



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

ESCOLA DE INFORMÁTICA APLICADA

Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão: Um Estudo de Métodos

Paulo Fernando de Matos Araujo

**Orientadora**

Adriana Cesário de Faria Alvim

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

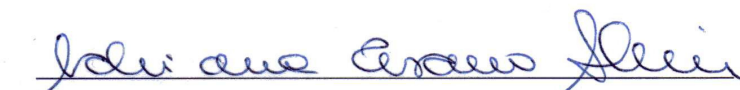
JANEIRO DE 2014

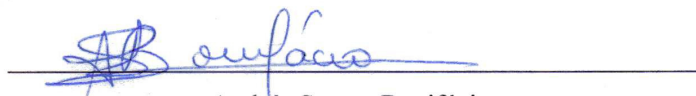
Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão: Um Estudo de métodos

Paulo Fernando de Matos Araujo

Projeto de Graduação apresentado à Escola de  
Informática Aplicada da Universidade Federal do  
Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO) para obtenção do  
título de Bacharel em Sistemas de Informação.

Aprovado por:

  
Adriana Cesário de Faria Alvim

  
Andréa Soares Bonifácio

  
Vânia Maria Félix Dias

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL.

JANEIRO DE 2014

## RESUMO

A função de um sistema de transmissão de energia elétrica é levar a energia para os centros de consumo, normalmente muito longe dos geradores pela grande utilização de usinas hidrelétricas no caso do Brasil. Um sistema de transmissão pode ser representado como um grafo, onde os vértices, chamados de barras, representam subestações do sistema e as arestas são os circuitos do sistema, linhas de transmissão e transformadores, por onde a energia é transmitida. O planejamento da expansão da transmissão de um sistema deve ser realizado para garantir que o sistema no futuro continue desempenhando sua função atendendo os valores de geração e demanda ao mesmo tempo em que minimiza os custos de investimento. Para realizar planejamentos de longo prazo, onde muitos dos dados não são conhecidos com certeza, o sistema pode ser modelado como um problema linear por equações simplificadas. O problema de planejamento da expansão da transmissão (PET) é um problema complexo e diferentes métodos de resolução estão presentes na literatura. Este trabalho estuda o uso da metaheurística GRASP, baseada em trabalhos disponíveis na literatura, como método de resolução para PET, como alternativa a um método de resolução exato apresentado em trabalhos anteriores que apresentou um tempo de execução considerado longo.

Os resultados obtidos com a versão proposta para o GRASP não alcançou bons resultados quando comparados aos resultados obtidos pelo método exato. Quando comparando com as diferentes versões do GRASP disponíveis na literatura, uma das vizinhanças utilizada na busca local pelo GRASP proposto apresentou melhores resultados. A nova implementação do método exato, realizada para efeito de experimentos computacionais, obteve melhores resultados do que a versão original.

**Palavras-chave:** GRASP, otimização, Problema Linear, Planejamento da Expansão da Transmissão.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Revisão bibliográfica . . . . .	2
1.2 Objetivo . . . . .	6
<b>2 O Planejamento da Expansão da Transmissão</b>	<b>7</b>
2.1 Modelagem . . . . .	7
2.2 Modelo DC . . . . .	9
2.3 Modelo DC com perdas . . . . .	10
2.4 Modelo DC com confiabilidade . . . . .	12
<b>3 GRASP para o PET</b>	<b>14</b>
3.1 Algoritmo GRASP_PET . . . . .	14
3.1.1 Inicialização . . . . .	14
3.1.2 Fase construtiva . . . . .	14
3.1.3 Fase da busca local . . . . .	15
<b>4 Experimentos Computacionais</b>	<b>16</b>
4.1 Instâncias testes . . . . .	16
4.1.1 Sistema Garver . . . . .	16
4.1.2 Sistema IEEE 24 Barras . . . . .	16
4.1.3 Sistema Sul do Brasil . . . . .	17
4.2 Ambiente computacional . . . . .	18
4.3 Método PLIC para o PET . . . . .	18
4.4 Estudo Computacional . . . . .	21
4.4.1 Configurações . . . . .	21

4.5	Estudo experimental do método GRASP_PET . . . . .	23
4.5.1	Sistema Garver . . . . .	23
4.5.2	Sistema IEEE 24 Barras . . . . .	28
4.5.3	Sistema Sul . . . . .	33
4.5.4	Análise dos resultados . . . . .	37
4.6	Estudo comparativo entre os métodos PLIC e GRASP_PET . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>40</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>42</b>
<b>A</b>	<b>Dados de sistemas</b>	<b>45</b>
A.1	Garver . . . . .	45
A.2	IEEE 24 barras . . . . .	47
A.3	Sul do Brasil . . . . .	51

# Lista de Figuras

4.1	Sistema de Garver inicial. . . . .	17
4.2	Sistema IEEE 24 barras inicial. . . . .	18
4.3	Sistema reduzido da região sul do Brasil . . . . .	19

# Lista de Tabelas

4.1	Planejamentos para Garver - PET . . . . .	20
4.2	Planejamentos para IEEE - PET . . . . .	20
4.3	Planejamentos para Sul - PET . . . . .	20
4.4	Planejamentos para Garver - PET ordenado pelo custo - Custo PLIC = 110, Tempo PLIC = 0,04s . . . . .	23
4.5	Planejamentos para Garver - PETp ordenado pelo custo - Custo PLIC = 130, Tempo PLIC = 0,07s . . . . .	24
4.6	Planejamentos para Garver - PETpf ordenado pelo custo - Custo PLIC = 190, Tempo PLIC = 1,28s . . . . .	25
4.7	Planejamentos para Garver - PET ordenado por $\Pi$ - Custo PLIC = 110, Tempo PLIC = 0,04s . . . . .	25
4.8	Planejamentos para Garver - PETp ordenado por $\Pi$ - Custo PLIC = 130, Tempo PLIC = 0,07s . . . . .	26
4.9	Planejamentos para Garver - PETpf ordenado por $\Pi$ - Custo PLIC = 190, Tempo PLIC = 1,28s . . . . .	27
4.10	Planejamentos para Garver - PET's sem ordenação . . . . .	27
4.11	Planejamentos para IEEE - PET ordenado pelo custo - Custo PLIC = 152, Tempo PLIC = 0,10s . . . . .	29
4.12	Planejamentos para IEEE - PETp ordenado pelo custo - Custo PLIC = 218, Tempo PLIC = 0,26s . . . . .	29
4.13	Planejamentos para IEEE - PETpf ordenado pelo custo - Custo PLIC = 543, Tempo PLIC = 1550,5s . . . . .	30
4.14	Planejamentos para IEEE - PET ordenado por $\Pi$ - Custo PLIC = 152, Tempo PLIC = 0,10s . . . . .	31
4.15	Planejamentos para IEEE - PETp ordenado por $\Pi$ - Custo PLIC = 218, Tempo PLIC = 0,26s . . . . .	31
4.16	Planejamentos para IEEE - PETpf ordenado por $\Pi$ - Custo PLIC = 543, Tempo PLIC = 1550,5s . . . . .	32
4.17	Planejamentos para IEEE - PET's sem ordenação . . . . .	32

4.18	Planejamentos para Sul - PET ordenado pelo custo - Custo PLIC = 72,87, Tempo PLIC = 0,15s . . . . .	34
4.19	Planejamentos para Sul - PETp ordenado pelo custo - Custo PLIC = 95,79, Tempo PLIC = 0,57s . . . . .	34
4.20	Planejamentos para Sul - PET ordenado por II - Custo PLIC = 72,87, Tempo PLIC = 0,15s . . . . .	35
4.21	Planejamentos para Sul - PETp ordenado por II - Custo PLIC = 95,79, Tempo PLIC = 0,57s . . . . .	35
4.22	Planejamentos para Sul - PET's sem ordenação . . . . .	36
4.23	Planejamentos para Garver - Comparação . . . . .	38
4.24	Planejamentos para IEEE - Comparação . . . . .	38
4.25	Planejamentos para Sul - Comparação . . . . .	38
A.1	Dados das barras do sistema de Garver . . . . .	45
A.2	Dados dos circuitos existentes do sistema de Garver . . . . .	45
A.3	Dados dos circuitos candidatos do sistema de Garver . . . . .	46



# Lista de Símbolos

$B$	Conjunto de barras existentes e possíveis no sistema, p. 8
$\Delta\delta$	Variação angular máxima para cada bloco, p. 11
$\Omega^1$	Conjunto dos circuitos candidatos do sistema, p. 8
$\bar{\Omega}$	Conjunto dos circuitos existentes na solução, p. 9
$\bar{\Omega}_k$	Conjunto de circuitos da solução entre a barra $k$ e outras barras, p. 9
$\bar{g}_k$	Limite de geração na barra $k$ , p. 9
$\bar{p}_{km}$	Limite de capacidade do circuito entre as barras $k$ e $m$ , p. 9
$\delta_{km}^+$	Variação angular positiva entre as barras $k$ e $m$ , p. 11
$\delta_{km}^-$	Módulo da variação angular negativa entre as barras $k$ e $m$ , p. 11
$\delta_{km}(l)$	Variação angular entre as barras $k$ e $m$ no bloco $l$ -ésimo, p. 11
$\eta_{km}$	Condutância do circuito entre as barras $k$ e $m$ , p. 11
$\gamma_{km}$	Susceptância do circuito entre as barras $k$ e $m$ , p. 9
$\theta_k$	Ângulo da barra $k$ , p. 9
$c_{km}$	Custo de investimento do circuito entre as barras $k$ e $m$ , p. 7
$d_k$	Demanda de potência ativa na barra $k$ , p. 9
$f_{km}$	Fluxo de potência ativa sem perdas no circuito entre as barras $k$ e $m$ , p. 9
$g_k$	Geração de potência ativa na barra $k$ , p. 9
$q_{km}$	Perda de potência ativa no circuito entre as barras $k$ e $m$ , p. 11

$r_k$	Energia que falta para atender a demanda na barra $k$ , p. 8
$x_{km}$	Variável binária que indica a existência ou não do circuito entre as barras $k$ e $m$ no plano, p. 7

# Lista de Abreviaturas

AG	Algoritmos Genéticos, p. 3
DC	Direct Current, Corrente Contínua, p. 1
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure, p. 3
LOLC	Custo de Perda de Carga (em inglês), p. 3
PET	Planejamento da Expansão da Transmissão, p. 1

# Capítulo 1

## Introdução

A função de um sistema de transmissão é levar a energia gerada para os centros de consumo. Uma das características destes sistemas é que as unidades geradoras ficam longe dos centros de consumo, resultando em sistemas com grandes dimensões.

O planejamento da expansão dos sistemas de potência é realizado para que o sistema garanta o cumprimento de sua função de modo confiável ao longo dos anos. Por ser um planejamento complexo, ele é normalmente dividido em planejamentos de porte menor, tais como planejamento da geração, da transmissão e da distribuição.

Este trabalho aborda o problema do Planejamento da Expansão da Transmissão, chamado de PET, daqui em diante. O problema do PET toma como base a rede elétrica atual e deve determinar a nova topologia do sistema de transmissão de energia, atendendo valores de geração e demanda, e minimizando os custos de investimento.

As obras de expansão de um sistema elétrico podem levar alguns anos para serem concluídas e requerem investimentos pesados; assim, os estudos que decidem o plano a ser executado devem ser feitos com antecedência e com cuidado. Dependendo do horizonte do planejamento, os modelos usados podem ser mais ou menos detalhados, assim como os dados do sistema futuro ainda podem ser mais ou menos incertos.

Para horizontes de planejamento maiores, como os considerados neste trabalho, a simplificação do fluxo de potência linearizado, com fluxo DC (corrente contínua em inglês), é a opção mais usual, possibilitando que o PET seja modelado como um problema linear.

Para sistemas com predominância hidráulica como o do Brasil, a quantidade de energia hídrica é fundamental e os centros de geração geralmente estão, naturalmente, muito afastados dos centros de consumo. Com isto, se faz necessário considerar linhas extensas, que envolvem investimentos muito elevados. Além disso, devido ao regime pluvial, a rede deve ser suficientemente versátil em relação aos diferentes fluxos de potência, decorrentes de diferentes condições hidrológicas. Outro fator importante é a taxa de crescimento da demanda ao longo dos anos, especial-

mente para países com taxas de crescimento de população importantes, que precisam de grandes investimentos e de uma carteira condizente de equipamentos candidatos.

A expansão da transmissão como problema de otimização inclui restrições tanto físicas quanto operacionais e orçamentárias. Para o longo prazo, as restrições operacionais e de investimento são em geral lineares (afins) e variam dinamicamente ao longo do horizonte de planejamento. Em contrapartida, as restrições específicas da transmissão são estáticas e não convexas, geralmente bilineares.

## 1.1 Revisão bibliográfica

Este projeto de graduação tem como objetivo procurar uma alternativa para o método de resolução para o PET utilizada em ARAUJO (2012). Como é mostrado em LATORRE *et al.* (2003), devido à alta complexidade e dificuldade do problema de planejamento da expansão da transmissão, várias simplificações e modelos aproximados têm sido considerados a partir do modelo inicial proposto por GARVER (1970).

O trabalho de ARAUJO (2012) é uma expansão do trabalho realizado em MOULIN *et al.* (2010), onde o PET é modelado como um problema linear com variáveis inteiras e contínuas e resolvido pelo pacote Cplex de otimização. É chamada de reconfiguração a possibilidade de fazer o planejamento da expansão considerando a remoção de circuitos que existem no sistema antes da realização do plano. O uso da reconfiguração, utilizada no planejamento de operação de sistemas, em planejamentos de expansão foi introduzido em MOULIN *et al.* (2010).

O trabalho ASAKURA *et al.* (2003) utiliza Expert System (Sistema especialista) e a Reactive Tabu Search (Busta Tabu Reativa) para resolver o problema de expansão do sistema de distribuição de baixa tensão, realizado em etapas anuais.

Em DE OLIVEIRA *et al.* (2005), os autores apresentam uma heurística baseada em duas estratégias: (i) representar as variáveis inteiras com variáveis contínuas usando uma função de convolução, e (ii) modificar as equações de fluxo DC para permitir a representação de perdas no sistema. O algoritmo possui duas etapas iterativas. Na primeira etapa é determinado o Fluxo de Potência Ótimo (FPO) usando a função de convolução para indicar qual linha deveria ser adicionada. A cada iteração, apenas um circuito é adicionado e as iterações continuam até que a energia não suprida, chamada também de corte de energia ou simplesmente corte, (calculada pelo problema de FPO) fique menor que uma tolerância dada. Após chegar a um corte menor que a tolerância, a segunda etapa verifica quais linhas adicionadas poderiam ser removidas, começando pelas linhas mais caras, mas mantendo o critério da energia não suprida. Por se tratar de um método heurístico, os resultados encontrados para os casos sem perda não foram mais econômicos do que os de

MOULIN *et al.* (2010). Mais precisamente, o resultado encontrado para Garver é o mesmo, enquanto que o plano de uma rede equivalente ao sistema sudeste do Brasil teve um plano mais econômico em MOULIN *et al.* (2010). Além do mais, embora tenha mencionado a importância do tempo que torna alguns métodos inviáveis, este trabalho não informa sobre o tempo de resolução dos casos analisados.

Em ALGUACIL *et al.* (2003) e DE LA TORRE *et al.* (2008), as perdas no sistema também estão presentes no modelo de expansão de sistemas de transmissão. Como no presente trabalho, o modelo também é com fluxo DC e a inclusão das perdas é apresentada no primeiro artigo. O segundo trabalho, que resolve o problema com Cplex no GAMS (General Algebraic Modeling System), realiza uma expansão da transmissão em um mercado de energia liberalizado, assunto que ainda não possui grande impacto em nosso país.

Entre outros é possível citar os seguintes trabalhos baseados na metaheurística Algoritmos Genéticos (AG). Em KAZEMI *et al.* (2008) é aplicado um AG para definir quais linhas seriam adicionadas, avaliando a população mediante a soma de custos (de construção das linhas, de expansão de subestações e das perdas). Em JALILZADEH *et al.* (2008), os mesmos autores usam o mesmo modelo (com variações nos cromossomos) e a solução ainda é feita com AG. Finalmente, o modelo de JALILZADEH *et al.* (2010) representa cenários diferentes para a demanda, cada um deles com uma probabilidade dada. A heurística de resolução é uma variante do AG, chamada de Improved Discrete Particle Swarm Optimization. Apesar de usar o mesmo sistema para o caso de teste do segundo artigo, o resultado ficou completamente diferente, devido à consideração de cenários diferentes de demanda. Uma contribuição importante destes artigos é o fato de evidenciarem o impacto da consideração das perdas no sistema escolhido e no seu custo ao longo dos anos.

O trabalho DA SILVA *et al.* (2006) menciona diferentes métodos heurísticos para resolução do problema de planejamento da expansão da transmissão, como Busca Tabu, Simulated Annealing (Arrefecimento simulado), Algoritmos Genéticos e GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure). O método empregado no artigo combina estratégias evolutivas, semelhantes aos AGs, com GRASP para obter metade da população inicial, enquanto a outra metade é gerada aleatoriamente. A função de avaliação é dada pela soma dos custos de construção de linhas mais os custos de cortes de carga (interrupção no fornecimento de energia), caso o sistema não tenha capacidade para suprir a demanda. O artigo ainda se preocupa com a confiabilidade do sistema, mas ele apenas realiza um cálculo para obter o LOLC (Custo de Perda de Carga) que é adicionado ao custo do plano. Para tentar reduzir o custo total do plano e escolher qual seria o menor ao se considerar o LOLC, o artigo exhibe os 5 planos de menor custo de investimento (ao somar os custos correspondentes de LOLC, pode ser que um plano diferente do plano com menor

custo de investimento seja o mais econômico no total).

Em DA SILVA *et al.* (2008), o método de resolução aplicado é Busca Tabu, e o modelo passou a considerar perdas nos circuitos. Com a mudança no modelo, a comparação com o trabalho anterior não ficou muito clara. Outra característica dos trabalhos desses autores é que eles efetuam um planejamento dinâmico. Com efeito, estes trabalhos consideram a expansão ao longo de vários anos. No primeiro artigo, a partir do último ano do planejamento, o planejamento regredia ano a ano considerando apenas as opções aplicadas anteriormente (por exemplo, em uma expansão de 10 anos, as opções disponíveis para o último ano são todos os candidatos, já para o nono ano, apenas o que foi usado no décimo seria válido). Já o segundo artigo apresenta a possibilidade de considerar ordens temporais diferentes, ao escolher um ano dentro do período como ponto de partida e depois fazer a regressão partindo do último ano, sendo que o plano do ano de partida deveria ser considerado como feito para os planejamentos de anos posteriores.

Outros artigos interessantes são HONG e LUO (2009) e HONG e PEN (2010), que fazem estudos sobre como modelar sistemas de distribuição que possuem geradores eólicos para lidar com a característica imprevisível dos ventos. No trabalho de KONGMANY *et al.* (2008), os autores apresentam uma análise de confiabilidade do plano feito para dois sistemas em Laos, que utiliza conhecidos índices de confiabilidade como o índice de energia não suprida para a avaliação dos benefícios esperados pela expansão.

Assim como MOULIN *et al.* (2010), o trabalho KHODAEI *et al.* (2010), publicado um mês após, também aplica a prática da reconfiguração. Esta é uma prática usada no planejamento de operação que ainda não tinha sido estudada para o planejamento da expansão da transmissão até o ano destas publicações. O modelo de KHODAEI *et al.* (2010) divide o problema em um problema mestre, para encontrar o melhor investimento, e dois subproblemas. O primeiro subproblema verifica se o sistema escolhido pelo mestre seria capaz de operar sem e com contingências, e o segundo subproblema minimiza os custos da operação. Ambos os subproblemas geram cortes de Benders para o problema mestre. Nos exemplos mostrados em KHODAEI *et al.* (2010) no entanto, quase não são feitos casos com contingências e a reconfiguração é, geralmente, restrita a poucos trechos.

O trabalho BINATO *et al.* (2001) apresenta uma heurística GRASP para o modelo DC. A heurística é semelhante a de DE OLIVEIRA *et al.* (2005), onde o sistema é construído adicionando linhas para que não existam mais cortes no sistema, e posteriormente é feita uma remoção gradativa das linhas. As linhas escolhidas para entrar são selecionadas aleatoriamente dentro de uma lista de candidatos, composta por circuitos identificados como promissores por uma função de avaliação. A remoção também é feita ordenando as linhas adicionadas pelo custo em ordem de-

crescente. Além deste ponto, uma busca local é aplicada permitindo que a heurística encontre soluções com tempos computacionais espantosamente curtos para a maioria dos sistemas. Por exemplo, a heurística encontra as melhores soluções para Garver e para o sistema correspondente da região sul do Brasil, na maioria das vezes, com tempos inferiores a 7 segundos. Para o sistema correspondente da região sudeste do Brasil, o maior tempo registrado foi de 10 minutos e as soluções foram consideradas muito boas por serem normalmente melhores que a melhor solução obtida na literatura até o momento. Porém todos os valores encontrados são superiores aos valores encontrados em MOULIN *et al.* (2010) (sem e com reconfiguração).

Em BAHIENSE *et al.* (2001), o problema é resolvido aplicando técnicas exatas, baseadas em programação linear inteira, com modelagem em Mosel e solução no XPRESS-MP, em conjunto com o GRASP visto em BINATO *et al.* (2001) para definir um limite superior para o custo de investimento e reduzir as possibilidades de solução. Este trabalho permitiu firmar a otimalidade de soluções até então encontradas apenas por algoritmos heurísticos.

O trabalho proposto em FIGUEIREDO *et al.* (2011) apresenta uma heurística GRASP baseada em BINATO *et al.* (2001) para o modelo de planejamento com reconfiguração de MOULIN *et al.* (2010). Como em BINATO *et al.* (2001), a heurística define o sistema adicionando um circuito de cada vez de forma aleatória dentro da lista de candidatos até que não existam mais cortes no sistema, e posteriormente é feita uma remoção gradativa de circuitos do mais caro para o mais barato. Além do mais, por considerar o planejamento com reconfiguração, essa etapa também permite a remoção de circuitos existentes. Em seguida é efetuada a busca local. Este trabalho reproduz os resultados de MOULIN *et al.* (2010) e, para um caso sem resolver até a otimalidade mas parando após 10 horas de cálculo, teve uma resposta com um custo de investimento menor que o valor informado em MOULIN *et al.* (2010). Os tempos foram muito bons como em BINATO *et al.* (2001), mas não é citado em quantos casos a heurística conseguiu atingir os melhores valores da literatura ou especificado se o tempo indicado é o tempo levado para encontrar a melhor resposta ou a soma de todas as iterações. Tanto FIGUEIREDO *et al.* (2011) quanto BINATO *et al.* (2001) não apresentam valores médios ou o valor da pior solução encontrada, apenas o menor custo encontrado.

Por fim, ARAUJO (2012) propõe um trabalho que combina diferentes modelos com o objetivo de obter formulações alternativas para o modelo do PET. O trabalho faz as seguintes considerações: a possibilidade de reconfiguração dos circuitos; incorporação de perdas de potência ativa nos circuitos; e a análise de confiabilidade. Neste mesmo trabalho, também foram criadas heurísticas com objetivo de encontrar planos que consideravam a confiabilidade em tempos razoáveis e de controle de perdas no sistema, conseguindo resultados com a confiabilidade desejada em tempos



menores que os necessários pelo método usado inicialmente.

## 1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é buscar reduzir os custos computacionais encontrados em ARAUJO (2012) utilizando uma metaheurística GRASP, que de acordo com os resultados vistos na literatura (FIGUEIREDO *et al.* (2011) e BINATO *et al.* (2001)), conseguiu bons resultados com menor custo computacional, considerando ainda modificações no modelo como a incorporação de perdas de potência ativa nos circuitos e a análise de confiabilidade vistas em ARAUJO (2012). O planejamento realizado é estático, o sistema inicial é a configuração atual do sistema e o plano que será encontrado é o estado final do sistema no final do horizonte de planejamento, sem indicação de quando cada circuito deve ser adicionado.

O Capítulo 2 apresenta modelos para o problema do PET. No Capítulo 3, os algoritmos implementados e suas etapas são apresentados. No Capítulo 4 apresentam-se os problemas testados, os resultados dos experimentos computacionais utilizando os modelos vistos em ARAUJO (2012), os resultados utilizando o GRASP com diferentes parâmetros, a escolha dos parâmetros com melhores resultados e uma comparação com os resultados de ARAUJO (2012). Por fim, o Capítulo 5 contém as conclusões do trabalho.

## Capítulo 2

# O Planejamento da Expansão da Transmissão

Este capítulo trata da modelagem do problema do PET. O problema do PET visa identificar um plano de expansão que seja o mais econômico possível enquanto atende aos valores futuros de geração e consumo de energia (carga), sem resultar em violações operativas no sistema e considerando um nível de confiabilidade adequado. Para representar o PET como um problema de Programação Linear optou-se por utilizar o modelo com fluxo DC.

Além de geração e carga, outros dados do problema são: as características das linhas, a configuração inicial da rede, barras, novas linhas e transformadores que podem ser adicionados, e o custo de cada investimento candidato.

### 2.1 Modelagem

O sistema de transmissão pode ser representado como um grafo, onde os vértices, chamados de barras, representam subestações do sistema e as arestas são os circuitos do sistema (sendo possível ter circuitos paralelos). O planejamento pode ser modelado em um problema de otimização, dado por uma função objetivo e um conjunto de restrições.

Como o objetivo é ter um plano econômico para a expansão, a função objetivo característica do PET é dada pela soma de custos envolvidos. Estes custos, denotados por  $c_{km}$ , são constantes e correspondem ao valor necessário para construir a linha ou transformador entre as barras  $k$  e  $m$ . As variáveis binárias  $x_{km}$  representam se o circuito candidato de custo  $c_{km}$  será ou não adicionado:

$$\sum_{km} c_{km} x_{km}.$$

A forma geral dos modelos para o PET então é a minimização da função objetivo,

atendendo às restrições do sistema:

$$\begin{cases} \min & \sum_{km \in \Omega^1} c_{km} x_{km} \\ s.a. & \\ & \text{restrições do modelo para representar o sistema.} \end{cases} \quad (2.1)$$

No problema acima,  $\Omega^1$  é o conjunto dos circuitos candidatos para a expansão.

Este problema possui variáveis inteiras e contínuas e é não linear, tendo uma resolução complicada. É possível fazer a linearização do modelo, mas o custo computacional para resolver ainda pode ser grande devido à presença das variáveis inteiras, que estão presentes na função objetivo e nas restrições do problema. Desta forma, uma abordagem heurística pode ser utilizada para tratar das variáveis inteiras, resultando em um problema linear com variáveis contínuas de resolução mais fácil.

Uma solução viável para o PET é uma solução onde as restrições do modelo não são violadas. Tratando as variáveis inteiras de forma separada às restrições do PET, permite utilizar as restrições para avaliar a viabilidade de uma solução. Para essa avaliação, é adicionada ao modelo uma nova variável  $r_k$ , que representa a quantidade de energia que estaria faltando na barra  $k$  para que a demanda ( $d_k$ ) seja atendida, chamada também de corte de carga. A solução será viável para qualquer configuração de circuitos (dada pelos valores  $x_{km}$ ) que tenha  $r_k = 0$  para todas as barras, portanto o modelo dos problemas deste trabalho serão da seguinte forma:

$$\begin{cases} \min & \sum_{k \in B} r_k \\ s.a. & \\ & \text{restrições do modelo para representar o sistema.} \end{cases} \quad (2.2)$$

onde  $B$  é o conjunto das barras do sistema.

O presente trabalho propõe o desenvolvimento da heurística GRASP\_PET, baseada na Metaheurística GRASP, cujo objetivo é encontrar soluções viáveis para o problema, dadas pelas variáveis binárias  $x_{km}$ .

A Metaheurística GRASP é composta de duas etapas. Na primeira etapa é feita uma construção de uma solução viável, adicionando elementos na solução (neste caso, adicionando circuitos no sistema) de forma aleatória a partir de uma lista de candidatos até a solução construída ser viável. Em seguida é feita uma busca local em busca de uma solução melhor (neste caso, uma solução mais barata) sem deixar de ser viável. Para garantir a viabilidade da solução será resolvido o problema descrito em (2.2), que diferente de (2.1) agora possui apenas variáveis contínuas e

sua função objetivo indicará se a solução construída é viável ou não.

Após a etapa de construção, eventualmente existem circuitos desnecessários na solução, por não apresentarem nenhum benefício a solução corrente. Nestes casos, o algoritmo executa um passo adicional entre as etapas do GRASP convencional para verificar a possibilidade de remover circuitos que foram adicionados. Ou seja, se a remoção de um circuito adicionado manter a solução viável, ele pode ser removido sem problemas.

## 2.2 Modelo DC

O modelo DC, é chamado dessa forma por modelar os fluxos de potência nas linhas em corrente contínua, quando na verdade a corrente nas linhas possui, geralmente, fluxo em corrente alternada (ou AC em inglês). Considerando a função objetivo de (2.2), o modelo DC tem a seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \min & \sum_{k \in B} r_k \\ s.a. & \\ & g_k - \sum_{m \in \bar{\Omega}_k} f_{km} + r_k = d_k, k \in B \quad (a) \\ & \frac{f_{km}}{\gamma_{km}} - (\theta_k - \theta_m) = 0, km \in \bar{\Omega} \quad (b) \\ & |f_{km}| \leq \bar{p}_{km}, km \in \bar{\Omega} \quad (c) \\ & 0 \leq g_k \leq \bar{g}_k, k \in B \quad (d) \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Onde  $g_k$  é a geração de potência ativa na barra  $k$ ;  $\bar{\Omega}_k$  é o conjunto de circuitos da solução entre a barra  $k$  e outras;  $f_{km}$  é o fluxo de potência ativa da barra  $k$  para a barra  $m$ ;  $d_k$  é a demanda da barra  $k$ ;  $\gamma_{km}$  é a susceptância do circuito entre as barras  $k$  e  $m$ ;  $\theta_k$  é o ângulo da barra  $k$ ;  $\bar{\Omega}$  é o conjunto dos circuitos existentes na solução;  $\bar{p}_{km}$  é o limite de capacidade do circuito entre as barras  $k$  e  $m$  e  $\bar{g}_k$  é o limite de geração da barra  $k$ .

A restrição (2.3) (a) especifica que a potência gerada menos a soma dos fluxos que partem de uma barra deve ser igual à demanda, para todas as barras do sistema, portando as variáveis  $r_k$  que verificam a presença de cortes foi adicionada nesta restrição tendo o mesmo valor positivo da geração. A restrição (2.3) (b) garante que o valor do fluxo em um circuito sobre a susceptância do mesmo deve ser igual à diferença entre os ângulos das barras ligadas pelo circuito. As outras restrições são restrições de limite, para a capacidade dos circuitos (2.3) (c), e para a geração (2.3) (d), cujo limite superior pode ser estipulado de acordo com as capacidades máximas das usinas, permitindo um redespacho (permite que os valores de geração possam variar entre soluções). Os valores de geração também podem estar determinados

antes do planejamento, nesses casos os valores de geração podem ser fixados e essa restrição poderia ser removida.

Este será o modelo mais simples utilizado neste trabalho.

## 2.3 Modelo DC com perdas

Como mencionado na revisão bibliográfica, a inclusão de perdas de potência ativa nos circuitos em modelos para o planejamento da expansão da transmissão é uma prática cada vez mais usual nos trabalhos da literatura. Desta forma, o modelo DC fica mais próximo do modelo real com corrente alternada (AC). Nas palavras de ALGUACIL *et al.* (2003): “Negligenciar as perdas resulta em poupança hoje, mas os investimentos de novos ajustes podem ser maiores que a poupança inicial”. Com outras palavras, o planejamento da expansão usando o modelo (2.3), fornece em geral um plano mais barato do que com um modelo que considera as perdas. Porém, os ajustes necessários para esse plano em uma etapa mais avançada do planejamento, onde as perdas claramente serão consideradas, podem tornar a expansão mais cara do que um planejamento iniciado com um modelo que considera as perdas.

Além de melhorar a precisão no cálculo dos fluxos, que resulta em um planejamento mais preciso nos reforços de transmissão necessários, a representação das perdas também permite que seja calculado o custo das perdas na operação do sistema. Uma vez que esse custo pode ser maior que o custo de investimento anual necessário para a inclusão de novos circuitos, é possível fazer um planejamento que minimize não apenas o investimento mas o custo global do planejamento da expansão da transmissão.

Nas referências pesquisadas, foram encontradas duas formas de realizar o cálculo das perdas. Uma delas, porém mantinha a aproximação de que a resistência é desprezível em relação a reatância para calcular as perdas, como foi usada em KAZEMI *et al.* (2008) e DA SILVA *et al.* (2008). A forma adotada neste trabalho não faz essa aproximação, assim como em ALGUACIL *et al.* (2003) e DE OLIVEIRA *et al.* (2005), uma vez que para que exista essa perda de potência ativa nas linhas é necessário considerar o valor da resistência dos circuitos.

Considerando as simplificações feitas para o modelo DC, a equação das perdas ativas em um circuito é proporcional ao quadrado da diferença angular, o que gera uma restrição não linear para o modelo. Para fazer a linearização desta restrição, a curva é dividida em blocos e passa a ser representada com segmentos de retas. Ao mesmo tempo como o valor da variação angular ao quadrado será positiva mesmo para variações negativas, novas representações para a diferença entre os ângulos também são usadas. Essas alterações resultam na adição de mais variáveis ao modelo que cresce consideravelmente em relação ao modelo anterior ficando da seguinte

forma:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \min & \sum_{k \in B} r_k \\ \text{s.a.} & \\ & g_k - \sum_{m \in \bar{\Omega}_k} (f_{km} + \frac{1}{2} q_{km}) + r_k = d_k, k \in B \quad (a) \\ & \frac{f_{km}}{\gamma_{km}} - (\theta_k - \theta_m) = 0, km \in \bar{\Omega} \quad (b) \\ & -\frac{q_{km}}{\eta_{km}} + \sum_{l=1}^L (2l-1) \Delta \delta_{km} \delta_{km}(l) = 0, km \in \bar{\Omega} \quad (c) \\ & |f_{km}| \leq \bar{p}_{km}, km \in \bar{\Omega} \quad (d) \\ & 0 \leq q_{km} \leq \bar{p}_{km}, km \in \bar{\Omega} \quad (e) \\ & f_{km} + \frac{1}{2} q_{km} \leq \bar{p}_{km}, km \in \bar{\Omega} \quad (f) \\ & -f_{km} + \frac{1}{2} q_{km} \leq \bar{p}_{km}, km \in \bar{\Omega} \quad (g) \\ & 0 \leq g_k \leq \bar{g}_k, k \in B \quad (h) \\ & \delta_{km}^+ + \delta_{km}^- = \sum_{l=1}^L \delta_{km}(l), km \in \bar{\Omega} \quad (i) \\ & \theta_k - \theta_m = \delta_{km}^+ - \delta_{km}^-, km \in \bar{\Omega} \quad (j) \\ & \delta_{km}^+ \geq 0; \delta_{km}^- \geq 0, km \in \bar{\Omega} \quad (k) \\ & \delta_{km}(l) \geq 0, km \in \bar{\Omega}, l = 1, \dots, L \quad (l) \\ & \delta_{km}(l) \leq \Delta \delta_{km}, km \in \bar{\Omega}, l = 1, \dots, L. \quad (m) \end{array} \right. \quad (2.4)$$

onde  $q_{km}$  é a perda no circuito entre as barras  $k$  e  $m$ ;  $\eta_{km}$  é a condutância do circuito entre as barras  $k$  e  $m$ ;  $\Delta \delta_{km}$  é a variação angular máxima entre as barras  $k$  e  $m$  para cada bloco;  $\delta_{km}(l)$  é a variação angular entre as barras  $k$  e  $m$  no bloco  $l$ -ésimo;  $\delta_{km}^+$  é o valor de  $\theta_{km}$  se for positivo; e  $\delta_{km}^-$  é o módulo de  $\theta_{km}$  quando este for negativo. Assim, as variáveis  $\delta$  que representam as diferenças angulares serão sempre positivas.

Neste problema, (2.4) (a) corresponde à equação (2.3) (a), tendo as perdas incluídas, como é considerado que cada metade da energia perdida em um circuito tem origem em cada barra, o valor da perda no circuito entra pela metade na equação da barra; (b), (d) e (h) são as mesmas restrições que existiam em (2.3); (c) é a restrição que relaciona o valor das perdas em um circuito com a curva que lineariza o quadrado da variação angular; (e) é o limite para os valores de perdas; (f) e (g) indicam como o fluxo de potência e as perdas se comportam em relação à capacidade do circuito; (i) indica que o somatório do valor de cada bloco deve ser igual ao módulo da diferença angular; (j) indica que para fazer a variação angular, basta colocar o sinal negativo para a variável que se terá o módulo da variação negativa; (k) e (l) reafirmam que essas variáveis não podem ser negativas; e (m) limita o valor de cada bloco na variação máxima de um bloco.

Este será o segundo modelo aplicado no trabalho.

## 2.4 Modelo DC com confiabilidade

Qualquer equipamento pertencente ao sistema, assim como os novos equipamentos indicados pelas expansões, pode falhar em algum momento durante sua operação. A chance de uma falha, porém, é pequena. A probabilidade de não existir falhas no sistema somado à probabilidade de existir apenas um equipamento falhando em um momento dado costuma representar a maior parte de porcentagem das condições de operação que um sistema pode ter. Isso pois, se a chance de uma falha existir é baixa, acontecer mais de uma falha ao mesmo tempo é muito mais raro. Além do mais, para sistemas de grande porte, duas falhas simultâneas em lugares muito distantes podem ser representadas como duas falhas simples, acontecendo separadamente. Alternativamente, um sistema pode simplesmente ser dividido em sistemas menores, durante o planejamento.

No Brasil, o PET é realizado geralmente com o critério de confiabilidade N-1. Este critério determina que o sistema é capaz de continuar operando quando um equipamento qualquer, entre os N equipamentos operando no sistema, falha, justamente por considerar que é uma aproximação aceitável para a segurança do sistema.

Os modelos apresentados nas seções 2.2 e 2.3 procuram a expansão mais econômica para que o sistema seja capaz de atender aos requisitos futuros em condições normais de operação.

Para adicionar um critério de confiabilidade N-1 ao modelo, é necessário replicar as restrições que descrevem o sistema para o caso de falha de cada equipamento, além do caso sem falhas. Ou seja, em um sistema que possui apenas 3 linhas e com mais 3 linhas candidatas, o modelo teria as restrições repetidas 7 vezes para representar a possível falha de cada uma das 6 linhas e o caso sem falhas. Como também deve-se replicar variáveis de fluxo, perdas, etc para cada contingência, a complexidade do problema de otimização cresce de forma exponencial, forçando o uso de heurísticas e formulações simplificadas.

Neste trabalho, como usamos GRASP, o modelo não precisa crescer tendo várias restrições repetidas para cada circuito, é possível simplesmente chamar a função de avaliação de formas repetidas. Inicialmente é chamada a função para o atual estado de  $\bar{\Omega}$  e depois são feitas novas chamadas removendo um circuito de  $\bar{\Omega}$  em cada vez. A solução será viável (com confiabilidade) se para todas as chamadas não existir corte, ou melhor, a solução será declarada inviável, assim que uma das chamadas resultar um corte diferente de zero.

Para diminuir a quantidade de falhas testadas, não será feita a remoção de todos os circuitos de  $\bar{\Omega}$ . Como foi feito em ARAUJO (2012), as falhas testadas são em circuitos que foram identificados ao fazer uma análise do sistema proposto pelo

planejamento com modelo DC considerando perdas. O objetivo é manter a busca do critério N-1, mas reduzir a complexidade do problema para reduzir o tempo de execução.

O terceiro modelo utilizado neste trabalho é uma junção do modelo com perdas e com confiabilidade, que possui a mesma modelagem vista em (2.4), porém o mesmo modelo será testado com a remoção de alguns circuitos, um de cada vez.



# Capítulo 3

## GRASP para o PET

A metaheurística GRASP (FEO e RESENDE (1989)), sigla de Greedy Randomized Adaptive Search Procedure, é um método de resolução heurística muito utilizado em problemas de otimização combinatória. Basicamente é dividido em duas fases: construção e busca local. Na primeira fase, a construção da solução é feita por um método guloso, aleatório e adaptativo, onde elementos são adicionados na solução de forma aleatória dentro de um conjunto de opções; enquanto na segunda fase é realizada uma busca local para a vizinhança da solução construída, o que explica seu nome. A seguir apresentam-se as fases do método GRASP usado neste trabalho para a resolução heurística do PET.

### 3.1 Algoritmo GRASP\_PET

A seguir, apresenta-se o Algoritmo GRASP\_PET proposto para a resolução heurística do PET.

#### 3.1.1 Inicialização

A etapa inicial consiste da leitura dos dados de entrada, a saber: dados do sistema, informações sobre barras, circuitos existentes e circuitos candidatos.

#### 3.1.2 Fase construtiva

Seja  $L_{\Omega^1}$  a lista de todos os circuitos candidatos. Seja  $\Pi_{km}$  uma medida que procura indicar circuitos com maior probabilidade de reduzir cortes para uma solução conforme apresentado por FIGUEIREDO *et al.* (2011) e BINATO *et al.* (2001) e calculado para cada circuito (conectando as barras  $k$  e  $m$ ) de acordo com a fórmula:

$$\Pi_{km} = (\pi_k - \pi_m) * (\theta_k - \theta_m).$$

onde  $\pi_i$  é a variável dual correspondente à restrição (2.3) (a) (existente para todas as barras, conjunto  $B$  indicado na restrição) e  $i$  é a indicação da barra.

Considera-se a lista restrita de candidatos (LRC) uma lista com os primeiros  $|LRC|$  circuitos de  $L_{\Omega^1}$  após ordenar  $L_{\Omega^1}$  com base em algum critério, considerando uma restrição que limita a quantidade máxima de circuitos paralelos. Em seguida, um circuito da LRC é escolhido de forma aleatória para ser adicionado na solução que é testada pelo problema linear para verificar se é uma solução viável (utilizando um dos 3 modelos apresentados no capítulo anterior). O processo se repete até que uma solução viável seja encontrada. Porém, no PET, nem todos os circuitos adicionados podem realmente colaborar para o sistema do plano, ou seja, podem existir circuitos que podem ser removidos e ainda assim manter a solução viável.

A fase de construção então termina com uma verificação da possibilidade de remoção dos circuitos adicionados. É feita uma ordenação dos circuitos do mais caro para o mais barato e novos testes de viabilidade são realizados após a remoção de cada circuito. Se o corte de carga continua zero na remoção de um circuito, ele pode sair da solução; se o corte de carga deixar de ser zero, o circuito volta para a solução. Após testar todos os circuitos que foram adicionados, a solução encontrada será a solução inicial para a segunda fase, da busca local.

### 3.1.3 Fase da busca local

Na fase de busca local, considera-se como solução inicial a solução gerada na fase anterior, a fase construtiva. Define-se vizinhança  $m \times n$  a vizinhança que modifica a solução corrente através de remoção de  $m$  circuitos e adição de  $n$  circuitos. A estratégia utilizada para selecionar o vizinho é a do melhor vizinho, portanto todos os vizinhos da solução são considerados, porém apenas os que reduzem o custo do PET são realmente testados para verificar se são viáveis. Após a identificação do primeiro vizinho viável, outro vizinho só será testado se a redução do custo for maior do que o da redução considerando o atual melhor vizinho. A geração dos vizinhos é feita procurando gerar as trocas que resultam na maior redução de custo primeiro para reduzir ao máximo os casos testados pelo programa linear.

# Capítulo 4

## Experimentos Computacionais

Neste capítulo são apresentados os resultados computacionais obtidos pelo algoritmo proposto e pelo método usado em ARAUJO (2012) aplicados a sistemas (instâncias) disponíveis na literatura e a comparação entre os resultados.

### 4.1 Instâncias testes

Esta seção apresenta características dos três sistemas utilizados para testes nos experimentos computacionais.

#### 4.1.1 Sistema Garver

O sistema Garver proposto por GARVER (1970), é muito utilizado para apresentar resultados de trabalhos sobre planejamento da transmissão, portanto é uma referência na literatura. O sistema, com apenas 6 barras, é considerado de fácil solução. Porém, por ser muito pequeno e com dados poucos realistas, não é representativo como única forma de validar um método.

A Figura 4.1 representa o sistema de Garver com suas cargas, gerações máximas e linhas existentes. O sistema possui apenas 6 barras, onde uma delas está inicialmente isolada do sistema, mas sua geração será necessária para o funcionamento correto do sistema. Existem circuitos candidatos entre todas as barras e cada trecho pode ter no máximo quatro circuitos. Os dados originais de GARVER (1970) podem ser vistos no Apêndice A.

#### 4.1.2 Sistema IEEE 24 Barras

O sistema IEEE 24 Barras foi proposto por GRIGG *et al.* (1999) para a realização de testes de confiabilidade que, após modificações de geração e carga, como em ALGUACIL *et al.* (2003) e MOULIN *et al.* (2010), passou a ser usado também para

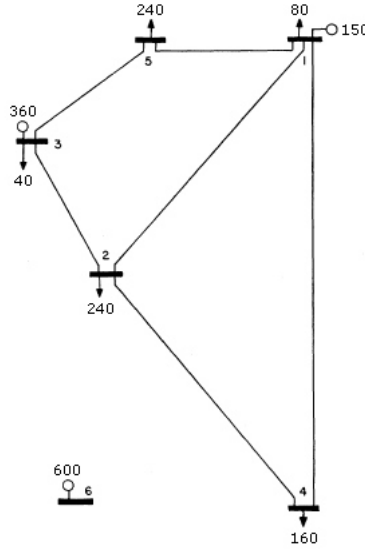


Figura 4.1: Sistema de Garver inicial.

planejamentos de expansão da transmissão. Por ser conhecido pela comunidade internacional, é uma boa opção quando comparando soluções obtidas por diferentes métodos de resolução, apesar de ser menos usado do que o Sistema Garver.

É um sistema mais complexo do que o de Garver, porém de tamanho suficientemente pequeno para que o problema não seja considerado muito grande, sendo uma boa opção de validação para modelos.

A Figura 4.2 representa o sistema IEEE 24 barras com suas barras e linhas existentes e localizações de cargas e gerações. Como o próprio nome indica, o sistema possui 24 barras. Existem circuitos candidatos em todos os trechos construídos e mais alguns trechos novos. Cada trecho pode ter no máximo quatro circuitos. Os dados usados do sistema podem ser vistos no Apêndice A.

### 4.1.3 Sistema Sul do Brasil

O sistema Sul do Brasil representa uma versão reduzida do sistema existente na região sul do Brasil. Inicialmente considerado em MONTICELLI *et al.* (1982), é um sistema usado em alguns trabalhos brasileiros sobre o PET, portanto, é outro bom exemplo para estudar. Como ponto negativo, esse sistema não possui dados muito precisos.

A Figura 4.3 (extraída de BINATO (2000)) representa o sistema reduzido da região sul do Brasil, com suas barras, circuitos existentes e candidatos, localizações de cargas e gerações e indicação de tensão nominal das barras. O sistema possui um total 46 barras, com algumas isoladas (de número 3, 6, 10, 11, 15, 25, 28, 29, 30, 31 e 41). Existem circuitos candidatos em todos os trechos já construídos, além dos trechos novos indicados na figura com linhas tracejadas. Cada trecho pode ter no



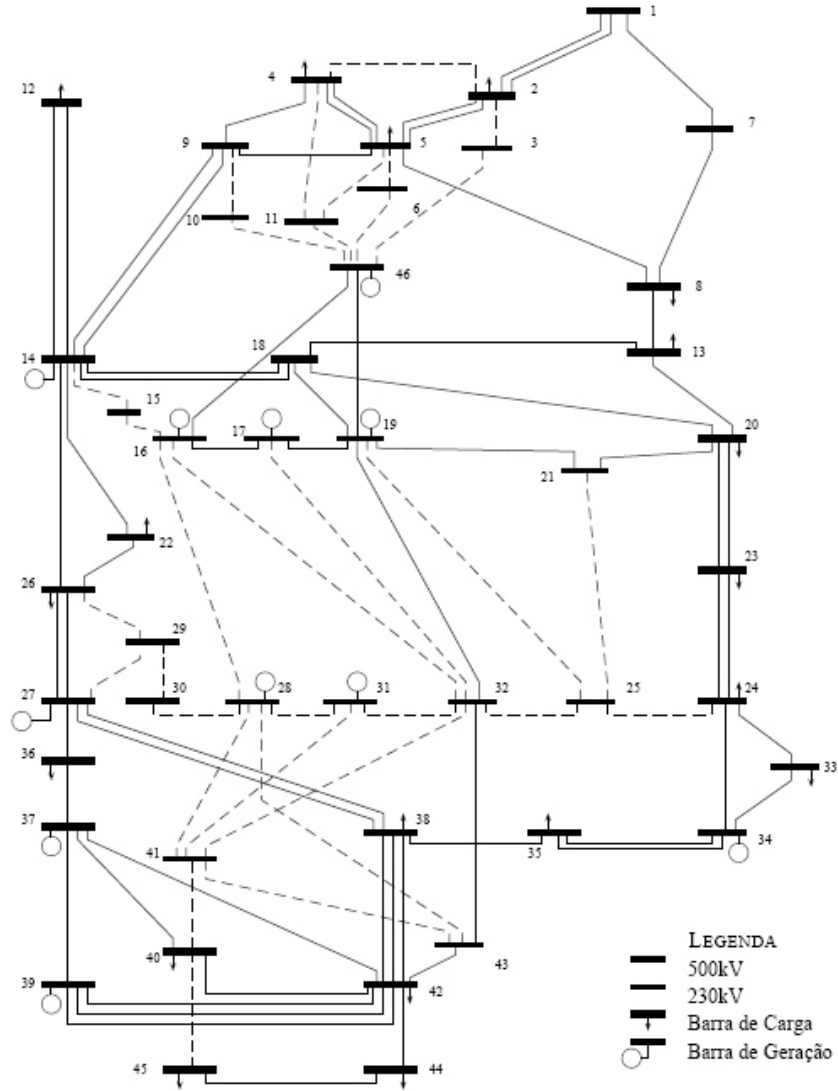


Figura 4.3: Sistema reduzido da região sul do Brasil

Para servir como base de comparação, o método PLIC foi refeito para obter os valores e tempos de execução para os modelos DC, DC com perdas e DC com perdas e confiabilidade.

Para simplificar a identificação de diferentes planejamentos, algumas siglas são usadas para mostrar qual modelo está sendo considerado. O planejamento com o modelo DC (2.3) é denominado pela sigla PET, e letras adicionais indicam as modificações no modelo. A letra “p” indica as perdas nos circuitos e “f” indica a consideração das falhas, que testa a confiabilidade do sistema.

As Tabelas 4.1 a 4.3 mostram os resultados encontrados para cada um dos três sistemas com o método PLIC.

A Tabela 4.1 mostra os valores (Custo) das soluções e os tempos em segundos

Tabela 4.1: Planejamentos para Garver - PET

	PET	PETp	PETpf
Custo	110	130	190
Tempo (s)	0,04	0,07	1,28

Tabela 4.2: Planejamentos para IEEE - PET

	PET	PETp	PETpf
Custo	152	218	543
Tempo (s)	0,10	0,26	1550,5

(Tempo (s)) de planejamentos para o Sistema Garver. A coluna PET mostra os resultados obtidos para o planejamento com modelo DC, a coluna PETp para o modelo DC considerando perdas e a coluna PETpf mostra os resultados obtidos para o planejamento considerando perdas e confiabilidade. Observa-se também que a última coluna com o resultado do planejamento que considera perdas e confiabilidade possui custo e tempo significativamente maiores que as outras colunas.

Para o Sistema IEEE 24 Barras, a Tabela 4.2 mostra os valores (Custo) das soluções e os tempos em segundos (Tempo (s)). Como em Garver, o grande aumento nos valores da terceira coluna indicam o quanto a inclusão da confiabilidade torna o problema complexo, justificando a escolha de a confiabilidade ser realizada apenas para um grupo de circuitos e não para cada circuito.

A Tabela 4.3 mostra os valores (Custo) das soluções e os tempos em segundos (Tempo (s)) de planejamentos para o Sistema Sul.

Os resultados apresentados nas três tabelas também poderiam ser chamados de soluções ótimas por serem as melhores soluções encontradas na literatura, com exceção de um resultado: em ARAUJO *et al.* (2012), é encontrado um custo de 180 para o PETpf no sistema Garver.

O trabalho ARAUJO *et al.* (2012) também utiliza o PLIC, mas com objetivo de minimizar as perdas no sistema. O método heurístico consistia em utilizar o PLIC considerando as perdas de forma iterativa, adicionando uma restrição que procurava limitar as perdas no sistema. A cada iteração, o limite de perdas era reduzido e a confiabilidade era conferida. A solução de custo 180 então é encontrada apresentando a confiabilidade esperada para o modelo PETpf. Esta solução, portanto também seria válida para o PLIC com perdas e confiabilidade, mas por algum motivo esta solução é eliminada no processamento do Cplex, sendo encontrada apenas com a

Tabela 4.3: Planejamentos para Sul - PET

	PET	PETp	PETpf
Custo	72,87	95,79	244,64
Tempo (s)	0,15	0,57	1380,04

adição da restrição utilizada em ARAUJO *et al.* (2012).

## 4.4 Estudo Computacional

O estudo computacional possui dois objetivos. O primeiro é estudar para cada sistema o comportamento do algoritmo proposto considerando diversas versões do algoritmo, cada uma delas definida pela combinação das seguintes escolhas:

1. Ordenação da lista de candidatos;
2. Cardinalidade da lista restrita de candidatos; e
3. Vizinhaça para a busca local.

O segundo objetivo é validar a proposta comparando a melhor versão proposta com os melhores resultados disponíveis na literatura.

### 4.4.1 Configurações

A seguir, as configurações dos métodos disponíveis na literatura que também serviram de inspiração para o presente trabalho.

O GRASP foi usado tanto em FIGUEIREDO *et al.* (2011) como em BINATO *et al.* (2001), porém algumas diferenças podem ser observadas. A configuração do GRASP escolhida em FIGUEIREDO *et al.* (2011) é a ordenação pela medida  $\Pi$ , vizinhaça de  $2 \times 2$  com tamanho de lista de 70% (também foram testados a vizinhaça de  $1 \times 1$  e tamanho de 50%) realizando 5 iterações para cada sistema. Por permitir a reconfiguração, este trabalho ainda optou por escolher como estado inicial dos sistemas um  $\bar{\Omega}$  vazio. Já em BINATO *et al.* (2001), enquanto a ordenação foi a mesma, não houve uma escolha definitiva de vizinhaça ou tamanho da lista. Foram feitos testes com vizinhanças de  $1 \times 1$  e  $2 \times 2$  e a lista teve tamanhos fixos com valores múltiplos de 5, com a quantidade de iterações variando entre 10 e 500 dependendo do sistema.

Configurações utilizadas no algoritmo proposto GRASP\_PET:

#### Ordenação da lista de candidatos

Foram consideradas duas ordenações: a ordenação pela medida  $\Pi$  visto nos outros trabalhos e uma ordenação pelo custo dos circuitos, com o objetivo de diminuir a quantidade de processos.



### **Cardinalidade da lista restrita de candidatos ( $|LRC|$ )**

Assim como em FIGUEIREDO *et al.* (2011), as cardinalidades adotadas são porcentagens da quantidade total de candidatos. As porcentagens testadas foram: 30, 50 e 70.

### **Vizinhança para a busca local**

As mesmas vizinhanças utilizadas nos trabalhos citados também foram testadas. Porém, além de  $1x1$  e  $2x2$ , também foi adicionada às opções a vizinhança de  $2x1$ , bem como duas vizinhanças variáveis. Conhecida por VNS, sigla de Variable Neighbourhood Search (MLADENOVIC e HANSEN (1997)), uma vizinhança variável é baseada na mudança sistemática das vizinhanças utilizadas na busca e vem sendo aplicada na resolução de grandes exemplares para problemas combinatórios. A solução encontrada é, portanto, um ótimo local para todas as vizinhanças ao mesmo tempo.

As vizinhanças variáveis consideradas foram: uma começando com a vizinhança  $2x1$ , partindo para a  $1x1$  e outra invertendo a ordem utilizada.

### **Configuração simples**

Além das combinações possíveis para a etapa de construção, foi testada ainda uma outra forma de construção para avaliação que consiste em simplesmente usar a  $L_{\Omega^1}$  sem restringir a lista a uma porcentagem ou ordenação, o mesmo que uma porcentagem de 100% onde uma ordenação não possui importância pois todos os candidatos estarão presentes desde o início.

Tabela 4.4: Planejamentos para Garver - PET ordenado pelo custo - Custo PLIC = 110, Tempo PLIC = 0,04s

	Tamanho (%)	Custo	Tempo (s)	nº de soluções
$1x1$	30	130	0,59	2
	50	130	0,51	2
	70	110	0,65	1
$2x2$	30	130	0,66	2
	50	130	0,78	2
	70	110	0,91	1
$2x1$	30	110	2,16	6
	50	110	2,19	7
	70	110	2,62	7
$2x1 + 1x1$	30	110	2,21	6
	50	110	2,27	7
	70	110	2,5	7
$1x1 + 2x1$	30	110	2,49	5
	50	110	3,01	7
	70	110	3,87	8

## 4.5 Estudo experimental do método GRASP-PET

As próximas seções apresentam os resultados do método proposto para cada sistema.

### 4.5.1 Sistema Garver

Para o Sistema Garver, as Tabelas 4.4 a 4.9 apresentam os resultados obtidos pelo método proposto considerando a combinação de todas as suas variações. Na primeira coluna identifica-se qual vizinhança foi usada, na segunda coluna o tamanho da LRC. A terceira coluna apresenta o melhor custo encontrado nas 10 iterações, seguida pela informação de quanto tempo as 10 iterações levaram para terminar e a última coluna informa a quantidade de iterações que alcançaram a melhor solução. O tipo de ordenação pode ser encontrado no título de cada tabela.

A Tabela 4.4 indica que as duas primeiras vizinhanças atingiram uma vez, em apenas um dos tamanhos, o valor de referência de 110. Os tempos, porém, são maiores em relação ao PLIC. Sobre a vizinhança variável, a  $2x1$  aplicada em conjunto com a  $1x1$  melhorou muitos casos apesar de ficar com os maiores tempos, enquanto a ordem contrária no uso das vizinhanças não apresentou melhoras em relação ao uso da  $2x1$  apenas.

Tabela 4.5: Planejamentos para Garver - PETp ordenado pelo custo - Custo PLIC = 130, Tempo PLIC = 0,07s

	Tamanho (%)	Custo	Tempo (s)	nº de soluções
$1x1$	30	180	1,1	1
	50	140	1,01	1
	70	130	1,84	1
$2x2$	30	170	1,32	1
	50	130	1,4	1
	70	130	2,12	1
$2x1$	30	130	5,95	8
	50	130	5,43	7
	70	130	8,67	8
$2x1 + 1x1$	30	130	6,43	8
	50	130	5,58	7
	70	130	8,83	8
$1x1 + 2x1$	30	130	6,98	9
	50	130	6,06	8
	70	130	11,68	8

A Tabela 4.5 volta a indicar que o melhor custo de PLIC foi encontrado, apesar de mais um resultado fraco nas duas primeiras vizinhanças. Os tempos também são maiores em relação ao PLIC e tendem a aumentar junto com a quantidade de resultados bons. Sobre a vizinhança variável, os resultados seguiram o mesmo padrão visto na tabela anterior.

A tabela 4.6 indica que, assim como no PLIC, os tempos apresentam um aumento significativo ao adicionar a confiabilidade. Na vizinhança variável, a vizinhança  $1x1$  não apresentou melhoras sendo aplicada após a  $2x1$  e neste caso o mesmo foi observado na outra configuração. Em 90 iterações (10 iterações x 3 tamanhos x 3 vizinhanças) apenas 3 resultados chegaram ao custo de 190 (a configuração de vizinhança  $2x1$  e tamanho 50 também encontrou uma vez esse valor, assim como na vizinhança variável iniciada por  $2x1$ ) e 2 resultados superaram o resultado do PLIC ao encontrar um plano com custo de 180, também encontrado em ARAUJO *et al.* (2012)).

A Tabela 4.7 mostra que, diferente do resultado com a ordenação pelo custo, o valor do PLIC não foi encontrado nenhuma vez nas duas primeiras vizinhanças. Os tempos também são maiores em comparação ao PLIC e aumentam da mesma forma vista nas outras tabelas. Sobre a vizinhança variável, usar a  $1x1$  após a  $2x1$  dessa

Tabela 4.6: Planejamentos para Garver - PETpf ordenado pelo custo - Custo PLIC = 190, Tempo PLIC = 1,28s

	Tamanho (%)	Custo	Tempo (s)	n° de soluções
$1x1$	30	220	4,45	1
	50	200	5,12	2
	70	250	7,65	1
$2x2$	30	210	3,64	1
	50	200	6,61	1
	70	240	16,61	1
$2x1$	30	190	13,06	1
	50	180	18,21	1
	70	200	39,29	1
$2x1 + 1x1$	30	190	13,11	1
	50	180	19,31	1
	70	200	41,91	1
$1x1 + 2x1$	30	220	27,97	1
	50	200	31,03	1
	70	250	52,75	1

Tabela 4.7: Planejamentos para Garver - PET ordenado por  $\Pi$  - Custo PLIC = 110, Tempo PLIC = 0,04s

	Tamanho (%)	Custo	Tempo (s)	n° de soluções
$1x1$	30	130	1,26	5
	50	130	1,19	2
	70	130	1,29	2
$2x2$	30	130	0,75	5
	50	130	1,32	3
	70	130	1,48	1
$2x1$	30	110	1,74	5
	50	110	2,96	4
	70	110	3,05	5
$2x1 + 1x1$	30	110	2,6	7
	50	110	3,52	6
	70	110	3,7	5
$1x1 + 2x1$	30	110	2,68	7
	50	110	3,94	5
	70	110	4,64	6

Tabela 4.8: Planejamentos para Garver - PETp ordenado por  $\Pi$  - Custo PLIC = 130, Tempo PLIC = 0,07s

	Tamanho (%)	Custo	Tempo (s)	nº de soluções
$1x1$	30	130	1,43	1
	50	150	1,66	2
	70	170	1,56	2
$2x2$	30	130	1,65	2
	50	150	1,9	2
	70	180	1,77	2
$2x1$	30	130	3,59	5
	50	130	4,44	8
	70	130	4,09	9
$2x1 + 1x1$	30	130	4,71	7
	50	130	4,47	9
	70	130	4,17	9
$1x1 + 2x1$	30	130	5,54	8
	50	130	8,13	9
	70	130	8,01	10

vez gerou alguns casos melhores, e no caso contrário observa-se mais uma vez que a vizinhança  $2x1$  melhorou muitos casos.

Diferente da tabela anterior, na Tabela 4.8 as primeiras vizinhanças também encontraram o valor do PLIC, apesar de ter feito em poucos casos e para apenas um dos tamanhos. Os resultados em geral apresentam a mesma tendência das tabelas anteriores em relação ao tempo. A novidade é que pela primeira vez nota-se um caso aonde as 10 iterações chegaram ao valor esperado para a vizinhança variável  $1x1 + 2x1$  e tamanho 70.

Na Tabela 4.9 o valor encontrado no PLIC não foi encontrado. Novamente ocorreu a solução com custo de 180, encontrada em duas iterações. Entre os outros casos, os resultados com a vizinhança  $2x1$  apresentaram os melhores valores e as vizinhanças variáveis não registraram avanço na combinação.

A Tabela 4.10 apresenta os resultados sem ordenação, ou seja, com tamanho da LRC de 100% e circuitos na mesma ordem encontrada no arquivo de dados. Nesta tabela não existe a coluna com o tamanho da LRC, ao invés, existe a coluna que indica o modelo usado: PET, PETp ou PETpf.

Tabela 4.9: Planejamentos para Garver - PETpf ordenado por  $\Pi$  - Custo PLIC = 190, Tempo PLIC = 1,28s

	Tamanho (%)	Custo	Tempo (s)	n° de soluções
$1x1$	30	220	4,77	1
	50	259	8,26	1
	70	278	10,28	1
$2x2$	30	200	9,98	2
	50	220	25,63	1
	70	258	31,66	1
$2x1$	30	180	21,87	2
	50	200	31,68	1
	70	238	43,61	1
$2x1 + 1x1$	30	180	24,25	2
	50	200	35,03	1
	70	238	47,36	1
$1x1 + 2x1$	30	220	30,88	1
	50	259	53,12	1
	70	278	73,24	1

Tabela 4.10: Planejamentos para Garver - PET's sem ordenação

	Modelo	Custo	Tempo (s)	n° de soluções
$1x1$	PET	190	1,29	1
	PETp	190	2,35	1
	PETpf	271	10,95	1
$2x2$	PET	190	1,08	1
	PETp	190	2,28	1
	PETpf	271	49,24	2
$2x1$	PET	110	4,2	8
	PETp	130	8,24	8
	PETpf	220	69,92	1
$2x1 + 1x1$	PET	110	4,51	8
	PETp	130	8,64	8
	PETpf	220	75,62	1
$1x1 + 2x1$	PET	110	5,2	8
	PETp	130	9,95	10
	PETpf	270	94,84	1

Apesar de chegar aos valores do PLIC para PET (110) e PETp (130) com a vizinhança  $2x1$  (sozinha e em conjunto com a  $1x1$  obtendo 10 resultados iguais para PETp), o que pode ser visto na Tabela 4.10 é que a falta de critérios na construção resultou nos maiores tempos de execução para o sistema.

Comparando os resultados de PET nas tabelas nota-se que a ordenação por custo pareceu combinar melhor com tamanhos de lista grandes. A ordenação por custo teve resultados melhores em valor e tempo. E para todos os casos a vizinhança  $2x1$  foi capaz de encontrar a mesma solução do PLIC (diretamente ou variando com a  $1x1$ ).

Sobre os resultados de PETp, a ordenação por custo continuou tendo melhores resultados para tamanhos grandes, enquanto a ordenação por  $\Pi$  apresentou resultados melhores para tamanhos pequenos. Os tempos dos casos mais demorados registrados nos casos com ordenação por  $\Pi$  foram menores. Novamente a vizinhança  $2x1$  foi capaz de encontrar a melhor solução (diretamente ou variando com a  $1x1$ ).

Os resultados de PETpf indicam que encontrar resultados bons para este modelo não é simples. A vizinhança  $2x1$  se mostrou a melhor, encontrando uma solução melhor que a do PLIC, mas os resultados, em geral, não foram bons e não se evitou o grande aumento no tempo.

#### 4.5.2 Sistema IEEE 24 Barras

Os resultados para o Sistema IEEE 24 Barras podem ser vistos nas Tabelas 4.11 a 4.17, seguindo o mesmo formato das tabelas do sistema Garver.

Apesar de ter 7 entre 9 casos onde as 10 iterações chegaram a 152 usando a vizinhança  $2x1$  (sozinha ou em conjunto com a  $1x1$ ), as outras vizinhanças apresentam resultados piores na Tabela 4.11, apenas chegando próximo ao melhor valor encontrado no PLIC para listas com tamanho de 70%, em comparação com a Tabela 4.4 para o sistema Garver. Comparando com os resultados da seção anterior, outro ponto de destaque são os valores de tempo, com a mudança para um sistema maior, os tempos ficaram bem mais elevados.

A Tabela 4.12 mostra mais uma vez que apenas a vizinhança  $2x1$  foi capaz de encontrar a mesma solução do PLIC enquanto as outras vizinhanças tiveram resultados mais distantes. Tempos novamente elevados.

Tabela 4.11: Planejamentos para IEEE - PET ordenado pelo custo - Custo PLIC = 152, Tempo PLIC = 0,10s

	Tamanho (%)	Custo	Tempo (s)	n° de soluções
$1x1$	30	740	24,95	1
	50	476	27,47	1
	70	161	23,06	1
$2x2$	30	740	223,08	1
	50	455	266,55	1
	70	191	176,04	1
$2x1$	30	152	381,31	10
	50	152	249,11	10
	70	152	150,20	9
$2x1 + 1x1$	30	152	384,66	10
	50	152	251,31	10
	70	152	152,42	9
$1x1 + 2x1$	30	152	333,87	10
	50	152	240,65	10
	70	152	173,73	10

Tabela 4.12: Planejamentos para IEEE - PETp ordenado pelo custo - Custo PLIC = 218, Tempo PLIC = 0,26s

	Tamanho (%)	Custo	Tempo (s)	n° de soluções
$1x1$	30	826	65,73	1
	50	631	93,96	1
	70	401	87,84	1
$2x2$	30	826	593,78	1
	50	635	879,54	1
	70	401	859,37	1
$2x1$	30	218	1828,86	9
	50	218	1597,31	8
	70	218	796,48	6
$2x1 + 1x1$	30	218	1838,33	9
	50	218	1606,91	8
	70	218	803,49	6
$1x1 + 2x1$	30	218	1822,86	9
	50	218	1694,73	8
	70	218	918,64	4



Tabela 4.13: Planejamentos para IEEE - PETpf ordenado pelo custo - Custo PLIC = 543, Tempo PLIC = 1550,5s

	Tamanho (%)	Custo	Tempo (s)	n° de soluções
$1x1$	30	1483	293,96	1
	50	1423	358,06	1
	70	1014	319,08	1
$2x2$	30	1438	10182,42	1
	50	1368	11336,19	1
	70	959	12495,13	1
$2x1$	30	1428	7221,03	1
	50	1365	6624,6	1
	70	956	5742,04	1
$2x1 + 1x1$	30	1428	7425,53	1
	50	1365	6834,76	1
	70	956	5933,92	1
$1x1 + 2x1$	30	1483	8389,95	1
	50	1423	9530,47	1
	70	1014	7464,32	1

O menor custo das soluções apresentadas na Tabela 4.13 foi de 956, um valor próximo do dobro encontrado pelo PLIC. Os tempos na primeira vizinhança foram menores, mas as soluções também foram as piores.

A Tabela 4.14 apresenta bons resultados para a vizinhança  $2x1$ , embora a quantidade de melhores soluções tenha sido menor em relação à mesma quantidade mostrada na Tabela 4.11 com ordenação por custo. As outras vizinhanças apresentam resultados melhores em relação à tabela com ordenação por custo, mas apenas um caso com vizinhança  $1x1$  chegou ao mesmo valor de 152. Os tempos apresentam uma melhoria considerável para a ordenação por custo, mas continuam grandes em relação aos tempos do PLIC.

Novamente a vizinhança  $2x1$  foi capaz de encontrar a solução do PLIC. A Tabela 4.15 também apresenta resultados melhores em relação à Tabela 4.12, com as outras vizinhanças chegando ao melhor valor em alguns casos, e os tempos diminuíram.

O menor valor encontrado na Tabela 4.16 é 557 que, embora seja melhor que o encontrado na Tabela 4.13, ainda não conseguiu igualar ao valor do PLIC de 543. No geral, os resultados foram melhores tanto no custo quanto nos tempos em relação a ordenação por custo, apresentando custos mais próximos e maior quantidade de tempos inferiores ao do PLIC.

Tabela 4.14: Planejamentos para IEEE - PET ordenado por  $\Pi$  - Custo PLIC = 152, Tempo PLIC = 0,10s

	Tamanho (%)	Custo	Tempo (s)	n° de soluções
$1x1$	30	155	11,37	1
	50	155	14,29	1
	70	152	16,81	1
$2x2$	30	155	95,01	1
	50	155	83,55	1
	70	161	104,0	1
$2x1$	30	152	44,44	5
	50	152	58,26	8
	70	152	91,33	5
$2x1 + 1x1$	30	152	49,77	5
	50	152	60,87	8
	70	152	95,53	6
$1x1 + 2x1$	30	152	71,62	7
	50	152	83,65	9
	70	152	104,61	10

Tabela 4.15: Planejamentos para IEEE - PETp ordenado por  $\Pi$  - Custo PLIC = 218, Tempo PLIC = 0,26s

	Tamanho (%)	Custo	Tempo (s)	n° de soluções
$1x1$	30	218	44,37	2
	50	227	52,61	2
	70	227	83,73	1
$2x2$	30	218	484,19	1
	50	250	667,59	1
	70	307	943,83	1
$2x1$	30	218	168,62	3
	50	218	325,96	4
	70	218	535,35	3
$2x1 + 1x1$	30	218	193,73	7
	50	218	342,49	4
	70	218	546,20	3
$1x1 + 2x1$	30	218	276,45	7
	50	218	466,69	6
	70	218	605,99	4

Tabela 4.16: Planejamentos para IEEE - PETpf ordenado por  $\Pi$  - Custo PLIC = 543, Tempo PLIC = 1550,5s

	Tamanho (%)	Custo	Tempo (s)	n° de soluções
$1x1$	30	653	84,32	1
	50	727	194,33	1
	70	667	240,67	1
$2x2$	30	580	826,44	1
	50	662	5105,32	1
	70	598	3353,99	1
$2x1$	30	577	355,52	1
	50	657	1717,39	1
	70	595	1394,17	1
$2x1 + 1x1$	30	577	377,7	1
	50	657	1798,2	1
	70	595	1464,25	1
$1x1 + 2x1$	30	653	478,17	1
	50	727	2950,59	1
	70	667	3655,9	1

Tabela 4.17: Planejamentos para IEEE - PET's sem ordenação

	Modelo	Custo	Tempo (s)	n° de soluções
$1x1$	PET	161	17,46	1
	PETp	250	62,75	1
	PETpf	975	188,34	1
$2x2$	PET	161	98,05	1
	PETp	277	578,73	1
	PETpf	914	6058,99	1
$2x1$	PET	152	100,13	10
	PETp	218	512,54	6
	PETpf	911	2786,85	1
$2x1 + 1x1$	PET	152	108,14	10
	PETp	218	520,18	6
	PETpf	911	2902,58	1
$1x1 + 2x1$	PET	152	144,86	10
	PETp	218	802,63	5
	PETpf	975	3222,17	1

Como ocorreu em Garver, a Tabela 4.17 apresenta os melhores valores iguais ao PLIC para PET e PETp com a vizinhança  $2x1$ , mas os tempos não ficaram tão diferentes das tabelas anteriores. Assim como nas outras formas de ordenação, o valor esperado para PETpf não foi encontrado, apesar de ter encontrado custos e tempos melhores que os encontrados com a ordenação por custo.

Comparando os resultados de PET nas tabelas nota-se que a ordenação por custo pareceu combinar melhor com tamanhos de lista grandes. A ordenação por  $\Pi$  teve resultados melhores em valor e tempo. E para todos os casos a vizinhança  $2x1$  foi capaz de encontrar a melhor solução, enquanto as outras vizinhanças tiveram mais problemas e só chegou aos 152 esperados em um caso com ordenação por  $\Pi$ .

Sobre os resultados de PETp, ambas as ordenações apresentaram resultados melhores para tamanhos de lista pequenos, mas apenas a ordenação por  $\Pi$  chegou a ter os resultados do PLIC. Os tempos dos casos mais demorados registrados nos casos com ordenação por  $\Pi$  foram menores. E novamente a vizinhança  $2x1$  foi capaz de encontrar a solução do PLIC.

Os resultados de PETpf foram ruins. Apesar de uma indicação de tempos bons para ordenação por  $\Pi$  (onde os melhores resultados foram observados), nenhum caso chegou ao valor encontrado no PLIC.

### 4.5.3 Sistema Sul

Os resultados para o Sistema Sul podem ser vistos nas Tabelas 4.18 a 4.22, seguindo o mesmo formato das tabelas apresentadas até o momento.

A Tabela 4.18 mostra que todos os resultados com a vizinhança  $2x1$  foram de mesmo custo encontrados com o PLIC, apesar do número de soluções não ser muito expressivo. Os tempos ficaram bem mais elevados novamente.

Na Tabela 4.19, apenas nos casos com o maior tamanho da lista e vizinhança  $2x1$  o valor do PLIC foi encontrado, em raras ocasiões e com tempos extremamente elevados.

A Tabela 4.20 mostra, mais uma vez, a vizinhança  $2x1$  sendo a única a encontrar mesma a solução do PLIC, o número de soluções e os tempos foram melhores que os vistos na tabela da ordenação por custo, mas os tempos continuam muito elevados.

Tabela 4.18: Planejamentos para Sul - PET ordenado pelo custo - Custo PLIC = 72,87, Tempo PLIC = 0,15s

	Tamanho (%)	Custo	Tempo (s)	n° de soluções
$1x1$	30	430,03	133,2	1
	50	302,43	139,62	1
	70	245,34	179,69	1
$2x2$	30	430,4	4903,71	1
	50	303,19	4787,39	1
	70	245,39	6278,31	1
$2x1$	30	72,87	8911,8	2
	50	72,87	7435,36	3
	70	72,87	6124,01	4
$2x1 + 1x1$	30	72,87	8931,0	2
	50	72,87	7444,98	3
	70	72,87	6139,9	4
$1x1 + 2x1$	30	72,87	8331,76	2
	50	72,87	6938,36	3
	70	72,87	6283,34	4

Tabela 4.19: Planejamentos para Sul - PETp ordenado pelo custo - Custo PLIC = 95,79, Tempo PLIC = 0,57s

	Tamanho (%)	Custo	Tempo (s)	n° de soluções
$1x1$	30	470,35	337,09	1
	50	378,93	407,78	1
	70	309,26	476,49	1
$2x2$	30	470,35	13758,02	1
	50	379,03	14257,68	1
	70	309,26	20639,31	1
$2x1$	30	110,97	31193,09	3
	50	101,36	28462,97	1
	70	95,79	21700,54	1
$2x1 + 1x1$	30	110,97	31218,32	3
	50	101,36	28501,13	1
	70	95,79	21730,66	1
$1x1 + 2x1$	30	110,97	30050,13	3
	50	101,36	24947,35	1
	70	95,79	20519,31	2

Tabela 4.20: Planejamentos para Sul - PET ordenado por  $\Pi$  - Custo PLIC = 72,87, Tempo PLIC = 0,15s

	Tamanho (%)	Custo	Tempo (s)	n° de soluções
$1x1$	30	97,91	135,51	1
	50	126,69	175,48	1
	70	88,91	155,48	1
$2x2$	30	97,91	3640,71	1
	50	126,69	6268,32	1
	70	88,91	3667,98	1
$2x1$	30	72,87	1483,66	3
	50	72,87	2296,67	4
	70	72,87	3425,37	6
$2x1 + 1x1$	30	72,87	1498,95	3
	50	72,87	2314,2	4
	70	72,87	3436,17	6
$1x1 + 2x1$	30	72,87	2190,94	5
	50	72,87	3243,86	4
	70	72,87	3794,87	7

Tabela 4.21: Planejamentos para Sul - PETp ordenado por  $\Pi$  - Custo PLIC = 95,79, Tempo PLIC = 0,57s

	Tamanho (%)	Custo	Tempo (s)	n° de soluções
$1x1$	30	107,48	280,94	1
	50	150,60	557,03	1
	70	213,71	690,98	1
$2x2$	30	107,48	13190,28	1
	50	149,39	20438,0	1
	70	213,71	28546,32	1
$2x1$	30	95,79	2780,04	1
	50	101,36	10136,09	1
	70	101,36	19771,89	1
$2x1 + 1x1$	30	95,79	2813,0	1
	50	101,36	10165,36	1
	70	101,36	19810,03	1
$1x1 + 2x1$	30	95,79	4129,83	1
	50	101,36	11796,51	1
	70	101,36	21459,92	1

Tabela 4.22: Planejamentos para Sul - PET's sem ordenação

	Tamanho (%)	Custo	Tempo (s)	n° de soluções
$1x1$	PET	225,63	152,35	1
	PETp	163,27	446,21	1
$2x2$	PET	195,64	3944,38	1
	PETp	164,23	16877,47	1
$2x1$	PET	72,87	4878,65	2
	PETp	95,79	19460,52	1
$2x1 + 1x1$	PET	72,87	4894,56	2
	PETp	95,79	19496,81	1
$1x1 + 2x1$	PET	72,87	5378,58	2
	PETp	95,79	20257,78	2

Ao contrário da ordenação por custo, agora foi apenas nos casos com o menor tamanho da lista, em conjunto com a vizinhança  $2x1$  que o valor igual ao do PLIC foi encontrado como mostra a Tabela 4.21. Observa-se uma redução na maioria dos tempos e uma melhora nos resultados das primeiras vizinhanças, ainda que o melhor valor ainda não tenha sido alcançado.

Como ocorreu nos sistemas anteriores, a Tabela 4.22 mostra que os valores das soluções do PLIC foram registrados para PET e PETp com a vizinhança  $2x1$ , os tempos de PET ficaram entre os tempos das ordenações enquanto os tempos de PETp foram similares aos tempos vistos nas ordenações.

Para este sistema não foram realizados estudos de PETpf por questão de tempo, mas as expectativas também não eram muito positivas observando os valores de PETpf para o Sistema IEEE e de PETp para o Sul.

Comparando os resultados de PET nas tabelas nota-se que a ordenação por custo pareceu combinar melhor com tamanhos de lista grandes. Porém, a ordenação por  $\Pi$  teve resultados melhores em valores e tempos. E para todos os casos, a vizinhança  $2x1$  encontra os melhores resultados.

Sobre os resultados de PETp, a ordenação por custo teve resultados melhores conforme o tamanho da lista aumentava, enquanto que os resultados melhores na ordenação por  $\Pi$  ocorreram para tamanhos de lista pequenos, com resultados e tempos sendo geralmente melhores na segunda ordenação. A vizinhança  $2x1$  novamente é a única a encontrar as melhores soluções.

#### 4.5.4 Análise dos resultados

A partir das análises dos resultados apresentadas nas seções anteriores, é possível fazer as seguintes considerações:

1. A vizinhança  $2x1$  se destacou das outras opções. As combinações das vizinhanças variáveis mostraram uma quantidade de resultados igual ou melhor que a vizinhança  $2x1$  sozinha, porém as vizinhanças variáveis também resultavam no aumento do tempo de execução.
2. Tanto a ordenação por  $\Pi$  como a ordenação por custo tiveram bons resultados, e pareceram funcionar melhor com tamanhos diferentes da lista restrita de candidatos. Em relação aos tempos, a ordenação por  $\Pi$  apresentou os menores valores.
3. O parâmetro tamanho da lista de candidatos isoladamente não pareceu ter muito impacto nos valores de custo das soluções, mas uma lista menor geralmente resultou tempos menores. O tamanho de 30% também apresentou uma boa combinação com a ordenação por  $\Pi$ .

Desta forma, a escolha de configuração que apresenta os melhores resultados foi a que possui vizinhança  $2x1$ , ordenação por  $\Pi$  e tamanho da lista de candidatos de 30%.

### 4.6 Estudo comparativo entre os métodos PLIC e GRASP\_PET

As Tabelas de 4.23 a 4.25 comparam, para cada sistema, os resultados obtidos por três métodos (numerados de 1 a 3 e identificados na segunda coluna), a saber: Método 1, PLIC; Método 2, GRASP\_PET com a configuração apresentada na seção anterior (4.5.4) e Método 3, GRASP\_PET com a configuração escolhida em FIGUEIREDO *et al.* (2011). Lembrando que em FIGUEIREDO *et al.* (2011) a configuração escolhida teve como vizinhança  $2x2$ , ordenação por  $\Pi$  e tamanho da lista de 70%, porém o modelo adotado considera a reconfiguração e não possui representação de perdas ou confiabilidade.

As tabelas ainda informam na primeira coluna o modelo, na terceira coluna os custos das melhores soluções, na quarta os tempos de execução e na última coluna é indicado o número de soluções (quando aplicável) entre as 10 iterações que resultaram no custo.



Tabela 4.23: Planejamentos para Garver - Comparação

	Método	Custo	Tempo (s)	nº de soluções
PET	1	110	0,04	-
	2	110	1,74	5
	3	130	1,48	1
PETp	1	130	0,07	-
	2	130	3,59	5
	3	180	1,77	2
PETpf	1	190	1,28	-
	2	180	21,87	2
	3	258	31,66	1

Tabela 4.24: Planejamentos para IEEE - Comparação

	Método	Custo	Tempo (s)	nº de soluções
PET	1	152	0,10	-
	2	152	44,44	5
	3	161	104,0	1
PETp	1	218	0,26	-
	2	218	168,62	3
	3	307	943,83	1
PETpf	1	543	1550,50	-
	2	577	355,52	1
	3	598	3353,99	1

Tabela 4.25: Planejamentos para Sul - Comparação

	Método	Custo	Tempo (s)	nº de soluções
PET	1	72,87	244,64	-
	2	72,87	1483,66	3
	3	88,91	3667,98	1
PETp	1	95,79	1380,04	-
	2	95,79	2780,04	1
	3	213,71	28546,32	1

Considerando os Modelos PET e PETp, nota-se nas tabelas que, de um total de seis casos, o Algoritmo GRASP.PET obteve em todos os casos o mesmo valor da solução obtida pelo método de referência, PLIC. Entretanto, os tempos computacionais obtidos pelo algoritmo proposto são muito piores do que os do método PLIC. O que é possível concluir é que, para os modelos e sistemas testados, o método proposto é inferior ao método PLIC. Considerando o modelo que trata da confiabilidade (PETpf), o algoritmo proposto superou o Método PLIC em uma situação, alcançando melhor custo para o Sistema Garver, embora, de dez iterações, este fato tenha ocorrido apenas duas vezes. Para o Sistema IEEE, o tempo obtido pelo Método 2 foi bem melhor porém a qualidade da solução é inferior. Comparando-se as duas configurações do GRASP, percebe-se que a configuração proposta (Método 2) superou, nas dez iterações, a configuração definida em FIGUEIREDO *et al.* (2011) (Método 3).

# Capítulo 5

## Conclusões

O planejamento da expansão dos sistemas de potência é realizado para que o sistema cumpra sua função de modo confiável ao longo dos anos. Por ser um planejamento complexo, ele é normalmente dividido em modelos menores e simplificados, por exemplo, representando o fluxo em formulações DC.

O próprio modelo DC já possui variações com maior ou menor representação características do sistema e nota-se na literatura que trabalhos recentes consideram modelos com apenas um foco particular, por exemplo a confiabilidade do sistema resultante, ou a inclusão das perdas de potência nos circuitos.

O presente trabalho de final de graduação procurou estudar, analisar e propor alterações para os métodos de solução apresentados em FIGUEIREDO *et al.* (2011) e BINATO *et al.* (2001), ambos baseados na Metaheurística GRASP com o objetivo de buscar reduzir os custos computacionais encontrados em ARAUJO (2012). Como alteração no método GRASP, considerou-se diferentes vizinhanças para o procedimento de busca local e diferentes cardinalidades para a lista restrita de candidatos da fase de construção do GRASP. Chamou-se de GRASP\_PET o algoritmo desenvolvido resultante deste estudo que considerou ainda modelagem com representação de perdas e de confiabilidade. Para avaliar a eficiência do algoritmo utilizou-se como referência o método exato, apresentado em ARAUJO (2012), baseado na representação do problema da expansão da transmissão como um problema de programação linear com variáveis inteiras e contínuas, PLIC.

Comparando-se os dois métodos, executados no mesmo ambiente computacional, o GRASP\_PET não conseguiu alcançar seu principal objetivo que era o de obter soluções de qualidade com tempos computacionais menores do que os obtidos com o PLIC, devido à melhora encontrada na nova implementação deste último método. Por outro lado, pode-se considerar uma contribuição deste trabalho, a nova implementação do método PLIC que se mostrou superior, em termos de qualidade de solução e tempos computacionais, à versão original apresentada em ARAUJO (2012). Também é possível destacar como uma contribuição deste trabalho a utilização da

vizinhança  $2 \times 1$  que superou, em termos de qualidade de solução e tempos computacionais, outras vizinhanças utilizadas nos trabalhos FIGUEIREDO *et al.* (2011) e BINATO *et al.* (2001), mostrando capacidade para encontrar soluções ótimas até para uma construção inicial completamente aleatória.

A melhora no desempenho do método PLIC permite que seu estudo seja ampliado com modificações no modelo como a representação de diferentes cenários de geração ou a falha de mais de um equipamento ao mesmo tempo. Entre outras possibilidades de trabalhos futuros existem o estudo de outras heurísticas e principalmente considerar um modelo de PET com fluxo AC, uma vez que o horizonte do planejamento deve ser muito longo para a utilização do fluxo DC e talvez não seja tão interessante evoluir muito com este modelo pela quantidade de incertezas devidas ao longo horizonte.

# Referências Bibliográficas

- ALGUACIL, N., MOTTO, A., CONEJO, A., 2003, “Transmission expansion planning: a mixed-integer LP approach”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 18, n. 3 (aug), pp. 1070 –1077.
- ARAUJO, P. F. M., 2012, *Planejamento da Expansão da Transmissão Considerando Perdas, Reconfiguração e Confiabilidade*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.
- ARAUJO, P., MOULIN, L. S., POSS, M., et al., 2012, “Cost/benefit analysis of losses and reliability criteria for transmission planning”, *SEPOPE*.
- ASAKURA, T., GENJI, T., YURA, T., et al., 2003, “Long-term distribution network expansion planning by network reconfiguration and generation of construction plans”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 18, n. 3 (aug.), pp. 1196 – 1204.
- BAHIENSE, L., OLIVEIRA, G., PEREIRA, M., et al., 2001, “A Mixed Integer Disjunctive Model for Transmission Network Expansion”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 16, n. 3 (ago).
- BINATO, S., 2000, *Expansão Ótima de Sistemas de Transmissão Através de Decomposição de Benders e Técnicas de Planos Cortantes*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.
- BINATO, S., OLIVEIRA, G. C., ARAUJO, J. L., 2001, “A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Transmission Expansion Planning”, *Power Engineering Review, IEEE*, v. 21, n. 4 (april), pp. 70 –71.
- DA SILVA, A., SALES, W., RESENDE, L., et al., 2006, “Evolution Strategies to Transmission Expansion Planning Considering Unreliability Costs”. In: *Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006. PMAAPS 2006. International Conference on*, pp. 1 –7, june.
- DA SILVA, A., MANSO, L., DE RESENDE, L., et al., 2008, “Tabu Search Applied to Transmission Expansion Planning Considering Losses and Interrup-

- tion Costs”. In: *Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2008. PMAPS '08. Proceedings of the 10th International Conference on*, pp. 1–7, may.
- DE LA TORRE, S., CONEJO, A., CONTRERAS, J., 2008, “Transmission Expansion Planning in Electricity Markets”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 23, n. 1 (feb.), pp. 238–248.
- DE OLIVEIRA, E., DA SILVA, I.C., J., PEREIRA, J., et al., 2005, “Transmission System Expansion Planning Using a Sigmoid Function to Handle Integer Investment Variables”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 20, n. 3 (aug.), pp. 1616–1621.
- FEO, T., RESENDE, M., 1989, “A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem”, *Operations Research Letters*, v. 8 (abr), pp. 67–71.
- FIGUEIREDO, R., SILVA, P., POSS, M., 2011, “Uma meta-heurística GRASP para o problema de planejamento de expansão de redes de transmissão com redimensionamento”, *XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, (aug.).
- GARVER, L., 1970, “Transmission Network Estimation Using Linear Programming”, *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, v. PAS-89, n. 7 (set), pp. 1688–1697.
- GRIGG, C., WONG, P., ALBRECHT, P., et al., 1999, “The IEEE Reliability Test System-1996. A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 14, n. 3 (aug), pp. 1010–1020.
- HONG, Y.-Y., LUO, Y.-F., 2009, “Optimal VAR Control Considering Wind Farms Using Probabilistic Load-Flow and Gray-Based Genetic Algorithms”, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 24, n. 3 (july), pp. 1441–1449.
- HONG, Y.-Y., PEN, K.-L., 2010, “Optimal VAR Planning Considering Intermittent Wind Power Using Markov Model and Quantum Evolutionary Algorithm”, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 25, n. 4 (oct.), pp. 2987–2996.
- JALILZADEH, S., KAZEMI, A., MAHDAVI, M., et al., 2008, “TNEP considering voltage level, network losses and number of bundle lines using GA”. In: *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*,

2008. *DRPT 2008. Third International Conference on*, pp. 1580 –1585, april.
- JALILZADEH, S., KIMIYAGHALAM, A., BAGHERI, A., et al., 2010, “Application of IDPSO approach for TNEP problem considering the loss and uncertainty in load growth”. In: *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2010 International Congress on*, pp. 389 –395, oct.
- KAZEMI, A., JALILZADEH, S., MAHDAVI, M., et al., 2008, “Genetic algorithm-based investigation of load growth factor effect on the network loss in TNEP”. In: *Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference on*, pp. 764 –769, june.
- KHODAEI, A., SHAHIDEHPOUR, M., KAMALINIA, S., 2010, “Transmission Switching in Expansion Planning”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 25, n. 3 (aug.), pp. 1722 –1733.
- KONGMANY, P., PREMRUDEEPPREECHACHARN, S., CHAROENPATCHARAKIJ, K., 2008, “Transmission system development planning for Central-1 and Northern regions of Lao PDR”. In: *Power Symposium, 2008. NAPS '08. 40th North American*, pp. 1 –8, sept.
- LATORRE, G., CRUZ, R., AREIZA, J., et al., 2003, “Classification of publications and models on transmission expansion planning”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 18, n. 2 (may), pp. 938 –946.
- MLADENOVIĆ, N., HANSEN, P., 1997, “Variable neighborhood search”, *Computers and Operations Research*, v. 24, n. 11 (nov), pp. 1097–1100.
- MONTICELLI, A., SANTOS JR., A., PEREIRA, M. V. F., et al., 1982, “Interactive transmission network planning using a least-effort criterion”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. PAS-101, n. 10 (Oct), pp. 3919 –3925.
- MOULIN, L. S., POSS, M., SAGASTIZÁBAL, C., 2010, “Transmission expansion planning with re-design”, *Energy Systems, Optimization, Modeling, Simulation, and Economic Aspects*, v. 1, n. 2 (may), pp. 113 –139.

# Apêndice A

## Dados de sistemas

Nessa seção são apresentados os dados dos sistemas usados no trabalho. Os dados são divididos em 3 tabelas, uma para as barras e duas para circuitos existentes e candidatos.

### A.1 Garver

Tabela A.1: Dados das barras do sistema de Garver

Barra	Geração máxima (MW)	Carga Ativa(MW)	Carga Reativa(MVar)
1	150	80	20
2	0	240	0
3	360	40	10
4	0	160	40
5	0	240	0
6	600	0	0

Tabela A.2: Dados dos circuitos existentes do sistema de Garver

Trecho	Res. (pu)	Reat. (pu)	Cap. (MW)	Quantidade	Probabilidade de falha
1-2	0,10	0,40	100	1	0.000461
1-4	0,15	0,60	80	1	0.000691
1-5	0,5	0,20	100	1	0.000230
2-3	0,5	0,20	100	1	0.000230
2-4	0,10	0,40	100	1	0.000461
3-5	0,5	0,20	100	1	0.000230



Tabela A.3: Dados dos circuitos candidatos do sistema de Garver

Trecho	Res. (pu)	Reat. (pu)	Cap. (MW)	Custo	Máximo	Probabilidade de falha
1-2	0,10	0,40	100	40	3	0.000461
1-3	0,9	0,38	100	38	4	0.000438
1-4	0,15	0,60	80	60	3	0.000691
1-5	0,5	0,20	100	20	3	0.000230
1-6	0,17	0,68	70	68	4	0.000783
2-3	0,5	0,20	100	20	3	0.000230
2-4	0,10	0,40	100	40	3	0.000461
2-5	0,8	0,31	100	31	4	0.000357
2-6	0,8	0,30	100	30	4	0.000346
3-4	0,15	0,59	82	59	4	0.000679
3-5	0,5	0,20	100	20	3	0.000230
3-6	0,12	0,48	100	48	4	0.000553
4-5	0,16	0,63	75	63	4	0.000726
4-6	0,8	0,30	100	30	4	0.000346
5-6	0,15	0,61	78	61	4	0.000703

## A.2 IEEE 24 barras

Dados das barras do sistema IEEE 24 barras				
	Geração		Carga	
Barra	Ativa (MW)	Reativa (MVar)	Ativa (MW)	Reativa (MVar)
1	0 - 576	-150 - 240	324	66
2	0 - 576	-150 - 240	291	60
3	0	0	540	111
4	0	0	222	45
5	0	0	213	42
6	0	0	408	84
7	0 - 900	-300 - 300	375	75
8	0	0	523	105
9	0	0	525	108
10	0	0	585	120
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0 - 1773	0 - 720	795	162
14	0	-150 - 600	582	117
15	0 - 645	-150 - 330	951	192
16	0 - 465	-150 - 240	300	60
17	0	0	0	0
18	0 - 1200	-150 - 600	999	204
19	0	0	543	111
20	0	0	384	78
21	0 - 1200	-150 - 600	0	0
22	0 - 900	-180 - 288	0	0
23	0 - 1980	-375 - 930	0	0
24	0	0	0	0

Dados dos circuitos existentes do sistema IEEE 24 barras

Trecho	Res. (pu)	Reat. (pu)	Cap. (MW)	Quantidade	Probabilidade de falha
1-2	0.0026	0.0139	175	1	0.000429
1-3	0.0546	0.2112	175	1	0.00057
1-5	0.0218	0.0845	175	1	0.000369
2-4	0.0328	0.1267	175	1	0.000436
2-6	0.0497	0.1920	175	1	0.000537
3-9	0.0308	0.1190	175	1	0.000434
3-24	0.0023	0.0839	400	1	0.001717
4-9	0.0268	0.1037	175	1	0.000402
5-10	0.0228	0.0883	175	1	0.00038
6-10	0.0139	0.0605	175	1	0.001291
7-8	0.0159	0.0614	175	1	0.000335
8-9	0.0427	0.1651	175	1	0.000492
8-10	0.0427	0.1651	175	1	0.000492
9-11	0.0023	0.0839	400	1	0.001717
9-12	0.0023	0.0839	400	1	0.001717
10-11	0.0023	0.0839	400	1	0.001717
10-12	0.0023	0.0839	400	1	0.001717
11-13	0.0061	0.0476	500	1	0.000492
11-14	0.0054	0.0418	500	1	0.00048
12-13	0.0061	0.0476	500	1	0.000492
12-23	0.0124	0.0966	500	1	0.000639
13-23	0.0111	0.0865	500	1	0.000602
14-16	0.0050	0.0389	500	1	0.000467
15-16	0.0022	0.0173	500	1	0.000406
15-21	0.0063	0.0490	500	2	0.000504
15-24	0.0067	0.0519	500	1	0.000504
16-17	0.0033	0.0259	500	1	0.00043
16-19	0.0030	0.0231	500	1	0.0004268
17-18	0.0018	0.0144	500	1	0.000393
17-22	0.0135	0.1053	500	1	0.000664
18-21	0.0033	0.0259	500	2	0.00043
19-20	0.0051	0.0396	500	2	0.000467
20-23	0.0028	0.0216	500	2	0.000418
21-22	0.0087	0.0678	500	1	0.000553

Dados dos circuitos candidatos do sistema IEEE 24 barras

Trecho	Res. (pu)	Reat. (pu)	Cap. (MW)	Custo	Máximo	Probabilidade de falha
1-2	0.0026	0.0139	175	3	3	0.000429
1-3	0.0546	0.2112	175	55	3	0.00057
1-5	0.0218	0.0845	175	22	3	0.000369
1-8	0.0174	0.1344	500	35	3	0.000459
2-4	0.0328	0.1267	175	33	3	0.000436
2-6	0.0497	0.1920	175	50	3	0.000537
2-8	0.0164	0.1267	500	33	3	0.000447
3-9	0.0308	0.1190	175	31	3	0.000434
3-24	0.0023	0.0839	400	50	3	0.001717
4-9	0.0268	0.1037	175	27	3	0.000402
5-10	0.0228	0.0883	175	23	3	0.00038
6-7	0.0249	0.1920	500	50	3	0.000548
6-10	0.0139	0.0605	175	16	3	0.001291
7-8	0.0159	0.0614	175	16	3	0.000335
8-9	0.0427	0.1651	175	43	3	0.000492
8-10	0.0427	0.1651	175	43	3	0.000492
9-11	0.0023	0.0839	400	50	3	0.001717
9-12	0.0023	0.0839	400	50	3	0.001717
10-11	0.0023	0.0839	400	50	3	0.001717
10-12	0.0023	0.0839	400	50	3	0.001717
11-13	0.0061	0.0476	500	66	3	0.000492
11-14	0.0054	0.0418	500	58	3	0.00048
12-13	0.0061	0.0476	500	66	3	0.000492
12-23	0.0124	0.0966	500	134	3	0.000639
13-14	0.0058	0.0447	500	62	3	0.000629
13-23	0.0111	0.0865	500	120	3	0.000602
14-16	0.0050	0.0389	500	54	3	0.000467
14-23	0.0080	0.0620	500	86	3	0.00073
15-16	0.0022	0.0173	500	24	3	0.000406
15-21	0.0063	0.0490	500	68	3	0.000504
15-24	0.0067	0.0519	500	72	3	0.000504
16-17	0.0033	0.0259	500	36	3	0.00043
16-19	0.0030	0.0231	500	32	3	0.000427
16-23	0.0106	0.0822	500	114	3	0.000851
17-18	0.0018	0.0144	500	20	3	0.000393
17-22	0.0135	0.1053	500	146	3	0.000664

Continuação dos dados dos circuitos candidatos do sistema IEEE 24 barras

Trecho	Res. (pu)	Reat. (pu)	Cap. (MW)	Custo	Máximo	Probabilidade de falha
18-21	0.0033	0.0259	500	36	3	0.00043
19-20	0.0051	0.0396	500	55	3	0.000467
19-23	0.0078	0.0606	500	84	3	0.000723
20-23	0.0028	0.0216	500	30	3	0.000418
21-22	0.0087	0.0678	500	94	3	0.000553

### A.3 Sul do Brasil

O sistema tem 46 barras, numeradas de 1 a 46, mas algumas delas não possuem carga nem geração e não são mostradas na tabela a seguir, apesar de existirem.

Dados das barras do sistema equivalente da região sul do Brasil

Barra	Geração máxima (MW)	Carga (MW)
2	0	443.1
4	0	300.7
5	0	238
8	0	72.2
12	0	512
13	0	185.8
14	1257	0
16	2000	0
17	1050	0
19	1670	0
20	0	1091
22	0	81.9
23	0	458.1
24	0	478.2
26	0	231.9
27	220	0
28	800	0
31	700	0
32	500	0
33	0	229.1
34	748	0
35	0	216
36	0	90.1
37	300	0
38	0	216
39	600	0
40	0	262.1
42	0	1608
44	0	79.1
45	0	86.7
46	700	0

Dados dos circuitos existentes do sistema equivalente da região sul do Brasil

Trecho	Res. (pu)	Reat. (pu)	Cap. (MW)	Quantidade	Probabilidade de falha
1-7	0.00616	0.0616	270	1	0.000430321
1-2	0.01065	0.1065	270	2	0.000743994
4-9	0.00924	0.0924	270	1	0.000645508
5-9	0.01173	0.1173	270	1	0.000819463
5-8	0.01132	0.1132	270	1	0.00079081
7-8	0.01023	0.1023	270	1	0.000714662
4-5	0.00566	0.0566	270	2	0.000395405
2-5	0.00324	0.0324	270	2	0.000226345
8-13	0.01348	0.1348	240	1	0.000941696
9-14	0.01756	0.1756	220	2	0.001226742
12-14	0.0074	0.0740	270	2	0.00051696
14-18	0.01514	0.1514	240	2	0.001057666
13-18	0.01805	0.1805	220	1	0.001260953
13-20	0.01073	0.1073	270	1	0.000749604
18-20	0.01997	0.1997	200	1	0.001395086
19-21	0.00278	0.0278	1500	1	0.000525231
16-17	0.00078	0.0078	2000	1	0.000147376
17-19	0.00061	0.0061	2000	1	0.000115256
14-26	0.01614	0.1614	220	1	0.001127525
14-22	0.00840	0.0840	270	1	0.000586818
22-26	0.0079	0.0790	270	1	0.000551902
20-23	0.00932	0.0932	270	2	0.000651092
23-24	0.00774	0.0774	270	2	0.000540707
26-27	0.00832	0.0832	270	2	0.000581234
24-34	0.01647	0.1647	220	1	0.001150594
24-33	0.01448	0.1448	240	1	0.001011555
33-34	0.01265	0.1265	270	1	0.000883711
27-36	0.00915	0.0915	270	1	0.000639219
27-38	0.02080	0.2080	200	2	0.001453071
36-37	0.01057	0.1057	270	1	0.000738409
34-35	0.00491	0.0491	270	2	0.000343004
35-38	0.0198	0.1980	200	1	0.001383213
37-39	0.00283	0.0283	270	1	0.000197702
37-40	0.01281	0.1281	270	1	0.000894906
37-42	0.02105	0.2105	200	1	0.00147053
39-42	0.0203	0.2030	200	3	0.001418155

Continuação da  
tabela do dados dos circuitos existentes do sistema equivalente da região sul do Brasil

Trecho	Res. (pu)	Reat. (pu)	Cap. (MW)	Quantidade	Probabilidade de falha
40-42	0.00932	0.0932	270	1	0.000651092
38-42	0.00907	0.0907	270	3	0.000633634
32-43	0.00309	0.0309	1400	1	0.000583831
42-44	0.01206	0.1206	270	1	0.000842506
44-45	0.01864	0.1864	200	1	0.001302185
19-32	0.00195	0.0195	1800	1	0.000368443
46-19	0.00222	0.0222	1800	1	0.000419456
46-16	0.00203	0.0203	1800	1	0.000383549
18-19	0.00125	0.0125	600	1	0.004269555
20-21	0.00125	0.0125	600	1	0.004269555
42-43	0.0125	0.0125	600	1	0.004269555



Dados dos circuitos candidatos do sistema equivalente da região sul do Brasil

Trecho	Res. (pu)	Reat. (pu)	Cap. (MW)	Custo	Máximo	Probabilidade de falha
1-7	0.00616	0.0616	270	4.349	3	0.000430321
1-2	0.01065	0.1065	270	7.076	3	0.000743994
4-9	0.00924	0.0924	270	6.217	3	0.000645508
5-9	0.01173	0.1173	270	7.732	3	0.000819463
5-8	0.01132	0.1132	270	7.480	3	0.00079081
7-8	0.01023	0.1023	270	6.823	3	0.000714662
4-5	0.00566	0.0566	270	4.046	3	0.000395405
2-5	0.00324	0.0324	270	2.581	3	0.000226345
8-13	0.01348	0.1348	240	8.793	3	0.000941696
9-14	0.01756	0.1756	220	11.267	3	0.001226742
12-14	0.00740	0.0740	270	5.106	3	0.00051696
14-18	0.01514	0.1514	240	9.803	3	0.001057666
13-18	0.01805	0.1805	220	11.570	3	0.001260953
13-20	0.01073	0.1073	270	7.126	3	0.000749604
18-20	0.01997	0.1997	200	12.732	3	0.001395086
19-21	0.00278	0.0278	1500	32.632	3	0.000525231
16-17	0.00078	0.0078	2000	10.505	3	0.000147376
17-19	0.00061	0.0061	2000	8.715	3	0.000115256
14-26	0.01614	0.1614	220	10.409	3	0.001127525
14-22	0.0084	0.0840	270	5.712	3	0.000586818
22-26	0.0079	0.0790	270	5.409	3	0.000551902
20-23	0.00932	0.0932	270	6.268	3	0.000651092
23-24	0.00774	0.0774	270	5.308	3	0.000540707
26-27	0.00832	0.0832	270	5.662	3	0.000581234
24-34	0.01647	0.1647	220	10.611	3	0.001150594
24-33	0.01448	0.1448	240	9.399	3	0.001011555
33-34	0.01265	0.1265	270	8.288	3	0.000883711
27-36	0.00915	0.0915	270	6.167	3	0.000639219
27-38	0.02080	0.2080	200	13.237	3	0.001453071
36-37	0.01057	0.1057	270	7.025	3	0.000738409
34-35	0.00491	0.0491	270	3.591	3	0.000343004
35-38	0.0198	0.1980	200	12.631	3	0.001383213
37-39	0.00283	0.0283	270	2.329	3	0.000197702
37-40	0.01281	0.1281	270	8.389	3	0.000894906
37-42	0.02105	0.2105	200	13.388	3	0.00147053
39-42	0.0203	0.2030	200	12.934	3	0.001418155

Continuação dos dados dos circuitos candidatos do sistema equivalente da região  
sul do Brasil

Trecho	Res. (pu)	Reat. (pu)	Cap. (MW)	Custo	Máximo	Probabilidade de falha
40-42	0.00932	0.0932	270	6.268	3	0.000651092
38-42	0.00907	0.0907	270	6.116	3	0.000633634
32-43	0.00309	0.0309	1400	35.957	3	0.000583831
42-44	0.01206	0.1206	270	7.934	3	0.000842506
44-45	0.01864	0.1864	200	11.924	3	0.001302185
19-32	0.00195	0.0195	1800	23.423	3	0.000368443
46-19	0.00222	0.0222	1800	26.365	3	0.000419456
46-16	0.00203	0.0203	1800	24.319	3	0.000383549
18-19	0.00125	0.0125	600	8.178	3	0.004269555
20-21	0.00125	0.0125	600	8.178	3	0.004269555
42-43	0.00125	0.0125	600	8.178	3	0.004269555
46-6	0.00128	0.0128	2000	16.005	3	0.000241849
5-6	0.00125	0.0125	600	8.178	3	0.004269555
26-29	0.00541	0.0541	270	3.894	3	0.000377921
29-30	0.00125	0.0125	600	8.178	3	0.004269555
28-30	0.00058	0.0058	2000	8.331	3	0.000109595
28-31	0.00053	0.0053	2000	7.819	3	0.000100133
31-32	0.00046	0.0046	2000	7.052	3	0.0000869192
24-25	0.00125	0.0125	600	8.178	3	0.004269555
19-25	0.00325	0.0325	1400	37.748	3	0.000614078