

ANÁLISE DE ÍNDICES DE SENSIBILIDADE DA METAHEURÍSTICA GRASP APLICADA AO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

SIMONE S. F. DE SOUZA¹, MARINA LAVORATO¹, RUBEN ROMERO¹

¹ Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Caixa postal 31, 15385-000, Ilha Solteira, SP, BRASIL

E-mails: simonefrutuoso.mat@gmail.com, marina@dee.feis.unesp.br, ruben@dee.feis.unesp.br

Abstract— This paper presents an analysis of the sensitivity index used in a metaheuristic GRASP to solve the distribution system reconfiguration problem. The distribution system reconfiguration problem is a complex problem, and it aims to find the best topology for radial distribution system to minimize power losses of the system. The metaheuristic GRASP is based on a constructive heuristic algorithm to construct a proposed good quality feasible solution, and a local search heuristic algorithm to perform a process of local search in the neighborhood of proposed solution constructed by constructive heuristic algorithm. In fact for the solution constructed by constructive heuristic algorithm be a good quality, it depends on a good sensitivity index, and a good strategy to construct better solutions. In this way an analysis with three sensitivity indexes is presented in this work. To perform the analysis the proposed GRASP was evaluated with 6 tests systems of 33, 70, 84, 119, 136 and 417 buses.

Keywords— Analysis of the sensitivity index, Metaheuristic GRASP, Distribution system reconfiguration, KNITRO, AMPL.

Resumo— Neste artigo é apresentada uma análise do índice de sensibilidade utilizado em uma metaheurística GRASP para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. O problema de reconfiguração de sistemas de distribuição é um problema complexo, e tem como objetivo encontrar a melhor topologia radial para um sistema de distribuição de energia elétrica, com o intuito de minimizar as perdas ativas do sistema. A metaheurística GRASP é composta por um algoritmo heurístico construtivo responsável por construir uma proposta de solução factível e de boa qualidade, e um algoritmo de busca local, que realiza um processo de busca local na vizinhança da proposta de solução construída pelo algoritmo heurístico construtivo. Efetivamente para que a solução construída pelo algoritmo heurístico construtivo seja de boa qualidade, a mesma depende de um bom índice de sensibilidade, e uma boa estratégia para construir melhores soluções. Desta forma uma análise com três índices de sensibilidades é apresentada neste trabalho. Para realizar a análise a metaheurística GRASP proposta foi avaliada com 6 sistemas testes de 33, 70, 84, 119, 136 e 417 barras.

Palavras-chave— Análise do índice de sensibilidade, Metaheurística GRASP, Reconfiguração do sistema de distribuição, KNITRO, AMPL.

1 Notação

Conjuntos:

Ω_c	Conjunto de circuitos ($\Omega_1 \cup \Omega_0 \cup \Omega_l$);
Ω_b	Conjunto de barras;
Ω_1	Conjunto de circuitos fechados;
Ω_0	Conjunto de circuitos já abertos definitivamente;
Ω_l	Conjunto de circuitos livres (ainda podem ser fechados ou abertos);
$\Omega_{bi,1}$	Conjunto de barras conectadas na barra i e cujos circuitos já foram fechados;
$\Omega_{bi,l}$	Conjunto de barras conectadas na barra i e cujos circuitos se encontram livres

Constantes:

n_b	Número de barras do sistema ($n_b = \Omega_b $);
\underline{V}	Magnitude de tensão mínima;
\overline{V}	Magnitude de tensão máxima;
\overline{S}_{ij}	Limite de fluxo de potência aparente no circuito $i - j$;

Pd_i	Demanda de potência ativa na barra i ;
Qd_i	Demanda de potência reativa na barra i ;
g_{ij}	Condutância do circuito $i - j$;
b_{ij}	Susceptância do circuito $i - j$;

Funções:

P_{ij}	Fluxo de potência ativa que sai da barra i para a barra j ;
Q_{ij}	Fluxo de potência reativa que sai a barra i para barra j ;

Variáveis:

x_{ij}	Variável binária que determina se o circuito entre as barras i e j está fechado ou aberto;
S_{ij}	Potência aparente no circuito ij ($S_{ij} = \sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}$);
V_i	Magnitude de tensão na barra i ;
θ_{ij}	Diferença angular entre as barras i e j ;
Ps_i	Potência ativa fornecida pela subestação da barra i ;
Qs_i	Potência reativa fornecida pela subestação da barra i ;
n_1	Número de circuitos já fechados;

2 Introdução

O problema de reconfiguração de sistemas de distribuição (RSD) de energia elétrica tem o objetivo de encontrar a melhor topologia para o sistema de distribuição através da abertura e fechamento de chaves de interconexões mantendo uma topologia radial e os limites de tensão em níveis preestabelecidos pelas normas reguladoras. A RSD é um procedimento realizado principalmente, visando minimizar as perdas ativas do sistema, melhorar os níveis de tensão, manter a confiabilidade do sistema, fazer isolamento de faltas e a realização de manutenção preventiva. Os chaveamentos são utilizados para manter o controle sobre a rede, e assegurar a operação dentro de altos padrões de qualidade de fornecimento de energia elétrica (Guimarães et al., 2004).

O problema de reconfiguração é de natureza combinatória e pode ser modelado como um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM) (Merlin; Back, 1975), onde o objetivo é minimizar as perdas de potência ativa no sistema elétrico, sujeito às restrições essenciais para a operação do sistema como a condição de radialidade, limites de tensão, limites de corrente nos circuitos, além de ter que satisfazer a primeira e a segunda lei de Kirchhoff no sistema.

Na literatura os algoritmos heurísticos e as metaheurísticas são as técnicas mais utilizadas para resolver o problema de RSD. Dentre os algoritmos heurísticos propostos estão (Merlin e Beck, 1975), (Civanlar et al., 1988) e (Baran; Wu, 1989). Dentre as metaheurísticas destacam-se o Algoritmo Genético (Nara et al., 1992), Busca Tabu (Zhang et al., 2007), Colônia de Formiga (Cabezas, 2007), Simulated Annealing (Chang; Kuo, 1994), GRASP (Souza, 2013), (Souza et al., 2012). Métodos clássicos como algoritmo branch and bound (Abur, 1996), (Lavorato et al., 2012) e as redes neurais artificiais (SALAZAR et al., 2006), também são encontrados na literatura para resolver o problema de RSD.

Vale ressaltar que os algoritmos heurísticos construtivos necessitam de um índice de sensibilidade para realizar o processo de escolha dos circuitos candidatos a serem fechados ou abertos no sistema elétrico. Um bom índice de sensibilidade pode proporcionar soluções de melhor qualidade.

Levando em consideração que a metaheurística GRASP necessita de uma fase construtiva que possibilite a construção de soluções de boa qualidade, este artigo apresenta uma análise de três índices de sensibilidade utilizando a metaheurística GRASP como ferramenta para resolver o problema de RSD. A metaheurística GRASP proposta neste trabalho utiliza um AHC baseado em (Lavorato et al., 2010), no qual é considerado que no início do processo iterativo todos os circuitos estão abertos e um problema de programação não linear (PNL) é resolvido a cada iteração para calcular o ponto de

operação do sistema e a partir deste o índice de sensibilidade indica qual o circuito candidato para ser incorporado à solução. Os resultados foram obtidos através de testes computacionais realizados utilizando os sistemas teste 33, 70, 84, 119, 136 e 417 barras, estes resultados foram comparados com os resultados encontrados na literatura especializada.

Este artigo está organizado como a seguir. Na seção 3 apresenta-se o modelo matemático do problema de RSD. Na seção 4 apresenta-se o algoritmo genérico da metaheurística GRASP. A metodologia proposta encontra-se na seção 5. Os resultados estão na seção 6 e na seção 7 são descritas as conclusões para este trabalho.

3 Modelo Matemático do Problema

Neste trabalho o problema de RSD de energia elétrica é modelado como um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM), e assume a seguinte forma (Lavorato, et al., 2012):

$$\text{Min } v = \sum_{(ij) \in \Omega_c} [g_{ij} x_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij})] \quad (1)$$

s.a.

$$Ps_i - Pd_i - \sum_{j \in \Omega_{bi}} (x_{ij} P_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2)$$

$$Qs_i - Qd_i - \sum_{j \in \Omega_{bi}} (x_{ij} Q_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (3)$$

$$\underline{V} \leq V_i \leq \bar{V} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (4)$$

$$x_{ij} (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) \leq \bar{S}_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall ij \in \Omega_c \quad (6)$$

$$\sum_{(ij) \in \Omega_l} x_{ij} = n_b - 1 \quad (7)$$

A função objetivo do problema (1) representa a minimização das perdas ativas do sistema de distribuição de energia elétrica.

As equações (2) e (3) garantem o balanço de potência do sistema. A inequação (4) representa os limites de magnitude de tensão nas barras do sistema, sendo os limites regidos pelas normas reguladoras dos sistemas elétricos. A inequação (5) representa o limite do fluxo de potência no circuito ij . A equação (6) representa a característica binária da variável de decisão do problema, onde x_{ij} pode assumir dois estados, sendo que 0 (zero) significa que o circuito ij está aberto e 1 (um) que o circuito ij está fechado.

A equação (7) representa uma das condições necessárias para garantir a radialidade do sistema, no entanto esta condição não é suficiente. Desta forma, para garantir a radialidade do sistema de distribuição além de satisfazer a equação (7) é necessário garantir que o sistema seja conexo, isto é, que todas as barras de carga do sistema sejam atendidas (satisfeito pelas equações (2) e/ou (3)) (Lavorato et al., 2012).

4 GRASP Proposto para o Problema de RDS

A Metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedur*) é uma metaheurística constituída de uma fase de construção e outra de busca local. A fase construtiva é baseada em um AHC do tipo guloso, para resolver problemas (Feo; Resende, 1995). Na fase de busca local é utilizado um algoritmo de busca local com o objetivo de procurar na vizinhança da solução fornecida pela fase de construção, uma melhor solução para o problema. O GRASP pode contar ainda com uma fase de pré-processamento na qual, as informações sobre o problema são pré-processadas e avaliadas com o objetivo de diminuir o espaço de busca do problema caso seja possível.

Desta forma o algoritmo GRASP genérico, assume a seguinte forma (Feo; Resende, 1989):

1. Fazer a leitura dos dados do problema. Identificar a forma de codificação para uma proposta de solução. Identificar uma forma de avaliar a qualidade da função objetivo. Definir um algoritmo heurístico do tipo guloso a ser usado na fase construtiva e uma heurística de busca local para ser usada na fase de busca local. Definir o valor do parâmetro α ;
2. Realizar a fase de pré-processamento, se houver;
3. Realizar a fase construtiva e encontrar uma proposta de solução;
4. Realizar a fase de busca local e atualizar a incumbente caso seja possível;
5. Se o critério de parada não for satisfeito, voltar ao passo 2. Caso contrário, pare. A resposta do algoritmo é a solução incumbente armazenada.

5 Metodologia Proposta

Nesta seção apresenta-se a metodologia proposta neste trabalho, onde se aplica a metaheurística GRASP na resolução do problema de RSD de energia elétrica. Este algoritmo é dividido em três partes principais: a fase de pré-processamento, a fase construtiva e a fase de busca local.

Nos tópicos a seguir serão descritas a formulação do problema de PNL e as fases da metaheurística GRASP.

5.1 Fase de Pré-processamento

Nesta fase é avaliada a existência de circuitos que caso sejam desligados tornam o sistema desconexo sem a possibilidade de uma reconfiguração para que as cargas sem alimentação sejam reconectados ao sistema. Desta forma, tais circuitos devem obrigatoriamente fazer parte da reconfiguração final do sistema. Assim sendo, estes circuitos são fixados no início do processo iterativo fazendo com que o

espaço de busca do problema de RSD seja realizado. A avaliação dos circuitos é feita da seguinte forma:

1. Encontrar um circuito do sistema que caso aberto torna o sistema desconexo e ir ao Passo 2. Caso contrário Pare e inicie o processo com $\Omega_1 = \emptyset$;
2. Fechar o circuito encontrado no Passo 1 e atualize o conjunto Ω_c fixando $x_{ij} = 1$;
3. Atualizar a topologia corrente com a nova configuração $\Omega_j = \Omega_c \setminus \Omega_1$ e volte ao Passo 1.

5.2 PNL utilizado na Fase Construtiva

Na fase construtiva utiliza-se um problema de PNL, que permite encontrar o ponto de operação do sistema, e obter o valor de perdas ativas totais (função objetivo).

A partir do modelo matemático apresentado na seção 3, para um problema de PNLIM (1) – (7), relaxa-se a integralidade das variáveis binárias (14) e então o problema se transforma em um problema de PNL no qual está incorporada a informação gerada pela fase de pré-processamento. Desta forma o PNL assume a seguinte estrutura:

$$\begin{aligned} \text{Min } v = & \sum_{(ij) \in \Omega_t} [g_{ij} x_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij})] + \\ & \sum_{(ij) \in \Omega_d} [g_{ij} x_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij})] \end{aligned} \quad (8)$$

s.a.

$$P_s i - P_d i - \sum_{j \in \Omega_{bi,1}} (x_{ij} P_{ij}) - \sum_{j \in \Omega_{bi,1}} (P_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (9)$$

$$Q_s i - Q_d i - \sum_{j \in \Omega_{bi,1}} (x_{ij} Q_{ij}) - \sum_{j \in \Omega_{bi,1}} (Q_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (10)$$

$$\underline{V} \leq V_i \leq \bar{V} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (11)$$

$$x_{ij} (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) \leq \bar{S}_{ij}^{-2} \quad \forall (ij) \in \Omega_t \quad (12)$$

$$(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) \leq \bar{S}_{ij}^{-2} \quad \forall (ij) \in \Omega_c \quad (13)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1 \quad \forall (ij) \in \Omega_t \quad (14)$$

$$\sum_{(ij) \in \Omega_t} x_{ij} = n_b - 1 - n_1 \quad (15)$$

As equações (1), (2), (3), (5) e (7) foram modificadas para que as informações sobre os circuitos já fixados e livres fossem incorporados ao problema de PNL, resultando nas equações (8), (9), (10), (12), (13) e (15), respectivamente. Tais informações evitam que os circuitos que já foram fechados ou abertos não entrem novamente na Lista Restrita de Candidatos (LRC).

5.3 Fase Construtiva do AHC

O AHC utilizado neste trabalho é baseado em (Oliveira, 2010). Neste consideram-se todos os circuitos livres (Ω_l) no início do processo, desta forma o AHC utilizado tem como objetivo a cada iteração fechar um circuito no sistema visando construir uma solução factível.

Para montar a LRC utiliza-se um índice de sensibilidade que é denominado Índice de

Sensibilidade de Fechamento de Circuitos (*ISFC*), cuja função é indicar os circuitos mais atraentes para serem fechados no sistema a cada iteração. Para este trabalho foram utilizados três *ISFC*, apresentados a seguir:

$$ISFC_{ij} = |S_{ij}| \quad (16)$$

$$ISFC_{ij} = |S_{ij}| * x_{ij} \quad (17)$$

$$ISFC_{ij} = x_{ij} \quad (18)$$

Após calcular o *ISFC* monta-se a LRC de circuitos candidatos para serem fechados no sistema. Esta lista é criada com circuitos livres, que tenham o valor *ISFC* dentro do intervalo apresentado em (19).

$$ISFC_{\max} - \alpha(ISFC_{\max} - ISFC_{\min}) \leq ISFC_{ij} \leq ISFC_{\max} \quad (19)$$

sendo:

$ISFC_{\max}$ é o maior valor de (16), (17) ou (18) da lista dos circuitos que podem ser fechados;

$ISFC_{\min}$ é o menor valor de (16), (17) ou (18) da lista dos circuitos que podem ser fechados;

α é um parâmetro que tem valores definidos no intervalo [0,1].

Depois de criar a LRC, escolhe-se de forma aleatória um circuito ij desta lista que deve ser adicionado na solução corrente, e atualiza-se o conjunto Ω_1 . Na sequência, executa-se um processo de avaliação, visando identificar a formação de laços. Neste processo utiliza-se uma sub-rotina para identificação de laços baseada em (Souza, 2011). O laço no sistema pode ser ocasionado por um circuito livre adjacente aos circuitos que se encontre fechado no sistema. A avaliação é essencial para o AHC, pois auxilia ao mesmo a gerar somente propostas de soluções factíveis. Este processo de avaliação é apresentado com maiores detalhes em (Souza, 2013).

A fase construtiva é descrita nos passos a seguir:

1. Resolver um problema de PNL, para a topologia corrente;
2. Calcular o índice de sensibilidade *ISFC*;
3. Montar a LRC;
4. Escolher de forma aleatória um circuito da LRC que deve ser adicionado na solução corrente e atualizar o conjunto Ω_1 ;
5. Avaliar a possibilidade de fixar circuitos com $x_{ij} = 0$;
6. Atualizar a topologia corrente ($\Omega_1, \Omega_1, \Omega_0$);
7. Se encontrou uma proposta de solução pare, caso contrário volte ao passo 1;

5.4 PNL utilizado na Fase de Busca Local

Para a fase de busca local foi acrescentada uma variável de corte de carga no problema de PNL com o objetivo de resolver apenas PNL's factíveis. Desta forma a função objetivo (8) foi substituída pela equação (20).

$$\sum_{(ij) \in \Omega_b} (cc_i) \quad (20)$$

Para evitar a utilização de uma penalização do corte de carga optou-se utilizar como função objetivo a minimização do corte de carga, assim, as perdas ativas do sistema são calculadas após o cálculo do ponto de operação do sistema caso o corte de carga seja igual a zero. Devido ao acréscimo do corte de carga no problema de PNL as restrições (9) e (10) também foram modificadas, ficando da seguinte forma:

$$Ps_i - (1 - cc_i)Pd_i - \sum_{j \in \Omega_{b,i}} (x_{ij}P_{ij}) - \sum_{j \in \Omega_{b,i,j}} (x_{ij}P_{ij}) = 0 \quad (21)$$

$$Qs_i - (1 - cc_i)Qd_i - \sum_{j \in \Omega_{b,i}} (x_{ij}Q_{ij}) - \sum_{j \in \Omega_{b,i,j}} (x_{ij}Q_{ij}) = 0 \quad (22)$$

Ao adicionar o corte de carga no problema de PNL, foi necessário acrescentar a restrição (23) e as restrições (11), (12), (13), (14) e (15) não foram modificadas.

$$0 \leq cc_i \leq 1 \quad (23)$$

5.5 Fase de Busca Local

A fase de busca local tem como objetivo encontrar uma melhor configuração dentro da vizinhança da solução obtida pela fase construtiva. Neste trabalho foi utilizada uma heurística de busca baseada na heurística apresentada em (Carreño et al., 2007).

Os passos da fase de busca local são descritos a seguir:

1. Introduzir no sistema um dos circuitos desconectados na fase construtiva e identifique o laço formado por este circuito;
2. Retirar um circuito adjacente conectado diretamente ao circuito introduzido (de ambos os lados, montante/jusante);
3. Resolver o problema de PNL;
4. Se $\sum_{(ij) \in \Omega_b} (cc_i) = 0$, avançar ao passo 5, caso contrário voltar ao passo 2;
5. Calcule as perdas ativas da nova topologia;
6. Verificar se as perdas melhoraram em relação a melhor solução encontrada até o momento;
7. Se melhorou, atualize a solução corrente, e continue a busca do mesmo lado do laço. Volte ao passo 2;
8. Se piorou, faça a busca pelo outro lado do laço, e volte ao passo 2;
9. Caso todos os laços do sistema tenham sido analisados pare, fim da fase de busca local, caso contrário, volte ao passo 1;

A sub-rotina para identificar a malha formada no sistema é a mesma utilizada na fase construtiva. A solução encontrada na fase de busca local é comparada com a solução incumbente, caso ela seja melhor atualiza-se a incumbente, caso contrário

descarte-se a solução encontrada na fase de busca local.

6 Resultados

O algoritmo GRASP foi escrito na linguagem de modelagem matemática AMPL (A Modeling Language for Mathematical Programming) (Fourer et al., 2003) e para resolver o problema de PNL a cada iteração do AHC e da fase de busca local foi utilizado o solver comercial KNITRO® 7.0 (Byrd et al., 2006).

6.1 Resultados para os Sistemas Elétricos

Foram utilizados os sistemas testes de 33, 70, 84, 119, 136 e 417 barras. Os dados estão disponíveis em (Baran; Wu, 1989), (Guimarães et al., 2004), (Chiou et al., 2005), (Carreño et al., 2007), (Zhang et al., 2007) e (Bernal-Agustin, 1998) respectivamente.

Na tabela 1 apresentam-se os resultados encontrados para os sistemas citados acima.

Tabela 1. Resultados.

Sistema	Perdas (kW)	Topologia: ramos desligados
33 barras	139,55	7-9-14-32-37
70 barras	9,34	15-57-62-70-71
84 barras	469,88	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92
119 barras	853,65	24-26-35-40-43-51-59-72-75-96-98-110-122-130-131
136 barras	280,16	7-35-51-90-96-106-118-126-135-137-138-141-142-144-145-146-147-148-150-151-155
417 barras	581,56	5- 13- 15- 16- 21- 26- 31-54-57- 59-60-73- 86- 87- 94- 96- 97-111-115- 136-142-149-150-155-156-158-163- 168-169-178-179-191-195-199-214-221-254- 256-266-282-317-322-325- 358- 362-369-392-395-403-404- 416-423-426-431-436-437- 446- 449- 466

Os sistemas testes de 33, 70, 84, 119, 136 e 417 barras possuem tensão nominal igual a 12,66kV, 12,66kV, 11,40kV, 11,00kV, 13,80kV e 11,00kV, respectivamente. Os resultados para os sistemas foram obtidos utilizando um parâmetro $\alpha = 0,5$.

Os resultados obtidos pela metodologia para os sistemas de 33, 70, 84, 119 e 136 barras são iguais (perdas e topologia) aos disponíveis na literatura (Oliveira, 2011), (Chiang; Jean-Jumeau,1990), (Oliveira, 2011), (Oliveira, 2011) e (Oliveira, 2011) respectivamente. Para o sistema de 417 barras o método obteve uma configuração melhor que apresentada em (Franco et al., 2013).

6.2 Análise do Índice de Sensibilidade

O índice de sensibilidade tem uma função fundamental no contexto das metaheurísticas e AHC, pois indica quais são os circuitos mais atraentes para serem fechados ou abertos durante o processo de

execução. O índice de sensibilidade influencia diretamente na qualidade das soluções.

Neste trabalho a maior motivação foi realizar uma análise com os três índices de sensibilidade apresentados em (16), (17) e (18), visando observar o desempenho que cada índice de sensibilidade proporciona para a metaheurística GRASP.

Foram realizados testes com os diferentes índices de sensibilidade em todos os sistemas elétricos. Nos testes foram executadas 50 vezes o programa para cada índice de sensibilidade em cada sistema elétrico, e desta maneira foi possível analisar a eficiência de cada um destes índices.

Nos testes realizados os três índices de sensibilidade encontraram a melhor solução dos sistemas elétricos, já encontradas na literatura (tabela 1). Na Tabela 2 apresenta-se o intervalo de iterações nos quais foram encontrados os resultados (melhor resultado da literatura) para cada índice de sensibilidade, em todos os sistemas elétricos, onde cada programa executado para os sistemas de 33, 70, 84, 119, 136 e 417 foram executados com 30, 30, 50, 50, 100 e 200 iterações respectivamente.

Tabela 2. Análise dos índices de sensibilidade.

Sistema	Índices de sensibilidade		
	$ S_{ij} $	$ S_{ij} * x_{ij}$	x_{ij}
33 barras	1-2	1-4	1-5
70 barras	1-2	1-5	1-6
84 barras	1-5	5-13	9-27
119 barras	1-11	7-18	12-36
136 barras	2-18	13-27	19-47
417 barras	90-115	98-145	107-168

Os três índices de sensibilidade encontraram o melhor resultado disponível na literatura, porém, se diferenciam pela quantidade de iterações. Na tabela 2 observa-se que o índice de sensibilidade S_{ij} encontrou as melhores soluções em uma menor quantidade de iterações em relação aos outros índices de sensibilidade. Este índice de sensibilidade proporcionou maior eficiência e qualidade ao algoritmo GRASP aplicado na resolução do problema de RSD.

7 Conclusão

Neste trabalho foi apresentada uma análise de três índices de sensibilidade para a metaheurística GRASP aplicada na resolução do problema de RSD de energia elétrica, tendo como objetivo a diminuição das perdas ativas do sistema. O algoritmo GRASP apresentado sempre encontra soluções factíveis para o problema de RSD de energia elétrica.

Os resultados encontrados para os seis sistemas testes foram comparados com os existentes na literatura de forma a comprovar a eficiência da metodologia proposta. Ressalta-se que os três índices de sensibilidade utilizados na metaheurística GRASP encontraram os melhores resultados disponíveis na literatura, porém diferenciam-se no número de

iterrações. Desta forma, conclui-se que os trs ndices de sensibilidades podem ser utilizados no GRASP proposto, apresentando bons resultados e diferenciando apenas na eficiêcia computacional.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP e o CNPq pelo apoio financeiro de pesquisa.

Referêcias Bibliogrâficas

- Abur, A. "Determining the optimal radial network topology within the line flow constraints". IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Atlanta. p. 673-676, 1996.
- Baran, M. E.; Wu, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. IEEE Transactions on Power Delivery, New York, v. 4, n. 2, p. 1401-1407, 1989.
- Bernal-Agustin, J. L. Application of genetic algorithms to the optimal design of power distribution systems. 1998. 346 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – University of Zaragoza, Zaragoza, 1998.
- Byrd, R. H.; Nocedal, J.; Waltz, R. A. KNITRO: an integrated package for nonlinear optimization. In: DI PILLO, G.; ROMA, M. (Ed.). Large-scale nonlinear optimization. Berlin: Springer. p. 35-59. 2006.
- Cabezas, A. M. G. Novas formulações para o problema de reconfiguraçao de redes de distribuicao de energia elétrica. 2007. 77 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2007.
- Carreño, E. M.; Moreira, N.; Romero, R. "Distribution network reconfiguration using an efficient evolutionary algorithm," IEEE PES General Meeting, pp. 24-28, 2007.
- Chang, H. C.; Kuo, C. C. Network reconfiguration in distribution systems using simulated annealing. Electric Power Systems Research, Lausanne, v. 29, n. 3, p. 227-238, 1994.
- Chiang, H. D.; Jean-Jumeau, R. M. Optimal network reconfigurations in distribution systems: Part 2: Solution algorithms and Numerical Results. IEEE Transactions on Power Delivery, Toronto, v. 5, n. 3, p. 1568-1574, 1990.
- Chiou, J. P.; Chang, C. F.; Su, C. T. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 20, n. 2, p. 668-674, 2005.
- Civanlar, S.; Grainger, J. J.; Lee, S. S. H. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. IEEE Transactions on Power Delivery, New York, v. 3, n. 3, p. 1217-1223, 1988.
- Feo, T. A.; Resende, M. G. C. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem, Operations Research Letters, v. 8, n. 2, p. 67-71, 1989.
- Feo, T. A.; Resende, M. G. C. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. Journal of Global Optimization, v. 6, n. 2, p. 109-133, 1995.
- Fourer, R.; Gay, D. M.; Kernighan, B. W. AMPL: a modeling language for mathematical programming. 2nd ed. Pacific Grove: Brooks/Cole-Thomson Learning, 2003.
- Franco, J. F.; Rider, M. J.; Lavorato, M.; Romero, R. "A mixed-integer LP model for the reconfiguration of radial electric distribution systems considering distributed generation". Electric Power System Research, v. 97, p. 51-60, 2013.
- Guimarães, M. A. N.; Lorenzetti, J. F. C.; Castro, C. A. "Reconfiguration of Distribution System for Voltage Stability margin Enhancement Using Tabu Search," POWERCON 2004, pp. 1556-1561, 2004.
- Lavorato, M.; Rider, M. J.; Garcia, A. V.; Romero, R. "A constructive Heuristic Algorithm for Distribution System Planning," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, pp. 1734-1742, 2010.
- Lavorato, M.; Franco, J. F.; Rider, M. J.; Romero, R. Imposing Radiality Constraints in Distribution System Optimization Problems, IEEE Transaction on Power Systems, New York, v. 27, n. 1, p. 172-180, 2012.
- Merlin, A.; Back, H. "Search for a minimal-loss operating spinning tree configuration in an urban power distribution system," Power System Computation Conference, pp. 1-18, 1975.
- Nara, K.; Shiose, A.; Kitagawa, M.; Ishihara, T. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum reconfiguration. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 7, n. 3, p. 1044 -1051, 1992.
- Oliveira, M. L. Planejamento integrado da expansao de sistemas de distribuicao de energia elétrica. 2010. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Sistemas de Energia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- Oliveira, M. B. C. Reconfiguraçao de alimentadores em sistemas de distribuicao usando a metaheurística GRASP. 2011. 89 f. Dissertaçao (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Ilha Solteira, 2011.
- Salazar, H.; Gallego, R.; Romero, R. Artificial neural networks and clustering techniques applied in the reconfiguration of distribution systems. IEEE Transactions on Power Delivery, New York, v. 21, n. 3, p. 1735-1742, 2006.
- Souza, R. F. F. "Planejamento da expansao de sistemas de distribuicao usando a Metaheurística de busca em vizinhança variável," Dissertaçao, Departamento de Eng. Elétrica, Univ. Estadual Paulista – UNESP, campus Ilha Solteira, 2011.
- Souza, S. S. F. "Algoritmo GRASP especializado aplicado ao problema de reconfiguraçao de alimentadores em sistemas de distribuicao radial," Dissertaçao, Departamento de Eng. Elétrica, Univ. Estadual Paulista – UNESP, campus Ilha Solteira, 2013. Disponível em: http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/337-dissertacao_simonesilva.pdf
- Souza, S. S. F.; Lavorato, M.; Romero, R. "GRASP especializado aplicado ao problema de reconfiguraçao de sistemas de distribuicao," Sixth IEEE/PES transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), 2012, Montevideo, p. 1-6.
- Zhang, D.; Fu, Z.; Zhang, L. An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems. Electric Power Systems Research, Lausanne, v. 77, n. 5-6, p. 685-694, 2007.