa determinada solução ótima local que corresponde a repetições cíclicas indesejadas. A idéia é tentar explorar regiões ainda inexploradas ou pouco exploradas modificando as regras de escolha, com o intuito de desencorajar movimentos e soluções muito frequentes no decorrer da história da busca (penalizações) e incentivar movimentos e soluções pouco frequentes no decorrer da história da busca (penalizações), ou ainda reiniciar a busca utilizando as informações de frequência.

Na **intensificação**, o objetivo é reforçar a busca em regiões onde parece ter maiores chances de apresentar soluções de qualidade, ou seja, intensificar a busca na vizinhança de uma solução historicamente considerada boa. Neste contexto, deve-se modificar as regras de escolha de forma a encorajar movimentos e soluções com características “boas” no decorrer da história da busca, combinar movimentos com a estrutura dessas soluções ou reiniciar a busca a partir de uma solução “boa”.

A abordagem de busca tabu utilizada neste trabalho é regida pelas seguintes etapas:

1. Iniciar os parâmetros da busca tabu: fator de frequência, fator de recência, número de iterações (critério de parada), número de vizinhanças e coeficiente de aprendizado;
2. Iniciar o contador de iterações;
3. Enquanto o critério de parada não é satisfeito, faça
Criar as soluções da vizinhança;
Avaliar as soluções da vizinhança;
Atualizar o coeficiente de aprendizado;
Escolher a melhor vizinhança;
Atualizar a memória (recência e lista tabu);
Atualizar a aspiração;
Incrementar o contador do número de iterações.
5. Apresentar solução encontrada pela busca tabu.

Neste trabalho, os movimentos armazenados na lista tabu são realizados com mais frequência, e recentemente, de acordo com alguns critérios denominados restrições tabu. Uma restrição do tipo tabu é ativada quando o reverso de um movimento armazenado na lista tabu ocorre com um pré-

determinado número de iterações ou com uma determinada frequência sobre um longo número de iterações. A primeira restrição produz uma restrição baseada em um fator de recência. A segunda restrição produz uma restrição baseada em frequência baseada no fator de frequência. Os detalhes sobre o projeto dos fatores de recência e frequência, usados neste trabalho, foram apresentados em Kalinli e Karaboga (2004).

4 Análise dos Resultados

O procedimento computacional adotado neste trabalho é composto principalmente do cálculo da perda de potência, determinação das tensões nas barras e a aplicação da otimização do banco de capacitores usando busca tabu. O procedimento computacional determina diferentes capacitores usando a busca tabu visando à minimização da função objetivo mencionada na equação (9).

O procedimento de solução inicia com a execução do procedimento iterativo para determinação do fluxo linha-alimentador e os respectivos cálculos de tensão, perdas de linha e custo anual. Após, é determinada a localização e tamanho dos capacitores a serem alocados usando otimização através de busca tabu. Neste caso, deve-se observar se as restrições (limites) de tensão ao longo das linhas são atendidas.

Para ilustrar uma aplicação e demonstrar o desempenho da abordagem de otimização proposta, um exemplo de sistema de distribuição foi avaliado.

Para o exemplo (mencionado na seção 2) é utilizada uma rede de 23 KV, nove pontos de carga, conforme mostrado na Figura 2.

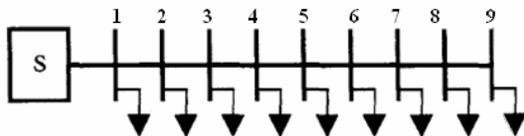


Figura 2. Diagrama de ponto de carga.

A Tabela 1 apresenta a impedância de cada carga e a Tabela 2 informa os dados de potências reais e reativas das cargas. O custo anual equivalente por unidade e perda de potência, K_p , é definido em 168 \$/(kW-ano), e os limites de tensão na barra são os propostos por Su e Lee (2002) de $V_{min}=0,90$ p.u. e $V_{max}=1,10$ p.u.

O tamanho de capacitores disponíveis e seus correspondentes custos anuais estão listados na Tabela 3, estes valores são os mesmos utilizados em Su e Tsai (1996) e Su e Lee (2002). A Tabela 4 mostra os 27 possíveis tamanhos de capacitores, onde S é a subestação.

Tabela 1. Dados de impedância do alimentador.

barramento i	barramento $i+1$	$R_{i,i+1}$ (Ω)	$X_{i,i+1}$ (Ω)
0	1	0,1233	0,4127
1	2	0,0140	0,6051
2	3	0,7463	1,2050
3	4	0,6984	0,6084
4	5	1,9831	1,7276
5	6	0,9053	0,7886
6	7	2,0552	1,1640
7	8	4,7953	2,7160
8	9	5,3434	3,0264

Tabela 2. Dados das cargas.

barramento	P_L (KW)	Q_L (kVAr)
1	1840	460
2	980	340
3	1790	446
4	1598	1840
5	1610	600
6	780	110
7	1150	60
8	980	130
9	1640	200
total	12368	4186

Tabela 3. Tamanho dos capacitores e custos anuais.

tamanho (kVAr)	150	300	450	600	900	1200
custo	75	97,5	114	132	165	204

Tabela 4. Possíveis escolhas dos tamanhos de capacitores.

j	1	2	3	4	5	6	7
Q_j^C	150	300	450	600	750	900	1050
j	8	9	10	11	12	13	14
Q_j^C	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100
j	15	16	17	18	19	20	21
Q_j^C	2250	2400	2550	2700	2850	3000	3150
j	22	23	24	25	26	27	-
Q_j^C	3300	3450	3600	3750	3900	4050	-

Neste trabalho, foram avaliados dois casos e a função de aptidão (*fitness*) adotada é

$$fitness = \frac{1}{(1 + Custo)} \quad (11)$$

$$Custo = Perdas + Compensação \quad (12)$$

onde o objetivo é a maximização da equação (11). Neste contexto, dois casos são avaliados.

Caso 1: É restrito a três localizações (barras 4, 5 e 9) para alocação de capacitores, onde a aptidão é calculada por

$$fitness = 1/[1 + 0,00K_p P_{t,perdas} + C_4^C + C_5^C + C_9^C] \quad (13)$$

Caso 2: Todas as 9 barras são avaliadas para alocação de capacitores, onde a aptidão é calculada por

$$fitness = 1 / [1 + 0,001 K_p P_{t,perdas} + \sum_{i=1}^9 C_i^c] \quad (14)$$

É importante mencionar que para o caso 1, o número total de possibilidades para aplicação de busca exaustiva é $28^3=28192$. Entretanto, no caso 2, o número total de possibilidades de projeto é $28^9=1.058 \cdot 10^{13}$.

Foram realizados 30 experimentos com cada abordagem de busca tabu. Os parâmetros da busca tabu foram: máximo de iterações (critério de parada) é 100, fator de frequência com valor 2 e número de vizinhanças igual a 4.

Na Tabela 5, os resultados obtidos para os dois casos utilizando busca tabu (30 experimentos) são resumidos. Para o caso 1, a busca tabu obteve o mesmo custo mínimo (melhor resultado de custo de 30 experimentos). Em relação ao caso 2, o melhor resultado obtido com a busca tabu foi 115044,24.

Nas Tabelas 6 e 7, os resultados obtidos pela busca tabu, são comparados aos resultados apresentados em Baghzouz e Ertem (1990), Su e Tsai (1996) e Su e Lee (2002). Nota-se que os resultados da busca tabu foram iguais, no caso 1, a uma abordagem mista de evolução diferencial e análise de sensibilidade. Entretanto, a busca tabu apresentou menor custo anual em comparação a outros métodos da literatura avaliada para os dois casos estudados.

5 Conclusão e Futura Pesquisa

A utilização de variantes da busca tabu apresentou resultados promissores na resolução do problema de alocação de capacitores em um sistema de distribuição primário. No caso 1, os resultados da busca tabu foram iguais aos melhores encontrados na literatura, enquanto no caso 2 o custo anual de instalação e manutenção foi menor que outros métodos.

Em pesquisa futura tem-se por meta o desenvolvimento de outras heurísticas de busca tabu híbridas com métodos de busca local para a resolução de problemas de alocação de capacitores em sistemas de distribuição de grande porte.

Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (processo: 309646/2006-5/PQ).

Referências Bibliográficas

Baghzouz, Y. e Ertem, S. (1990). Shunt capacitor sizing for radial distribution feeders with distorted

substation voltages, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **5**(2): 650-657.

Costa, E. e Simões, A. (2004). *Inteligência artificial: fundamentos e aplicações*, FCA - Editora em Informática, Lisboa, Portugal.

Glover, F. (1989a). Tabu search – part I, *ORSA Journal on Computing*, **1**(3):190-206.

Glover, F. (1989b). Tabu search – part II, *ORSA Journal on Computing*, **2**(1): 4-32.

Glover, F. e Laguna, M. (1997). *Tabu search*, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts.

Hansen, P. (1986). The steepest ascent/mildest descent heuristic for combinatorial programming, *Congress on Numerical Methods in Combinatorial Optimization*, Capri, Italy.

Hong, Y. -Y. e Huang, W. -F. (2003). Interactive multiobjective passive filter planning with fuzzy parameters in distribution systems using genetic algorithms, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **18**(3): 1043-1050.

Kalinli, A. e Karaboga, D. (2004). Training recurrent neural networks by using parallel tabu search algorithm based on crossover operation, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **17**(5): 529-542.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. e Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing, *Science*, **220**(4598): 45-54.

Martins, V. C. (2002). *Otimização de layout em ambientes industriais realistas usando busca tabu*, Dissertação de mestrado, Pós-Graduação em Informática Aplicada, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, PR.

Su, C. -T. e Lee, C. -S. (2002). Modified differential evolution method for capacitor placement of distribution systems, *Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, Yokohama, Japan, vol. 1, pp. 208-213.

Su, C. -T. Su e Tsai, C. C. (1996). A new fuzzy reasoning approach to optimum capacitor allocation for primary distribution systems, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Shanghai, China, pp. 237-241.

Wakileh, J. J. e Pahwa, A. (1997). Optimization of distribution system design to accommodate cold load pickup, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **12**(1): 339-345.

Tabela 5. Resultados da busca tabu para os casos 1 e 2 (30 experimentos).

caso	Usando custo do melhor solução após 200 iterações			
	máximo	mínimo	médio	desvio padrão
1	117313,19	118538,53	118890,20	329,31
2	173727,44	115044,24	12264,09	1385,92

Tabela 6. Resultados da otimização para o problema de 9 barras para o caso 1.

parâmetros		sem compensação	com compensação				
			heurística #	análise de sensibilidade *	evolução diferencial e análise de sensibilidade *	busca tabu	busca exaustiva *
total de perdas (KW)		787,778	704,300	705,875	698,140	698,140	698,140
custo anual (\$)		131675	119513	119910	118538	118538	118538
compensação	Q_4^C (KVAr)	0	2700	3600	4050	3600	4050
	Q_5^C (KVAr)	0	2850	1650	1650	1650	1650
	Q_9^C (KVAr)	0	900	900	750	900	750
$ V_i $	máximo	0,9929 (barra 1)	1,000	1,002 (barra 2)	1,001 (barra 2)	1,000 (barra 1)	1,0001 (barra 2)
$ V_i $	mínimo	0,8875 (barra 9)	0,9050	0,9010 (barra 9)	0,9000 (barra 9)	0,9010 (barra 10)	0,9000 (barra 9)

Notação: # Baghzouz e Ertem (1990); * Su e Lee (2002).

Tabela 7. Resultados da otimização para o problema de 9 barras para o caso 2.

parâmetros	sem compensação	com compensação			busca tabu
		sistema nebuloso **	análise de sensibilidade *	evolução diferencial e análise de sensibilidade *	
custo anual (\$)	131675	119420	117595	115395	115044,23
economia em relação a sem compensação (\$)	-	12255	14080	16280	16630,77

Notação: ** Su e Tsai (1996); * Su e Lee (2002).