

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/341574775>

Grasp with path relinking for transmission network expansion planning (In portuguese)

Conference Paper · September 2002

CITATIONS

0

READS

15

4 authors:



Haroldo de Faria Junior

Universidade Federal do ABC (UFABC)

18 PUBLICATIONS 295 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Silvio Binato

PSR Energy Consulting

47 PUBLICATIONS 2,148 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Mauricio G. C. Resende

Amazon

304 PUBLICATIONS 20,028 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Falcao Djalma

Federal University of Rio de Janeiro

85 PUBLICATIONS 2,074 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Metaheuristics for Transmission Expansion Planning [View project](#)



Photovoltaic Systems: Design, Performance and Applications [View project](#)

GRASP COM PATH-RELINKING PARA PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE REDES DE TRANSMISSÃO

HAROLDO DE FARIA JR.^{*}, SILVIO BINATO[†], MAURICIO G. C. RESENDE[‡], DJALMA M. FALCÃO^{*}

^{*} *COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ*

[†] *CEPEL, Rio de Janeiro, RJ*

[‡] *AT&T, Florham Park, NJ, USA*

Email: faria@vishnu.coep.ufrj.br, silvio@cepel.br, mgcr@research.att.com,
falcao@coep.ufrj.br.

Resumo— Este trabalho mostra os resultados obtidos com a combinação de duas técnicas metaheurísticas, GRASP e Path Relinking, para a solução de problemas de planejamento da expansão de redes de transmissão. A metaheurística híbrida considera uma nova fase, “relinking”, interna ao loop principal da metaheurística GRASP, que constrói caminhos entre “boas” soluções com o intuito de achar outras soluções, potencialmente melhores que as anteriores. Os resultados publicados foram obtidos com dois casos teste reais com sistemas brasileiros.

Abstract— This paper illustrates the results obtained by a combination of two metaheuristic approaches, GRASP and Path Relinking, applied to solve static power transmission network design problems. The proposed hybrid metaheuristic considers a “relinking” phase within the main loop of GRASP, constructing trajectories between two “high-quality” solutions aiming to obtain potentially better solutions than its antecessors. The results presented were obtained from two real-world case studies from Brazilian systems.

Key Words— Power transmission network design problems, metaheuristics, GRASP, Path Relinking

1 Introdução

Este trabalho apresenta os resultados obtidos com a combinação de duas metaheurísticas, GRASP e Path Relinking, aplicadas na solução de problemas de planejamento estático da expansão de longo prazo de sistemas de transmissão de energia elétrica. GRASP foi formalizado em (Feo e Resende, 1995) e consiste de duas fases. A primeira fase constrói, iterativamente, uma solução viável para o problema e a segunda fase explora a vizinhança da solução obtida na primeira fase. Path Relinking (Glover et al., 2000) é uma generalização da metaheurística Scatter Search que combina soluções do espaço de busca no intuito de obter novas soluções, mais especificamente incorporando atributos de uma solução guia em uma solução inicial gerando um caminho entre as duas soluções.

Problemas de planejamento de uma rede de transmissão de potência consistem em se escolher, entre um conjunto pré-definido de circuitos candidatos, aqueles que devem ser construídos de forma a minimizar os custos de investimento e operação e suprir a demanda prevista ao longo de um horizonte de planejamento. Sendo o horizonte de planejamento somente um ano (ou estágio) no futuro, o problema multi-estágio transforma-se em um problema estático, no qual o objetivo é determinar *onde* e que *tipo* de novos equipamentos de transmissão devem ser instalados. Este artigo trata da versão estática do problema de planeja-

mento da expansão de redes de transmissão, que é um problema de otimização combinatória. Logo, achar uma solução ótima é uma tarefa muito difícil. Técnicas combinatórias e métodos heurísticos podem ser usados, entretanto, o uso de técnicas combinatórias está restrito a problemas de pequeno ou médio porte devido a complexidade destes métodos. Por outro lado, métodos heurísticos podem fornecer soluções de alta qualidade, mas não necessariamente ótimas, em um tempo computacional aceitável para problemas de grande porte.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: a seção 2 apresenta a formulação do problema. A seção 3 introduz conceitos de Path Relinking, GRASP e da metaheurística híbrida. A seção 4 ilustra os resultados obtidos pelo método na resolução de dois casos reais de planejamento da expansão de sistemas de transmissão. Finalmente, a seção 5 descreve algumas conclusões deste trabalho.

2 Formulação do Problema

Representando por $\mathcal{N}$ o conjunto de todos os nós da rede, (cardinalidade de $\mathcal{N}$ é escrito como $|\mathcal{N}|$), o conjunto de todos os ramos existentes por $\mathcal{E}$ e o conjunto de todos os ramos candidatos que podem ser adicionados à rede inicial por $\mathcal{C}$, o problema de planejamento estático a longo prazo de redes de transmissão pode ser formulado como:

$$\begin{aligned}
& \text{minimize } z = \sum_{kl \in \mathcal{C}} c_{kl} x_{kl}, \text{ sujeito a:} \quad (1a) \\
& \sum_{l \in \mathcal{E}_k} f_{kl}^0 + \sum_{l \in \mathcal{C}_k} f_{kl}^1 + g_k = d_k, \quad k \in \mathcal{N}, \quad (1b) \\
& f_{kl}^0 - \gamma_{kl}^0 (\theta_k - \theta_l) = 0, \quad kl \in \mathcal{E}, \quad (1c) \\
& f_{kl}^1 - x_{kl} \gamma_{kl}^1 (\theta_k - \theta_l) = 0, \quad kl \in \mathcal{C}, \quad (1d) \\
& |f_{kl}^0| \leq \bar{f}_{kl}^0, \quad kl \in \mathcal{E}, \quad (1e) \\
& |f_{kl}^1| \leq \bar{f}_{kl}^1 x_{kl}, \quad kl \in \mathcal{C}, \quad (1f) \\
& 0 \leq g_k \leq \bar{g}_k, \quad k \in \mathcal{N}, \quad (1g) \\
& x_{kl} \in \{0, 1\}, \quad kl \in \mathcal{C}, \quad (1h)
\end{aligned}$$

onde c_{kl} é o custo de investimento para a construção do ramo candidato kl . $\mathcal{E}_k$ e $\mathcal{C}_k$ representam o conjunto de todos os ramos existentes e candidatos diretamente conectados ao nó k . Índices superscritos ⁰ (¹) referenciam variáveis da rede existente (candidata), respectivamente. Usando esta notação, f_{kl} é o fluxo de potência ativa no ramo kl , g_k é a geração de potência ativa no nó k , γ_{kl} é a susceptância do ramo kl , θ_k é o ângulo da tensão do nó k , $\bar{f}_{kl}$ e $\bar{g}_k$ representam a capacidade do ramo kl e o limite de geração do nó k .

A função objetivo corresponde aos custos de investimento de novos equipamentos de transmissão. Nessa formulação, os custos de operação não são considerados, do contrário o termo $\sum_{k \in \mathcal{N}} c_k^0 g_k$, onde c_k^0 representa o custo unitário de geração na barra k , deve ser introduzido na função objetivo. As restrições (1b) são as equações de fluxo de potência para todos os nós da rede, e as restrições (1c) e (1d) são as equações de fluxo de potência linearizadas para a rede existente e a rede candidata. As demais restrições são os limites operacionais do sistema e condições de integralidade nas variáveis. As Restrições (1h) representam as condições de integralidade nas variáveis de decisão x . Note que se o circuito candidato kl não for construído, i.e. $x_{kl} = 0$, o fluxo correspondente neste circuito é zerado devido à restrição (1f). A equação (1d), que corresponde a lei das malhas, também não deve ser imposta neste ramo. Por outro lado, quando $x_{kl} = 1$, i.e. o ramo candidato kl for construído, a segunda lei de Kirchhoff deve ser aplicada, o fluxo no ramo é limitado por $\bar{f}_{kl}$ e a restrição (1c) deve ser imposta.

O problema (1) é um problema de programação não-linear (0 – 1) misto. Resolvê-lo por métodos de otimização combinatória (e.g. branch-and-bound) é uma tarefa muito difícil. Uma alternativa é empregar estratégias heurísticas, que podem fornecer boas soluções viáveis. Exemplos de métodos heurísticos são métodos construtivos, onde o vetor solução x é construído iterativamente. Seja $\hat{x}$ esta solução parcial, substituindo $\hat{x}$

```

procedure GRASP(MaxIter, Seed)
  1 ReadInput();
  2 for  $k = 1, \dots, \text{MaxIter}$  do
  3    $\hat{x} \leftarrow \text{RandomConstruction}(\text{Seed});$ 
  4    $\hat{x} \leftarrow \text{LocalSearch}(\hat{x});$ 
  5    $\bar{x} \leftarrow \text{UpdateSolution}(\hat{x});$ 
  6 return  $\bar{x}$ 
end GRASP;

```

Figura 1: GRASP, descrição Geral.

em (1), teremos o seguinte problema,

$$\begin{aligned}
& \text{minimize } \hat{z} = \sum_{k \in \mathcal{N}} r_k, \text{ sujeito a:} \quad (2a) \\
& \sum_{l \in \mathcal{E}_k} f_{kl}^0 + \sum_{l \in \mathcal{C}_k} f_{kl}^1 + g_k + r_k = d_k, \quad k \in \mathcal{N}, \quad (2b) \\
& f_{kl}^0 - \gamma_{kl}^0 (\theta_k - \theta_l) = 0, \quad kl \in \mathcal{E}, \quad (2c) \\
& f_{kl}^1 - \hat{x}_{kl} \gamma_{kl}^1 (\theta_k - \theta_l) = 0, \quad kl \in \mathcal{C}, \quad (2d) \\
& |f_{kl}^0| \leq \bar{f}_{kl}^0, \quad kl \in \mathcal{E}, \quad (2e) \\
& |f_{kl}^1| \leq \bar{f}_{kl}^1 \hat{x}_{kl}, \quad kl \in \mathcal{C}, \quad (2f) \\
& 0 \leq g_k \leq \bar{g}_k, \quad k \in \mathcal{N}, \quad (2g) \\
& 0 \leq r_k \leq d_k, \quad k \in \mathcal{N}, \quad (2h)
\end{aligned}$$

onde r_k é a carga não suprida no nó k e $\hat{z}$ é o total de carga não suprida na rede. Então, $\hat{z}$ pode ser usado como uma medida de inviabilidade da rede para o plano de expansão da transmissão proposto ($\hat{x}$). Caso $\hat{z} = 0$ a solução proposta $\hat{x}$ é uma solução viável para o problema (1).

3 GRASP e Path Relinking

GRASP e Path Relinking são duas metaheurísticas que vem sendo empregadas com sucesso na solução de problemas de otimização combinatória clássicos e reais na indústria, no governo, etc. A metaheurística GRASP é um método iterativo temperado com escolha aleatória e busca local em que cada iteração é composta por duas fases: uma fase de construção e uma de busca local. A melhor solução encontrada sobre todas as iterações é a solução final do método. Um pseudocódigo genérico de um GRASP é ilustrado na Figura 1, onde **MaxIter** é o número máximo de iterações e **Seed** é a semente inicial para o gerador de número aleatório. Uma descrição detalhada tanto da fase de construção como da fase de busca local para a metaheurística GRASP aplicada a solução de problemas de planejamento da expansão de redes de transmissão pode ser obtida em (Binato, 2000a; Binato e Oliveira, 2001) e não será descrita neste trabalho.

```

procedure GRASP+PR(MaxIter,Seed,EliteSize)
1  ReadInput();
2  for  $k = 1, \dots, \text{MaxIter}$  do
3     $\hat{x} \leftarrow \text{RandomConstruction}(\text{Seed});$ 
4     $\hat{x} \leftarrow \text{LocalSearch}(\hat{x});$ 
5     $\mathcal{E} \leftarrow \text{UpdateEliteSet}(\hat{x});$ 
6     $\mathcal{E}_i \leftarrow \text{SelectSolution}(\mathcal{E});$ 
7     $\hat{x}^R \leftarrow \text{PathRelinking}(\hat{x}, \mathcal{E}_i, \hat{x});$ 
8     $\hat{x} \leftarrow \text{PathRelinking}(\mathcal{E}_i, \hat{x}, \hat{x}^R);$ 
9     $\bar{x} \leftarrow \text{UpdateSolution}(\hat{x});$ 
10 return  $\bar{x}$ 
end GRASP+PR;

```

Figura 2: GRASP com Path Relinking.

Path Relinking foi originalmente proposto como uma estratégia de intensificação para a explorar trajetórias conectando duas soluções de elite. A idéia da técnica de Path Relinking é incorporar atributos de uma solução guia em uma solução inicial, explorando o espaço de busca entre elas com o objetivo de descobrir novas e melhores soluções. Introduzir argumentos em uma solução caracteriza um movimento na sua vizinhança ou uma iteração do Path Relinking.

No método de Path Relinking, todos os movimentos possíveis a partir de um ponto devem ser analisados e o que apresentar o melhor índice de mérito utilizado é escolhido.

3.1 Metaheurística Híbrida – GRASP+PR

Para combinar GRASP e Path Relinking é necessário construir um conjunto de elite $\mathcal{E}$ com as $|\mathcal{E}|$ melhores soluções obtidas nas iterações anteriores à iteração atual. As soluções geradoras do Path Relinking são uma solução do conjunto $\mathcal{E}$, que poderia ser escolhida aleatoriamente, e a solução de uma iteração k , após a fase de busca local. Assim, definimos uma nova fase - Path Relinking - que deve ser considerada no loop principal da metaheurística GRASP, como ilustrado na Figura 2. Na linha 7 a solução do GRASP é “linkada” com uma solução de elite e vice-versa na linha 8. Ainda, o método GRASP+PR precisa de dois novos procedimentos: um para a inserção de novas soluções no conjunto de elite, linha 5, e outro para selecionar uma solução de elite do conjunto, linha 6.

Para se tornar uma solução de elite, a solução $\hat{x}$ deve ser melhor que o melhor elemento $\mathcal{E}$, ou melhor que o pior elemento $\mathcal{E}$ e suficientemente diferente de todas as outras soluções (o quão diferente é um parâmetro fornecido pelo usuário).

A primeira rotina que deve ser feita quando da implementação de um procedimento de Path Relinking é uma que constrói uma estrutura de

```

procedure PathRelinking( $\hat{x}^S, \hat{x}^T, \hat{x}^R$ )
1   $z_{min} = \min(\text{cst}(\hat{x}^S), \text{cst}(\hat{x}^T), \text{cst}(\hat{x}^R)),$ 
    $\hat{x}^{min} = \hat{x}^R;$ 
2   $\hat{x} = \hat{x}^S;$ 
3   $(\Delta^a, \Delta^r) \leftarrow \text{Diff}(\hat{x}^S, \hat{x}^T);$ 
4  while  $|\Delta^a \cup \Delta^r| \geq 2$  do
5    if  $\Delta^r = \emptyset$  return  $\hat{x}^{min};$ 
6     $kl = \arg \max_{ij \in \Delta^r} \{c_{ij}\};$ 
7     $\hat{x}_{kl} = 0, \Delta^r = \Delta^r \setminus kl;$ 
8    Solve program (2);
9    while  $\hat{z} > 0$  and  $\Delta^a \neq \emptyset$  do
10      $kl = \arg \max_{ij \in \Delta^a} \{h_{ij}\};$ 
11      $\hat{x}_{kl} = 1, \Delta^a = \Delta^a \setminus kl;$ 
12     Solve program (2);
13     if  $\hat{z} = 0$  and  $\text{cst}(\hat{x}) < z_{min}$ 
14        $z_{min} = \text{cst}(\hat{x}); x_{min} = \hat{x};$ 
15 return  $\hat{x}^{min};$ 
end PathRelinking;

```

Figura 3: Pseudo-Código do Path Relinking.

todos os movimentos possíveis que, quando aplicados à solução inicial, conduzirão à solução guia. Essa função (Diff), linha 3 da Figura 3, compara as soluções $\hat{x}^S$ e $\hat{x}^T$ e retorna dois vetores Δ^a (e Δ^r) contendo os índices de todos os ramos candidatos que devem ser adicionados (ou excluídos) de $\hat{x}^S$ para se alcançar a solução $\hat{x}^T$.

O segundo aspecto importante de qualquer implementação de Path Relinking é a seleção do movimento, que é feito, no nosso caso, nas linhas 6 e 10. No primeiro caso, um ramo candidato pertencente ao conjunto de ramos que devem ser removidos da solução inicial $\hat{x}^S$, Δ^r , é selecionado para ser removido. O índice usado para ordenar esses movimentos é o custo de investimento, de forma que a remoção do ramo candidato mais oneroso em Δ^r é o movimento feito na linha 7. Após a remoção do ramo candidato, a viabilidade da rede resultante deve ser verificada (linha 8) e, se a rede permanecer viável, i.e. $\hat{z} = 0$, a solução corrente $\hat{x}$ é candidata a ser o resultado do procedimento de PathRelinking, linhas 13 e 14.

Se a rede resultante for inviável, i.e. $\hat{z} > 0$, novos ramos candidatos devem ser adicionados a solução $\hat{x}$. De forma a selecionar qual movimento de adição deve ser realizado, linha 10, usamos um índice baseado na sensibilidade do problema (2) em relação a susceptância dos ramos candidatos, i.e. $\frac{\partial \hat{z}}{\partial \gamma_{kl}}$, a qual pode ser estimada por (EPRI, 1988), $(\pi_l^d - \pi_k^d)(\theta_k - \theta_l)$, onde π_k^d é o multiplicador de Lagrange da restrição (2b) no problema (2). Para levar em consideração o custo de investimento, definimos o índice de mérito h_{kl} utilizando a sensibilidade $\frac{\partial \hat{z}}{\partial \gamma_{kl}}$ dividida pelo custo de investimento de cada ramo candidato, ou seja:

$$h_{kl} = -\frac{\pi_{kl}^{\hat{x}}}{c_{kl}}, \forall kl \in \mathcal{C}. \quad (3)$$

Logo, a escolha do movimento de adição no procedimento de PathRelinking consiste na seleção e adição do circuito candidato em Δ^a com o maior valor de h_{kl} , como indicado nas linhas 10 e 11 da Figura 3. Depois do procedimento de adição, a viabilidade da rede resultante deve ser verificada (linha 12). Se a rede permanecer inviável, $\hat{z} > 0$, um novo movimento de adição deve ser realizado, caso contrário, $\hat{z} = 0$ (rede viável), a nova solução $\hat{x}$ é candidata a ser a solução do procedimento de PathRelinking, linhas 13 e 14.

4 Resultados Computacionais

Os resultados mostrados nesta seção foram obtidos em um PC-Pentium III de 500MHz com 192Mbytes de memória.

O primeiro estudo de planejamento da expansão de sistemas apresentado trata-se do sistema reduzido da região Sul. Este caso já foi analisado em várias publicações, incluindo (Binato et al., 2001; Binato e Oliveira, 2001; Romero e Monticelli, 1994). O segundo estudo analisa o sistema reduzido da região Sudeste, também já estudado em (Binato e Oliveira, 2001; Binato e Romero, 1999). Os dados da rede elétrica, candidatos e dados econômicos para ambos os estudos podem ser obtidos em (Binato, 2000a).

Para avaliar o potencial desta proposta, duas instâncias de códigos foram analisadas: GRASP tradicional e o GRASP com Path Relinking. Cada caso foi processado 10 vezes, utilizando duas funções de distribuição de probabilidade (linear e randômica) e cinco sementes aleatórias iniciais diferentes. O número total de iterações do GRASP foi fixado em 500 e o tamanho do conjunto de elite em 20 elementos. A estrutura da vizinhança na fase de busca local foi de trocas 1 por 1. Detalhes adicionais dos parâmetros GRASP, como o procedimento reativo utilizado para ajustar o parâmetro α podem ser vistos na referência (Binato e Oliveira, 2001).

O sistema reduzido da Região Sul tem 46 nós (os nós 28 e 31 são novas unidades de geração que devem ser conectadas à rede), 62 ramos existentes e 17 novas faixas de passagem. O número de circuitos candidatos é 237 ($3 \times (62 + 17)$). A Figura 4 ilustra a topologia desse sistema de potência e mostra os circuitos existentes (linhas sólidas).

A melhor solução para este caso foi inicialmente publicada em (Romero e Monticelli, 1994) e posteriormente provada ser a solução ótima em (Binato, 2000a). O custo total de investimento da solução ótima é de US\$154.26 milhões, que cor-

Tabela 1: Custo de investimento obtido para o sistema reduzido da região sul brasileira.

GRASP	Caso	linear		randômica	
		#it	10 ⁶ US\$	#it	10 ⁶ US\$
	1	32	154	185	154
	2	40	154	35	154
	3	380	154	55	161
	4	431	154	38	161
	5	11	154	47	161

GRASP+PR	Caso	linear		randômica	
		#it	10 ⁶ US\$	#it	10 ⁶ US\$
	1	32	154	185	154
	2	40	154	34	154
	3	380	154	290	154
	4	431	154	412	157
	5	11	154	47	161

responde à adição de 16 novos ramos, ilustrados na Figura 4 (linhas pontilhadas).

A Tabela 1 ilustra os resultados obtidos pelas duas heurísticas para cada uma das 5 sementes utilizadas e das duas funções de distribuição. Analisando os resultados, verificamos que, neste caso, a utilização da fase de Path Relinking foi ineficaz quando utilizada em conjunto com a função de distribuição linear. No caso da função randômica, a fase de Path Relinking melhorou os resultados obtidos, ou encontrando melhores soluções (casos 3 e 4) ou melhorando a convergência (caso 2).

O tempo médio de CPU requerido para o processamento de todos os casos do GRASP foi de 8.5min quando da utilização da função de distribuição linear, e 11.5min quando uma função randômica foi utilizada. O uso do GRASP+PR ocasiona um acréscimo no tempo médio de processamento, para 10,7min no primeiro caso e em torno de 14min no segundo.

O sistema reduzido da Região Sudeste tem 79 nós e 155 ramos. A Figura 5 ilustra a rede elétrica, mostrando os circuitos existentes (linhas sólidas), centros de consumo (círculos). Este problema é de resolução mais difícil do que o anterior, não só devido ao maior número de circuitos candidatos, mas também devido à necessidade de se selecionar circuitos operando em cinco níveis de tensão diferentes, (750kV, 500kV, 440kV, 330kV e 230kV).

Os custos de investimento obtidos em todas as simulações são mostrados na Tabela 2. A melhor solução obtida neste trabalho tem custo de investimento de US\$425 milhões e consiste da adição de 24 novos ramos, veja Figura 5. A melhor solução conhecida para este caso tem custo de investimento de US\$422 milhões (Binato e Oliveira, 2001; Bahiense et al., 2001), mas ao con-

Tabela 2: Custo de investimento obtido para o sistema reduzido da região sudeste brasileira.

GRASP	Caso	linear		randômica	
		#it	10 ⁶ US\$	#it	10 ⁶ US\$
	1	83	431	221	459
	2	36	452	33	462
	3	471	425	139	444
	4	451	425	45	448
	5	154	431	395	458

GRASP+PR	Caso	linear		randômica	
		#it	10 ⁶ US\$	#it	10 ⁶ US\$
	1	472	425	391	444
	2	427	444	33	462
	3	471	425	139	444
	4	451	425	304	431
	5	154	431	178	455

trário da solução apresentada neste paper, permite uma sobrecarga de até 10% de alguns ramos da rede elétrica.

Note que neste caso a utilização da fase de Path Relinking foi eficaz para as duas funções de distribuição utilizadas. No caso da função linear, resultados melhores foram obtidos nos casos 1 e 2, enquanto que para a função randômica, nos casos 1, 4 e 5. Com relação ao tempo de CPU, foram necessários cerca de 32min em média para processar todos os 5 casos de GRASP com função de distribuição linear e 42min com função de distribuição randômica. Quando o GRASP+PR é utilizado, o tempo médio de CPU aumenta para cerca de 33min e 45min, respectivamente. Este incremento do tempo de processamento deve-ser a fase de Path Relinking.

5 Conclusões

Neste trabalho, apresentamos os resultados obtidos com a aplicação de uma metaheurística híbrida, que combina GRASP com Path Relinking, para solução de duas instâncias de problemas reais de planejamento da expansão de sistemas de transmissão. A metaheurística híbrida consiste da introdução, no loop principal de GRASP, de uma fase adicional para combinar a solução de cada iteração com uma solução escolhida aleatoriamente de um conjunto elite de soluções.

Os resultados demonstraram melhorias tanto na convergência como também na capacidade da metaheurística híbrida em encontrar novas, e melhores, soluções. Estas comparações tiveram como base uma heurística construída com base em GRASP tradicional. Também constatou-se um modesto aumento do tempo do tempo de processamento, devido a avaliação da viabilidade

das soluções geradas na fase de Path Relinking. Melhorias no tempo de processamento podem ser obtidas com a utilização de técnicas que permitam descartar soluções sabidamente inviáveis, sem haver a necessidade de resolução do problema (2).

Referências

- Bahiense, L., Oliveira, G. C., Pereira, M. V. F. e Granville, S. (2001). A mixed integer disjunctive model for transmission network expansion, *Power Systems, IEEE Transactions on* **16**(3): 560–565.
- Binato, S. (2000a). *Expansão ótima de sistemas de transmissão através de decomposição de Benders e Técnicas de Planos Cortantes*, Tese de doutorado, COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Binato, S. e Oliveira, G. C. (2001). A reactive GRASP for transmission network expansion planning, in C. Ribeiro e P. Hansen (eds), *Essays and surveys on metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, pp. 81–100.
- Binato, S., Pereira, M. V. F. e Granville, S. (2001). A new Benders decomposition approach to solve power transmission network design problems, *Power Systems, IEEE Transactions on* **16**(2): 235–240.
- Binato, S. e Romero, S. P. (1999). Genetic Algorithms with Genetic Engineering, *Proceedings of the Third Metaheuristic International Conference*, pp. 63–68.
- EPRI (1988). Mathematical decomposition techniques for power system expansion planning – Analysis of the linearized power flow model using the Benders decomposition technique, *Technical Report RP 2473-6*, EPRI.
- Feo, T. A. e Resende, M. G. C. (1995). Greedy randomized adaptive search procedures, *Journal of Global Optimization* **6**: 109–133.
- Glover, F., Laguna, M. e Martí, R. (2000). Fundamentals of scatter search and path relinking, *Control and Cybernetics* **39**(3): 653–684.
- Romero, R. e Monticelli, A. (1994). A hierarchical decomposition approach for transmission expansion planning, *Power Systems, IEEE Transactions on* **9**(1): 373–380.

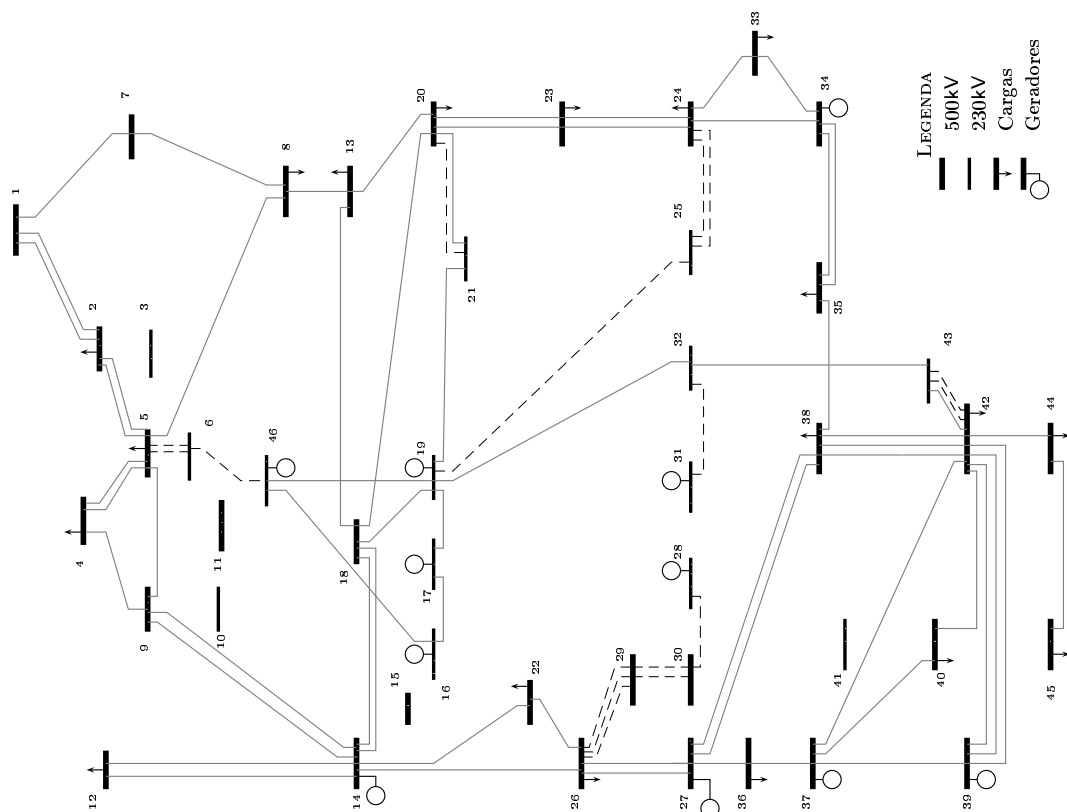


Figura 4: Sistema reduzido da região sul brasileira.

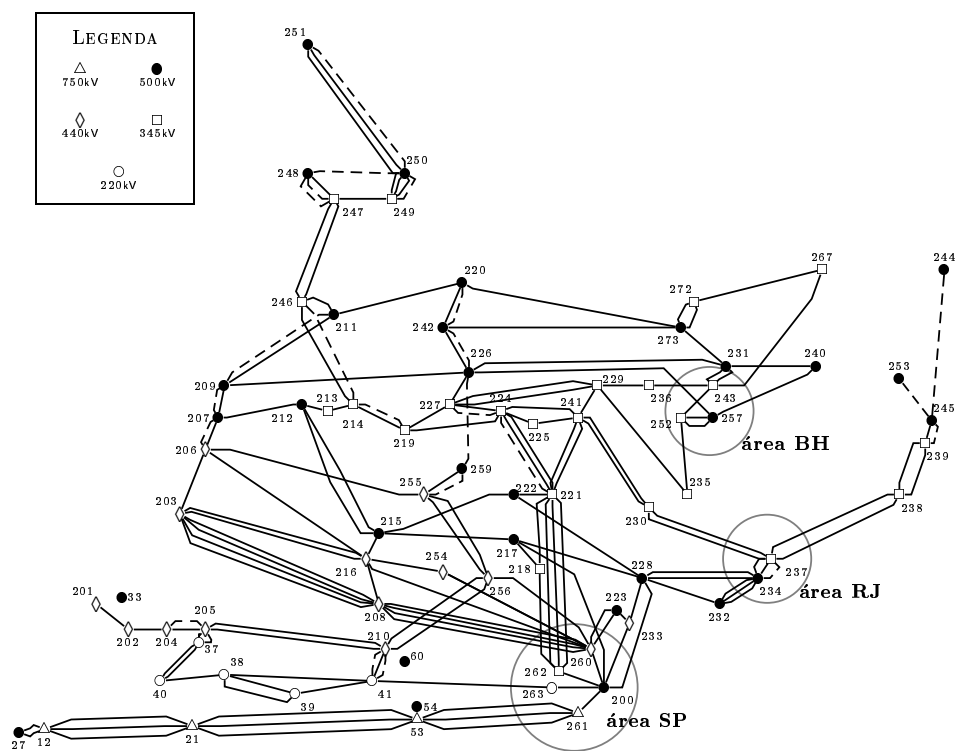


Figura 5: Sistema reduzido da região sudeste brasileira.