



## PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO CONSIDERANDO PERDAS, RECONFIGURAÇÃO E CONFIABILIDADE

Paulo Fernando de Matos Araujo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Djalma Mosqueira Falcão  
Claudia Alejandra Sagastizábal

Rio de Janeiro  
Março de 2012

PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO CONSIDERANDO  
PERDAS, RECONFIGURAÇÃO E CONFIABILIDADE

Paulo Fernando de Matos Araujo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO  
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE  
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. Djalma Mosqueira Falcão, Ph.D.

---

Pesq<sup>a</sup>. Claudia Alejandra Sagastizábal, D. Habil

---

Prof<sup>a</sup>. Carmen Lucia Tancredo Borges, D.Sc.

---

Prof<sup>a</sup>. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2012

Araujo, Paulo Fernando de Matos

Planejamento da Expansão da Transmissão Considerando Perdas, Reconfiguração e Confiabilidade/Paulo Fernando de Matos Araujo. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XV, 92 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Djalma Mosqueira Falcão

Claudia Alejandra Sagastizábal

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 73 – 76.

1. Planejamento da Expansão. 2. transmissão. 3. otimização. 4. reconfiguração. 5. perda ativa. 6. confiabilidade. 7. distribuição. I. Falcão, Djalma Mosqueira *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

# Agradecimentos

Agradeço aos pesquisadores Claudia Alejandra Sagastizábal e Luciano de Souza Moulin pela oportunidade no CEPEL e pelo tempo e dedicação usados para a realização deste trabalho; ao professor Djalma Mosqueira Falcão pela orientação no mestrado; ao Michael Poss pela colaboração, por permitir o acesso ao cluster da Université Libre de Bruxelles e principalmente por permitir que eu trabalhasse em cima dos códigos realizados em seu trabalho anterior; a todos professores do mestrado que, junto ao professor Djalma, me fizeram ter certeza de ter escolhido a área certa para me aprofundar; e a todos do CEPEL que contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO CONSIDERANDO PERDAS, RECONFIGURAÇÃO E CONFIABILIDADE

Paulo Fernando de Matos Araujo

Março/2012

Orientadores: Djalma Mosqueira Falcão  
Claudia Alejandra Sagastizábal

Programa: Engenharia Elétrica

A função de um sistema de transmissão é levar a energia para os centros de consumo, normalmente muito longe dos geradores pela grande utilização de hidrelétricas no Brasil. 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 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 por equações simplificadas, usando, por exemplo, um fluxo DC. Este trabalho estuda três modificações do modelo DC, relacionadas com a técnica chamada de reconfiguração, com a modelagem de perdas ativas, e com a confiabilidade. Estes aspectos já tinham sido considerados na literatura separadamente, mas não integrados de maneira conjunta, como neste trabalho. Assim sendo, a validação dos resultados foi realizada avaliando os planos obtidos mediante um análise com fluxo AC. Esta validação mostra que para diversos sistemas conhecidos na literatura os modelos propostos apresentam uma operação normal no fluxo AC bem como boa confiabilidade, atendendo ao critério N-1. A versatilidade e flexibilidade do modelo desenvolvido ficam confirmadas pelo estudo de caso realizado para expandir uma rede de alta tensão de um sistema de distribuição. Com efeito, a ferramenta desenvolvida permite à empresa distribuidora definir uma expansão que divide o sistema em dois sistemas regionais, seccionando linhas existentes a novas subestações quando necessário. Como esperado, os resultados mostram que o fato de dispor de dois regionais resulta em planos mais caros quando comparados com a expansão em um sistema único, principalmente quando critérios de confiabilidade devem ser atendidos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

Paulo Fernando de Matos Araujo

March/2012

Advisors: Djalma Mosqueira Falcão  
Claudia Alejandra Sagastizábal

Department: Electrical Engineering

The purpose of a power transmission system is to deliver electricity to demand centers. Brazil power is mostly of hydraulic nature, so usually consumption centers are far away from power plants and the network is large. When planning the expansion of a transmission system, it is important to find investment with minimal costs that ensure that the system will perform its functions when faced to new values of generation and demand. Since in the long term many data is uncertain, the network is often modeled by simplified relations, for instance, with a DC representation for the power flow. This work considers three different modifications of the well-known DC model, referring to the so-called redesign technique, to the modeling of active losses, and to satisfaction of reliability criterions. Even though these issues had already been addressed separately in the literature, their joint consideration is a novel feature of this work. For this reason, results are assessed by evaluating the expansion plans by means of an AC power flow of the resulting networks. The numerical results show that for various electrical systems known in the literature the proposed models exhibit a normal AC flow operation, satisfying the N-1 reliability criterion. The versatility and flexibility of the approach is confirmed by the case study developed for a high tension distribution network. Thanks to the proposed model, the distribution company can analyze the interest of expanding its network by dividing it into two separate regional systems, cutting-off some existing lines if necessary. When compared to expanding the system into a unique network, the results confirm the intuition that the fact of having two regional subsystems leads to more expensive investments, especially if reliability is a concern.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Revisão bibliográfica . . . . .	2
1.2 Objetivo . . . . .	5
1.2.1 Conteúdo e contribuições do trabalho . . . . .	6
<b>2 O Planejamento da Expansão da Transmissão</b>	<b>7</b>
2.1 Modelagem . . . . .	7
2.2 Modelo de Transportes . . . . .	8
2.3 Modelo DC . . . . .	9
2.3.1 Modelo Híbrido . . . . .	10
2.3.2 Modelo Disjuntivo . . . . .	11
<b>3 Modelos Alternativos</b>	<b>14</b>
3.1 Reconfiguração . . . . .	14
3.1.1 Expansão de sistemas de distribuição de alta tensão . . . . .	16
3.2 Perda de Potência Ativa nos circuitos . . . . .	16
3.2.1 Modelagem de perdas: primeira variante . . . . .	17
3.2.2 Modelagem de perdas: segunda variante . . . . .	22
3.3 Critério de confiabilidade N-1 . . . . .	23
3.3.1 Critério de confiabilidade N-1/2 . . . . .	24
3.3.2 Modelo aplicado . . . . .	25
3.4 Modelo completo . . . . .	27
3.5 Implementação e resolução dos modelos . . . . .	28
3.5.1 Variável binária . . . . .	28

3.5.2	Big M . . . . .	28
3.5.3	Outras informações . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Planejamento da Expansão da Transmissão - Testes e Resultados</b>	<b>32</b>
4.1	Garver com redespacho . . . . .	32
4.1.1	Planejamento clássico . . . . .	33
4.1.2	Planejamento com perdas . . . . .	33
4.1.3	Planejamento com confiabilidade . . . . .	34
4.2	Garver sem redespacho . . . . .	35
4.2.1	Planejamento clássico . . . . .	35
4.2.2	Planejamento com perdas . . . . .	35
4.2.3	Planejamento com confiabilidade . . . . .	36
4.3	IEEE 24 barras . . . . .	38
4.3.1	Planejamento clássico . . . . .	38
4.3.2	Planejamento com perdas . . . . .	39
4.3.3	Planejamento com confiabilidade . . . . .	39
4.4	Sul do Brasil . . . . .	42
4.4.1	Planejamento clássico . . . . .	43
4.4.2	Planejamento com perdas . . . . .	44
4.4.3	Planejamento com confiabilidade . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Análise AC</b>	<b>48</b>
5.1	Garver com redespacho . . . . .	48
5.1.1	Planejamento clássico . . . . .	48
5.1.2	Planejamento com perdas . . . . .	48
5.1.3	Planejamento com confiabilidade . . . . .	49
5.2	Garver sem redespacho . . . . .	49
5.3	IEEE 24 barras . . . . .	50
5.3.1	Planejamento clássico . . . . .	51
5.3.2	Planejamento com perdas . . . . .	51
5.3.3	Planejamento com confiabilidade . . . . .	51
5.4	Sul do Brasil . . . . .	52
5.4.1	Planejamento clássico . . . . .	52
5.4.2	Planejamento com perdas . . . . .	52
5.4.3	Planejamento com confiabilidade . . . . .	52
5.5	Observações gerais . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Planejamento da Expansão no Sistema de Distribuição de Alta Tensão - Testes e Resultados</b>	<b>54</b>
6.1	O sistema de distribuição . . . . .	54



6.2	Planejamento . . . . .	55
6.2.1	Reconfiguração . . . . .	56
6.2.2	Um sistema único de distribuição . . . . .	57
6.2.3	Divisão em dois sistemas de distribuição . . . . .	62
6.2.4	Observações . . . . .	67
<b>7</b>	<b>Conclusões e linhas de trabalhos futuros</b>	<b>70</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>73</b>
<b>A</b>	<b>Dados de sistemas e outros resultados</b>	<b>77</b>
A.1	Dados de sistemas . . . . .	77
A.1.1	Garver . . . . .	77
A.1.2	IEEE 24 barras . . . . .	79
A.1.3	Sul do Brasil . . . . .	83
A.1.4	Sistema de distribuição . . . . .	88
A.2	Outros resultados . . . . .	91
A.2.1	IEEE 24 barras . . . . .	91
A.2.2	Sul do Brasil . . . . .	92

# Lista de Figuras

3.1	Exemplo de uma parábola “linearizada” em L=4 blocos. . . . .	19
3.2	Representação da função valor absoluto com variáveis positivas. . . .	20
4.1	Sistema de Garver inicial. . . . .	33
4.2	Sistema IEEE 24 barras inicial . . . . .	38
4.3	Sensibilidade do custo de investimento em relação ao índice de severidade para IEEE 24 barras. . . . .	43
4.4	Sistema reduzido da região sul do Brasil . . . . .	44
6.1	Sistema de Distribuição de uma cidade nordestina . . . . .	55
6.2	Divisão 1 do sistema de distribuição. . . . .	64
6.3	Divisão 2 do sistema de distribuição. . . . .	65
6.4	Novos circuitos para o planejamento da divisão 1 . . . . .	66
6.5	Novos circuitos para o planejamento da divisão 2 . . . . .	67
6.6	Novos circuitos para o planejamento da divisão 1 com confiabilidade. . . . .	68
6.7	Novos circuitos para o planejamento da divisão 2 com confiabilidade. . . . .	69

# Lista de Tabelas

4.1	Novos circuitos para Garver no PET com redespacho . . . . .	33
4.2	Novos circuitos para Garver no PETp com redespacho . . . . .	34
4.3	Novos circuitos em Garver para diferentes PET's com confiabilidade N-1 e redespacho . . . . .	35
4.4	Índices de severidade para os diferentes planejamentos com redespacho	35
4.5	Valores de geração usadas para os planejamentos sem redespacho . . .	35
4.6	Novos circuitos para Garver no PET sem redespacho e barra 6 como referência . . . . .	36
4.7	Novos circuitos para Garver no PETp sem redespacho e barra 6 como referência . . . . .	36
4.8	Novos circuitos para Garver no PETp sem redespacho e barra 1 como referência . . . . .	36
4.9	Novos circuitos em Garver para diferentes PET's com confiabilidade N-1 e redespacho . . . . .	37
4.10	Índices de severidade para os diferentes planejamentos sem redespacho	37
4.11	Novos circuitos para IEEE 24 barras no PET . . . . .	39
4.12	Novos circuitos para IEEE 24 barras no PETp . . . . .	39
4.13	Novos circuitos em IEEE 24 barras para PETp com confiabilidade . .	40
4.14	Novos circuitos em IEEE 24 barras para PETp em etapas com confi- abilidade . . . . .	41
4.15	Índices de severidade para os diferentes planejamentos de IEEE 24 barras . . . . .	42
4.16	Novos circuitos para o sistema Sul no PET e PETr . . . . .	45
4.17	Novos circuitos para o sistema Sul no PETp e PETpr . . . . .	45
4.18	Novos circuitos para o sistema Sul com confiabilidade. . . . .	46
4.19	Novos circuitos para o sistema Sul em etapas com confiabilidade. . . .	47
4.20	Índices de severidade para os diferentes planejamentos do sistema Sul.	47
5.1	Comparação entre índices de severidade para diferentes planos para Garver com redespacho - NH2 e modelos DC aplicados . . . . .	49

5.2	Comparação entre índices de severidade para diferentes planos para Garver sem redespacho - NH2 e modelos DC aplicados . . . . .	50
5.3	Comparação entre índices de severidade para os diferentes planejamentos de IEEE 24 barras - NH2 e modelos DC aplicados . . . . .	52
5.4	Comparação entre índices de severidade para os diferentes planejamentos do sistema Sul - NH2 e modelos DC aplicados . . . . .	53
6.1	Transformadores adicionados ao sistema de distribuição . . . . .	56
6.2	Trechos do sistema de distribuição que podem ser quebrados . . . . .	57
6.3	Novos circuitos para o sistema de distribuição no PET e PETr . . . . .	57
6.4	Novos circuitos para o sistema de distribuição no PETp e PETrp . . . . .	58
6.5	Novos circuitos para o sistema de distribuição no PETp+ e PETrp+ . . . . .	60
6.6	Comparação dos custos totais para a distribuidora dos planos com perda de potência . . . . .	60
6.7	Novos circuitos para o sistema de distribuição com confiabilidade . . . . .	61
6.8	Índices de severidade para os diferentes planejamentos do sistema de distribuição. . . . .	62
6.9	Circuitos adicionados e removidos para a divisão do sistema. . . . .	63
6.10	Distribuição das barras nos regionais. . . . .	64
6.11	Novos circuitos para o sistema de distribuição dividido. . . . .	66
6.12	Circuitos adicionados e removidos para a divisão do sistema de distribuição. . . . .	68
6.13	Índices de severidade para os diferentes planejamentos da divisão do sistema de distribuição. . . . .	68
A.1	Dados das barras do sistema de Garver . . . . .	77
A.2	Dados dos circuitos existentes do sistema de Garver . . . . .	77
A.3	Dados dos circuitos candidatos do sistema de Garver . . . . .	78

# Lista de Símbolos

$B$	Conjunto de barras existentes e possíveis no sistema, p. 9
$L$	Quantidade de blocos usados na linearização por partes, p. 18
$M_{km}$	Parâmetro disjuntivo para o trecho entre as barras $k$ e $m$ , p. 11
$V_k$	Tensão na barra $k$ , p. 9
$\Delta\delta$	Varição angular máxima para cada bloco, p. 18
$\Omega$	Conjunto dos circuitos existentes e candidatos do sistema, p. 15
$\Omega^0$	Conjunto dos circuitos existentes do sistema, p. 9
$\Omega^1$	Conjunto dos circuitos candidatos do sistema, p. 8
$\Omega_k$	Conjunto de circuitos entre a barra $k$ e outras barras, p. 9
$\Phi$	Conjunto de circuitos com falha representada, p. 25
$\bar{g}_k$	Limite de geração na barra $k$ , p. 9
$\bar{p}_{km}$	Limite de capacidade do circuito entre as barras $k$ e $m$ , p. 9
$\delta_{km}^+$	Varição angular positiva entre as barras $k$ e $m$ , p. 19
$\delta_{km}^-$	Módulo da variação angular negativa entre as barras $k$ e $m$ , p. 19
$\delta_{km}(l)$	Varição angular entre as barras $k$ e $m$ no bloco $l$ -ésimo, p. 18
$\eta_{km}$	Condutância do circuito entre as barras $k$ e $m$ , p. 17
$\gamma_{km}$	Susceptância do circuito entre as barras $k$ e $m$ , p. 9
$\theta_{km}$	Diferença entre os ângulos das barras $k$ e $m$ , p. 9

$\theta_k$	Ângulo da tensão na 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
$p_h^k$	Probabilidade do estado de falha no circuito $h$ vezes o custo unitário de um corte de carga na barra $k$ , p. 24
$p_h$	Probabilidade do estado de falha no circuito $h$ , p. 25
$p_{km}$	Fluxo de potência ativa com perdas no circuito entre as barras $k$ e $m$ , p. 17
$q_{km}$	Perda de potência ativa no circuito entre as barras $k$ e $m$ , p. 17
$u_h^k$	Corte de carga em $k$ causada por falha em $h$ , p. 24
$x_{km}$	Variável binária que indica a existência ou não do circuito entre as barras $k$ e $m$ no plano, p. 7

# Lista de Abreviaturas

AC	Alternating Current, Corrente Alternada, p. 6
AG	Algoritmos Genéticos, p. 3
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica, p. 58
DC	Direct Current, Corrente Contínua, p. 2
EPE	Empresa de Pesquisa Energética, p. 58
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
PLK	Primeira Lei de Kirchoff, p. 8
SIN	Sistema Interligado Nacional, p. 25
SLK	Segunda Lei de Kirchoff, p. 9

# Capítulo 1

## Introdução

A função de um sistema de transmissão é levar a energia gerada para os centros de consumo. Em geral, esses sistemas costumam ser grandes pelo fato de terem sido planejados no passado, tendo unidades geradoras longe dos centros de consumo e sem o atual incentivo à geração distribuída e micro-geração.

O planejamento da expansão dos sistemas de potência é realizado para que o sistema continue cumprindo a 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, e de redes de alta tensão de um sistema de distribuição (normalmente conhecidos como Sistemas de Subtransmissão), chamados de PET a seguir. O problema do PET considerado 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 ser 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 é a opção mais usual, e existem apenas linhas e transformadores (com características de linhas) como candidatos.

Já no médio e curto prazo, o planejamento precisa ser mais acurado, pois os estudos são realizados perto do início das obras. Assim, além de possuir dados mais detalhados sobre o sistema, outros equipamentos, como compensadores, passam a integrar o conjunto de investimentos candidatos, e o fluxo precisa ser representado em corrente alternada. A junção entre os diferentes modelos é assegurada pelo fato que planos de longo prazo podem ser tomados como ponto de partida no planejamento de curto prazo, que define conexões e/ou adições ao plano inicial.



O PET toma como base a rede elétrica atual, que foi planejada no passado, tendo em conta alguns fatores críticos, específicos para o sistema de energia considerado. Para sistemas com predominância hidráulica como o do Brasil, a quantidade de energia hídrica é fundamental, porque os centros de geração geralmente estão 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, especialmente 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

Esta dissertação tem como ponto de partida o trabalho realizado em MOULIN *et al.* (2010). 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).

Entre os artigos estudados para esta dissertação, temos em ASAKURA *et al.* (2003) o uso de 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), uma heurística foi feita baseada em duas estratégias: representar as variáveis inteiras com variáveis contínuas usando uma função de convolução, e modificar as equações de fluxo DC para permitir a representação de perdas no sistema. O algoritmo possui duas etapas iterativas, primeiro é determinado o Fluxo de Potência Ótimo 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 (calculada pelo problema de FPO) fique menor que uma tolerância dada. Uma nova etapa verifica após 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 foi o mesmo, enquanto que o plano de uma rede equivalente ao sistema sudeste do Brasil teve um plano mais econômico no segundo artigo. 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 em nosso 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.

O uso de Algoritmos Genéticos (AG) e outras formas de solução com características semelhantes aparecem em muitos trabalhos. Em KAZEMI *et al.* (2008) foi 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. Esses artigos tem por melhor característica o fato de evidenciar 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, 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 o último ano do planejamento, o planejamento regredia nos anos considerando as opções encontradas anteriormente. 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. Em KONGMANY *et al.* (2008), temos 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. 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 no entanto, quase não foram feitos casos com contingências e a reconfiguração foi, geralmente, restrita a poucos trechos.

Em BINATO *et al.* (2001), foi realizada 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, mas a remoção também foi feita ordenando as linhas adicionadas pelo custo em ordem decrescente. Além deste ponto, uma busca local foi aplicada, permitindo que a heurística atingisse suas soluções e com um tempo que foi para a maioria dos sistemas espantosamente curtos. Por exemplo, a heurística foi capaz de encontrar 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 foi 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.

Em FIGUEIREDO *et al.* (2011), foi realizada uma heurística GRASP baseada em BINATO *et al.* (2001) para o modelo de planejamento com reconfiguração de MOULIN *et al.* (2010). A heurística como em BINATO *et al.* (2001), define o sistema adicionando um circuito de cada vez de forma aleatória dentro da lista de candidatos (nesse caso, a lista é formada por uma porcentagem dos circuitos mais baratos) até que não existam mais cortes no sistema, e posteriormente é feita uma remoção gradativa de circuitos. Porém, neste caso o critério para a remoção é baseado em uma avaliação da influência do circuito no sistema e não no valor do custo do circuito. Além do mais, por considerar o planejamento com reconfiguração, essa etapa também permite a remoção de circuitos existentes. Só após 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 foi citado em quantos casos a heurística conseguiu atingir os melhores valores da literatura.

## 1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é, partindo do modelo DC, mostrar formulações alternativas para o modelo, considerando:

- a possibilidade de reconfiguração dos circuitos;
- a incorporação de perdas de potência ativa nos circuitos; e
- a análise de confiabilidade.

Como pode ser visto pela revisão, esses pontos foram tratados em trabalhos anteriores, mas não em conjunto. O planejamento realizado é estático, visando um

único ano no futuro.

Adicionalmente, a resolução do problema será feita pelo pacote Cplex de otimização. A avaliação dos modelos de PET, e análise do impacto das diferentes formulações é feita testando o plano de expansão considerando fluxo AC usando o programa NH2 CEPEL (2007), desenvolvido no CEPEL.

### **1.2.1 Conteúdo e contribuições do trabalho**

Como dito anteriormente, são contribuições deste trabalho um modelo DC com três modificações (reconfiguração, perda ativa e confiabilidade) em conjunto e a utilização de uma análise AC para verificar como os planos encontrados com fluxo DC se comportam no fluxo AC. Também foram criadas uma heurística iterativa com objetivo de buscar planos N-1 em tempos razoáveis e uma restrição para controle de perdas visando planos mais econômicos para a operação.

O capítulo 2 apresenta a modelagem do PET com modelos básicos de fluxo DC de programação linear com variáveis contínuas e inteiras, enquanto o capítulo 3 mostra modificações estudadas para melhorar o modelo básico adicionando a modelagem de perdas de potência ativa nas linhas, reconfiguração e confiabilidade, terminando com informações sobre a implementação, processamento e resolução dos problemas. No capítulo 4 são apresentados resultados encontrados para diferentes sistemas, utilizando diferentes combinações das modificações apresentadas no capítulo 3. No capítulo 5, são feitas análises com fluxo AC dos planos obtidos com fluxo DC do capítulo 4. No capítulo 6, vemos um caso de planejamento de uma rede real de distribuição de alta tensão, utilizando também diferentes abordagens. E por fim, as considerações finais constituem o corpo do capítulo 7.

## Capítulo 2

# O Planejamento da Expansão da Transmissão

Este capítulo trata da modelagem do problema do PET, mostrando modelos básicos com fluxo DC, como o modelo de transportes e o modelo DC, junto com duas variantes, o modelo híbrido e o disjuntivo, que são alternativas usadas para manter a representação do PET como um problema de programação linear.

O problema do PET visa identificar um plano de expansão que seja o mais econômico possível enquanto atende aos valores futuros de geração e carga, sem resultar em violações operativas no sistema e a um nível de confiabilidade adequado. Além de geração e carga, outros dados necessários 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

Este trabalho considera problemas estáticos, resultantes de modelar a expansão da rede ao final de, por exemplo, 10 anos, anualizando os custos, sem qualquer representação temporal ou dinâmica.

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:

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

Este capítulo descreve diferentes modelos básicos com fluxo DC que, embora não representem todas as características de um sistema real, são usados para a

determinação de planejamentos de longo prazo, cujos dados são menos detalhados.

A forma geral dos modelos é a minimização da função objetivo escolhida, atendendo às restrições do sistema:

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

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

Tendo um modelo feito com as informações do sistema, é necessário usar um método para a resolução do problema. Como mencionado, utiliza-se o pacote Cplex 11.2 para resolver os problemas lineares com variáveis binárias e variáveis contínuas resultantes dos modelos desse trabalho.

## 2.2 Modelo de Transportes

O modelo de transportes é muito simples, mas sua solução geralmente é ineficaz, pois pode fornecer um fluxo muito improvável de ocorrer na prática, por exemplo fluxos “roteando” entre barras. Entende-se por “rotar”, o fenômeno de ciclagem ilustrado por um sistema com 3 barras A, B e C, para o qual existem fluxos de potência ativa indo de A para B, de B para C e C para A. Normalmente, em um sistema desses onde o fluxo de potência ativa é positivo de A para B e de B para C, o fluxo de C para A será negativo.

Este modelo considera a Primeira Lei de Kirchoff (PLK) para o fluxo linearizado para cada barra do sistema; restrições de capacidade de fluxo nos circuitos existentes e candidatos; restrições de capacidade das gerações para as barras com geração; e com os valores da variável de investimento sendo iguais a 0 ou a 1, indicando ou não a construção do circuito.

A formulação do problema no modelo de Transportes é:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \sum_{km \in \Omega^1} c_{km} x_{km} \\ s.a. \\ g_k - \sum_{m \in \Omega_k} f_{km} = d_k, k \in B \quad (a) \\ |f_{km}| \leq \bar{p}_{km}, km \in \Omega^0 \quad (b) \\ |f_{km}| \leq x_{km} \bar{p}_{km}, km \in \Omega^1 \quad (c) \\ 0 \leq g_k \leq \bar{g}_k, k \in B \quad (d) \\ x_{km} \in \{0, 1\}, km \in \Omega^1. \quad (e) \end{array} \right. \quad (2.2)$$

Neste problema,  $g_k$  é a geração de potência ativa na barra  $k$ ;  $\Omega_k$  é o conjunto de circuitos 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  $k$ ;  $B$  é o conjunto das barras;  $\bar{p}_{km}$  é o limite de capacidade do circuito entre as barras  $k$  e  $m$ ;  $\Omega^0$  é o conjunto dos circuitos existentes; e  $\bar{g}_k$  é o limite de geração da barra  $k$ .

A PLK (2.2) (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. As outras restrições são restrições de limite, tanto para a capacidade dos circuitos existentes (2.2) (b) e candidatos (2.2) (c), quanto para a geração (2.2) (d), cujo limite superior pode ser estipulado de acordo com as capacidades máximas das usinas, permitindo um redespacho, ou simplesmente fixando valores e essa restrição poderia ser removida (bem como a variável  $g_k$ ). Por fim, a restrição (2.2) (e), de que  $x_{km}$  deve ser um ou zero para indicar ou não a construção do circuito presente no subconjunto de circuitos candidatos. Do ponto de vista da otimização, o modelo de transportes é um programa linear com variáveis 0-1 mistas.

## 2.3 Modelo DC

Em relação ao modelo de transportes, são adicionadas restrições correspondentes à Segunda Lei de Kirchoff (SLK), que elimina o fenômeno de ciclagem mencionado anteriormente. Com essas restrições, são incorporadas novas variáveis para representar os ângulos da tensão nas barras, tornando o modelo mais complexo e mais próximo do real.

Para chegar à formulação da restrição SLK, partimos da função de potência ativa entre duas barras, para um circuito sem resistência:

$$f_{km} = -V_k V_m \gamma_{km} \sin \theta_{km}.$$

Nesta expressão,  $V_k$  e  $V_m$  são as tensões nas barras  $k$  e  $m$ ;  $\gamma_{km}$  é a susceptância do circuito entre as barras  $k$  e  $m$ ; e  $\theta_{km}$  é a diferença angular entre as barras, que também pode ser escrita como a diferença entre os ângulos de cada barra,  $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$ .

Para um modelo DC, as tensões são consideradas como 1 pu e é feita a simplificação de que, para ângulos pequenos, o valor do seno de um ângulo em radianos é próximo do valor do ângulo. Com isto,

$$\sin \theta_{km} \approx \theta_{km},$$

e a formulação do fluxo fica da forma:



$$f_{km} = -\gamma_{km}\theta_{km}$$

ou

$$f_{km} = -\gamma_{km}(\theta_k - \theta_m). \quad (2.3)$$

O modelo DC correspondente tem a seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \min & \sum_{km \in \Omega^1} c_{km} x_{km} \\ s.a. & \\ & g_k - \sum_{m \in \Omega_k} f_{km} = d_k, k \in B \quad (a) \\ & \frac{f_{km}}{\gamma_{km}} + (\theta_k - \theta_m) = 0, km \in \Omega^0 \quad (b) \\ & \frac{f_{km}}{\gamma_{km}} + x_{km}(\theta_k - \theta_m) = 0, km \in \Omega^1 \quad (c) \\ & |f_{km}| \leq \bar{p}_{km}, km \in \Omega^0 \quad (d) \\ & |f_{km}| \leq x_{km} \bar{p}_{km}, km \in \Omega^1 \quad (e) \\ & 0 \leq g_k \leq \bar{g}_k, k \in B \quad (f) \\ & x_{km} \in \{0, 1\}, km \in \Omega^1. \quad (g) \end{array} \right. \quad (2.4)$$

Além das restrições do modelo de Transportes, são consideradas as restrições da SLK para os circuitos existentes (2.4) (b) e candidatos (2.4) (c). Apesar da aproximação para o seno dos ângulos (válidas apenas para valores próximos de zero), não é usada uma restrição para limitar a variação angular entre barras.

A incorporação da restrição SLK acarreta uma não-linearidade para os circuitos candidatos, que fica bem destacada ao colocar a restrição usual, dividindo a equação (2.3) por  $\gamma_{km}$ , como feito em (2.4) (c), onde a multiplicação entre as variáveis  $x_{km}$  e  $\theta$ 's ficam separadas da constante  $\gamma_{km}$  do trecho.

Por ter variáveis 0-1 mistas ( $x_{km}$  binária, e com  $f_{km}$ ,  $g_k$ ,  $\theta_k$  e  $\theta_m$  contínuas), para facilitar a resolução é desejável reformular o problema apenas com restrições lineares. Para voltar a ter um modelo linear, duas opções serão explicadas a seguir, o modelo híbrido e o modelo disjuntivo.

### 2.3.1 Modelo Híbrido

O Modelo híbrido é um meio termo entre os dois modelos precedentes, já que mantém a restrição da SLK, mas apenas para os circuitos existentes. Para os circuitos candidatos, o modelo possui apenas a PLK, como no modelo de transportes.

O modelo Híbrido então fica da seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \sum_{km \in \Omega^1} c_{km} x_{km} \\ \text{s.a.} \\ g_k - \sum_{m \in \Omega_k} f_{km} = d_k, k \in B \\ \frac{f_{km}}{\gamma_{km}} + (\theta_k - \theta_m) = 0, km \in \Omega^0 \\ |f_{km}| \leq \bar{p}_{km}, km \in \Omega^0 \\ |f_{km}| \leq x_{km} \bar{p}_{km}, km \in \Omega^1 \\ 0 \leq g_k \leq \bar{g}_k, k \in B \\ x_{km} \in \{0, 1\}, km \in \Omega^1. \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Considerando que, ao fim do planejamento de uma expansão, é usual concluir que o número de circuitos novos é menor que a quantidade de circuitos existentes, esse modelo continua sendo um problema linear e de fácil solução sem perder muita da precisão adicionada pela SLK, pois considera a SLK para a maior parte do novo sistema, a saber, para todos os circuitos existentes. No entanto, para um dos modelos estudados a SLK precisará ser representada considerando a variável  $x_{km}$ . Portanto, esse modelo não será usado.

### 2.3.2 Modelo Disjuntivo

O modelo disjuntivo faz o modelo voltar a ser linear mediante a introdução de um parâmetro disjuntivo  $M$ , suficientemente grande GRANVILLE e PEREIRA (1985), SHARIFNIA e AASHTIANI (1985) e VILLASANA (1984). Assim, é feita uma separação das variáveis binárias de investimento com as variáveis dos ângulos, reescrevendo a restrição não-linear (2.4) (c) da seguinte forma:

$$-M_{km}(1 - x_{km}) \leq \frac{f_{km}}{\gamma_{km}} + (\theta_k - \theta_m) \leq M_{km}(1 - x_{km}) \quad (2.6)$$

ou, equivalentemente, usando duas restrições:

$$\frac{f_{km}}{\gamma_{km}} + (\theta_k - \theta_m) \leq M_{km}(1 - x_{km}) \quad (2.7)$$

$$\frac{f_{km}}{\gamma_{km}} + (\theta_k - \theta_m) \geq -M_{km}(1 - x_{km}). \quad (2.8)$$

Se o parâmetro  $M_{km}$  for bem escolhido, a solução ótima discreta será a solução ótima do problema de planejamento da expansão.

Com efeito, para verificar a equivalência de (2.7) e (2.8) com a formulação bilinear (2.4)(c), veremos os casos possíveis para a variável binária.

Considerando o caso em que o circuito será adicionada,  $x_{km} = 1$ , temos em (2.6)

que:

$$0 \leq \frac{f_{km}}{\gamma_{km}} + (\theta_k - \theta_m) \leq 0$$

ou

$$\frac{f_{km}}{\gamma_{km}} + (\theta_k - \theta_m) = 0.$$

Esta restrição coincide com (2.4) (b), usada para os circuitos existentes, como deveria ser, pois nesse caso o circuito candidato está passando a ser um circuito existente.

Para o caso do circuito não ser adicionado,  $x_{km} = 0$ , temos em (2.6) que:

$$-M_{km} \leq (\theta_k - \theta_m) \leq M_{km}, \quad (2.9)$$

uma vez que  $f_{km} = 0$ , pois o circuito não existe (restrição (2.4) (e)).

Finalmente, na formulação (2.4) (c), se  $x_{km} = f_{km} = 0$ :

$$\begin{aligned} \frac{f_{km}}{\gamma_{km}} + x_{km}(\theta_k - \theta_m) &= 0 \\ \frac{0}{\gamma_{km}} + 0(\theta_k - \theta_m) &= 0 \\ 0 + 0 &= 0 \end{aligned}$$

uma restrição redundante, que permite que os valores dos ângulos dessas duas barras possam ter qualquer valor. Para garantir que a nova formulação não modifique o conjunto de soluções, o valor de  $M_{km}$  precisa ser um valor positivo e suficientemente grande, para que a restrição seja respeitada para qualquer diferença angular entre as barras, e por isso essas constantes também são conhecidas como “big-M”.

Enquanto que escolher  $M_{km} = +\infty$  seria uma forma simples de garantir a equivalência, valores muito grandes de  $M_{km}$  podem causar dificuldades numéricas de resolução. Ao mesmo tempo, valores muito pequenos podem deixar algumas soluções fora do conjunto viável do problema. Assim é recomendável calcular valores apropriados de  $M_{km}$ , para que cada restrição continue servindo sem eliminar combinações viáveis e sem ter um valor muito grande. A forma usada para calcular esse valor para esse problema será mostrada em 3.5.2.

Assim, com a linearização da restrição como em (2.6), obtém-se o modelo Disjuntivo a seguir:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\min \sum_{km \in \Omega^1} c_{km} x_{km} \\
s.a. \\
g_k - \sum_{m \in \Omega_k} f_{km} = d_k, k \in B \\
\frac{f_{km}}{\gamma_{km}} + (\theta_k - \theta_m) = 0, km \in \Omega^0 \\
-M_{km}(1 - x_{km}) \leq \frac{f_{km}}{\gamma_{km}} + (\theta_k - \theta_m) \leq M_{km}(1 - x_{km}), km \in \Omega^1 \\
|f_{km}| \leq \bar{p}_{km}, km \in \Omega^0 \\
|f_{km}| \leq x_{km} \bar{p}_{km}, km \in \Omega^1 \\
0 \leq g_k \leq \bar{g}_k, k \in B \\
x_{km} \in \{0, 1\}, km \in \Omega^1.
\end{array} \right. \quad (2.10)$$

O modelo Disjuntivo é muito usado nos trabalhos na literatura, como MOULIN *et al.* (2010), BAHIENSE *et al.* (2001) e OLIVEIRA *et al.* (2007). BAHIENSE *et al.* (2001) mostram ainda que a SLK para circuitos candidatos pode ter um lado direito mais apertado, sem o parâmetro  $M_{km}$ .

# Capítulo 3

## Modelos Alternativos

Este capítulo mostra as modificações estudadas para o PET: reconfiguração, que visa encontrar planejamentos mais econômicos, por permitir que circuitos existentes sejam desligados; perda ativa nos circuitos para tornar o modelo DC mais próximo do real; e confiabilidade, pois todo sistema está sujeito a falhas e o planejamento deve se preocupar com a confiabilidade. Contendo ainda ao fim, informações sobre a implementação dos modelos.

### 3.1 Reconfiguração

Como observado em MOULIN *et al.* (2010), a configuração feita no passado para um sistema elétrico pode não ser a melhor para a situação atual e pode ser ainda menos recomendada para uma futura distribuição de carga.

Ao se operar um sistema de transmissão, podem ocorrer situações em que, dependendo da carga da rede, seja recomendado o desligamento temporário de uma linha, para evitar violações HEDMAN *et al.* (2009). De forma semelhante, por exemplo, em um planejamento para isolar defeitos em redes de baixa tensão da distribuição, onde uma ramificação da rede é conectada a outra ramificação após o defeito e desligada antes do defeito, mantendo dois ramos separados, com a região com defeito isolada para reparo, afetando uma quantidade menor de consumidores.

A técnica chamada de reconfiguração (ou *transmission switching* ou ainda *re-design* em inglês) incorpora esta opção de desligamento de circuitos no modelo de planejamento da expansão, procurando uma nova configuração para o sistema que possa ser estável e que também tenha uma expansão mais barata do que um planejamento tradicional, onde os circuitos podem ser apenas adicionados à rede existente, sem possibilidade de reconfiguração.

Comparando com o modelo (2.10), o modelo com reconfiguração não faz grandes alterações na forma das restrições, mas sua solução fica mais complexa, ao incluir mais variáveis binárias para representar a permanência ou não dos circuitos presentes

no sistema a ser expandido. Assim, temos o seguinte modelo para o problema da expansão da transmissão com reconfiguração:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \quad \sum_{km \in \Omega^1} c_{km} x_{km} \\ s.a. \\ \quad g_k - \sum_{m \in \Omega_k} f_{km} = d_k, k \in B \\ \quad -M_{km}(1 - x_{km}) \leq \frac{f_{km}}{\gamma_{km}} + (\theta_k - \theta_m) \leq M_{km}(1 - x_{km}), km \in \Omega \\ \quad |f_{km}| \leq x_{km} \bar{p}_{km}, km \in \Omega \\ \quad 0 \leq g_k \leq \bar{g}_k, k \in B \\ \quad x_{km} \in \{0, 1\}, km \in \Omega. \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Ainda em comparação com (2.10), a função objetivo continua a mesma, por considerar desprezível o custo de desligar um circuito, comparado com o custo de uma nova construção, inclusive pois a indicação de desligamento de um circuito no plano não significa necessariamente que o circuito nunca mais será usado.

As modificações aparecem apenas no conjunto viável, temos que as restrições que antes eram diferentes para o conjunto de circuitos existentes e circuitos candidatos agora são as mesmas para todos os circuitos, representados pelo conjunto  $\Omega$ . Assim, a variável  $x_{km}$  agora não indica necessariamente a inclusão ou não de um circuito, podendo significar também a permanência ou não de um circuito existente no sistema.

Por ser de maior porte que (2.10), o problema (3.1) pode ser de resolução mais difícil. Com o intuito de acelerar o processo iterativo, podem-se inserir limites para a função objetivo, reduzindo assim as alternativas de expansão que serão exploradas pelo Cplex, e conseqüentemente, o tempo total de processamento. Como limite inferior, pode ser usado o valor encontrado usando os modelos de transportes ou híbrido, que normalmente apresentam expansões mais baratas, mas inviáveis para (3.1). Como limite superior, pode ser usado o valor encontrado com (2.10), uma vez que o objetivo da reconfiguração seria encontrar expansões mais econômicas que este modelo, portanto, não é necessário procurar por alternativas mais caras.

Os resultados de MOULIN *et al.* (2010) mostram que reconfigurando a rede existente é possível diminuir o custo da expansão em sistemas de grande porte, como os regionais brasileiros. Para sistemas menores, usados em testes como o sistema de Garver GARVER (1970), foi mantido o mesmo plano encontrado com (2.10), porque o problema de otimização, ao ser menor, considera poucas alternativas de expansão.

### 3.1.1 Expansão de sistemas de distribuição de alta tensão

O uso da reconfiguração para planejamentos de expansão de sistemas de distribuição de alta tensão (subtransmissão) pode ser fundamental ao permitir mudanças maiores no sistema, em geral, radial. Acontece que em sistemas radiais, a inclusão ou o desligamento de um ou mais circuitos causa uma modificação maior nos fluxos de potência do que em sistemas com característica mais malhadas. Assim sendo, a inclusão da possibilidade de reconfiguração causa impactos mais significativos no planejamento de sistemas de distribuição.

Para acompanhar o crescimento econômico da região onde o sistema se encontra, a adição de novas subestações de distribuição pode ser necessária quando o nível da carga começa a se aproximar da capacidade máxima da rede. A inclusão de uma nova subestação de suprimento da Rede Básica força a construção de novos ramais, ou leva a empresa distribuidora a decidir pela criação de novos regionais, que podem introduzir mudanças significativas na topologia do sistema.

Neste contexto, um modelo computacional sem reconfiguração não seria capaz de atender a estas necessidades de não apenas expandir, mas alterar a topologia do sistema. Por outra parte, fazer a expansão de forma manual não garantirá que o plano obtido seja suficientemente econômico, como para qualquer planejamento manual. Em contraste, com a reconfiguração, passa a ser possível fazer tais modificações.

Dependendo das mudanças previstas, o novo modelo incorpora mais restrições e variáveis, difíceis de formular de forma geral por serem muito específicas, como limitar a quantidade de circuitos num trecho onde linhas candidatas são diferentes das linhas existentes no mesmo trecho. Será portanto considerado um exemplo realista, consistente na divisão de um sistema em dois subsistemas isolados. Tal separação é dada apenas pelo requerimento de atribuir um nó específico a cada subsistema, deixando livre ao modelo computacional a redistribuição dos outros circuitos na nova topologia, atendendo critérios de confiabilidade, bem como restrições específicas que fornecem impedimentos para que o plano final seja um único sistema.

O capítulo 6 considera a expansão de um sistema de distribuição de alta tensão, que exemplifica esta situação.

## 3.2 Perda de Potência Ativa nos circuitos

Como mencionado na revisão bibliográfica, a inclusão de perdas nos circuitos em modelos para o planejamento da expansão da transmissão está sendo uma prática cada vez mais usual nos trabalhos da literatura. Desta forma, o modelo DC fica mais próximo do real formulado em 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 (2.10), 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.

### 3.2.1 Modelagem de perdas: primeira variante

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).

Em ALGUACIL *et al.* (2003), para representar as perdas no modelo, altera-se a restrição da PLK, que incorpora variáveis  $q_{km}$  de perdas nos circuitos, de forma a seguir:

$$g_k - \sum_{m \in \Omega_k} p_{km} = g_k - \sum_{m \in \Omega_k} (f_{km} + \frac{1}{2} q_{km}) = d_k. \quad (3.2)$$

A injeção de potência ativa numa linha, considerando que as tensões valem 1 pu, é dada pelas relações:

$$\begin{aligned} p_{km} &= -\gamma_{km} \sin \theta_{km} + \eta_{km} [1 - \cos(\theta_{km})] \\ p_{mk} &= \gamma_{km} \sin \theta_{km} + \eta_{km} [1 - \cos(\theta_{km})], \end{aligned}$$

onde para cada circuito com condutância  $\eta_{km}$ ,  $p_{km}$  e  $p_{mk}$  são as injeções no circuito na direção da barra  $k$  para  $m$ ; e no sentido oposto, respectivamente.

A perda  $q_{km}$  no circuito entre as barras  $k$  e  $m$  é obtida somando os dois fluxos:

$$p_{km} + p_{mk} = q_{mk} = 2\eta_{km} [1 - \cos(\theta_{km})]$$



ou

$$q_{mk} = \eta_{km}(\theta_k - \theta_m)^2. \quad (3.3)$$

Esta aproximação resulta de aplicar a expansão de Taylor de segunda ordem da função cosseno para pequenos ângulos:

$$\begin{aligned} \theta &\approx 0 & (a) \\ \cos(\theta) &= \cos(0) - \sin(0)\theta - \frac{1}{2}\cos(0)\theta^2 + \dots & (b) \\ \cos(\theta) &\approx 1 - 0 - \frac{1}{2}\theta^2 & (c) \\ \theta^2 &\approx 2(1 - \cos(\theta)). & (d) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Em (a), temos o ponto onde a aproximação é realizada; (b) é a série de Taylor para a função ao redor do ponto; (c) é a série indo até a segunda derivada (expansão de segunda ordem); chegando em (d), a relação usada para obter (3.3).

Diferentemente da SLK para o fluxo de potência ativa linearizado, a equação (3.3) para as perdas é quadrática e, portanto, não-linear. Para “linearizar” a relação quadrática, o trabalho ALGUACIL *et al.* (2003) usa uma aproximação linear por partes, como na Figura 3.1. Mais precisamente, a metade do domínio das diferenças angulares é partido em  $l = 1, \dots, L$  blocos do mesmo tamanho, de maneira a satisfazer as relações a seguir:

$$\begin{aligned} (\theta_k - \theta_m)^2 &= \sum_{l=1}^L (2l - 1)\Delta\delta_{km}\delta_{km}(l) & (a) \\ \sum_{l=1}^L \delta_{km}(l) &= |\theta_k - \theta_m| & (b) \\ \delta_{km}(l) &\geq 0 & (c) \\ \delta_{km}(l) &\leq \Delta\delta_{km} + (1 - x_{km})M_{km}, & (d) \end{aligned} \quad (3.5)$$

onde  $\Delta\delta_{km}$  é a variação angular máxima entre as barras  $k$  e  $m$  para cada bloco; e  $\delta_{km}(l)$  é a variação angular entre as barras  $k$  e  $m$  no bloco  $l$ -ésimo.

A equação (3.5) (a) descreve a linearização por partes para uma parábola como a da Figura 3.1. Quanto maior for a quantidade de blocos (L), mais próxima da curva fica a linearização (que sempre sobre-estima os valores da parábola).

Com a partição da função em blocos, e a necessidade de se definir os tamanhos dos blocos, a variação angular entre as barras, que antes não era limitada, passa a ser mais uma restrição para o modelo. O parâmetro  $M_{km}$  aparece na desigualdade (3.5) (d) para permitir que a variação angular entre duas barras seja maior que o limite definido, apenas para o caso de não existir circuito entre as barras, pois nesse caso, a variação não precisa ser restrita.

Como o valor da diferença angular ao quadrado será sempre positivo, temos a

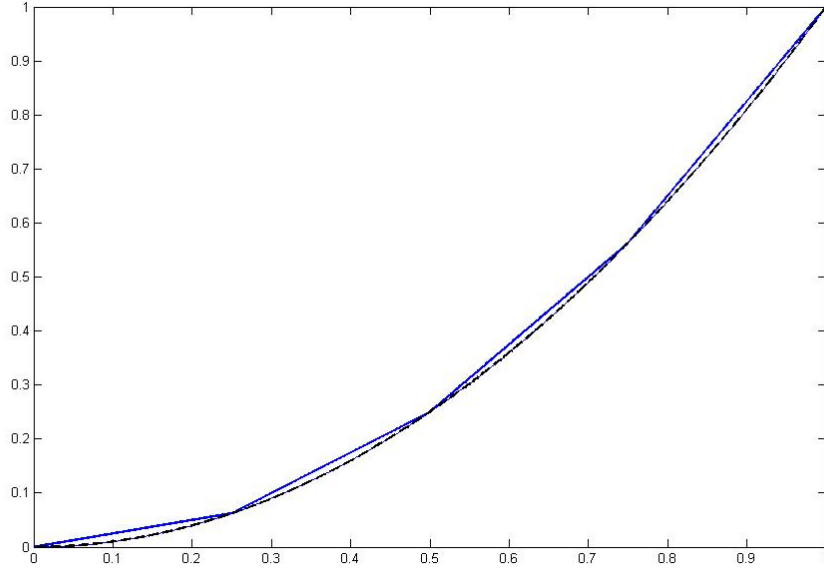


Figura 3.1: Exemplo de uma parábola “linearizada” em L=4 blocos.

desigualdade (3.5) (c), indicando que todas as parcelas da diferença angular serão positivas, observando que o parâmetro  $M_{km}$  em (3.5) (d) também precisa ser positivo. Assim, a equação (3.5) (b) força o somatório das variações angulares de cada bloco a ser igual ao módulo da diferença entre os ângulos das barras.

Para poder representar o módulo da diferença entre os ângulos das barras, são necessárias novas restrições:

$$\begin{aligned}
 |\theta_k - \theta_m| &= \delta_{km}^+ + \delta_{km}^- & (a) \\
 \theta_k - \theta_m &= \delta_{km}^+ - \delta_{km}^- & (b) \\
 \delta_{km}^+ &\geq 0, \delta_{km}^- \geq 0,
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

onde  $\delta_{km}^+$  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.

Um exemplo sobre essa representação é dado pela Figura 3.2, onde (a) representa os valores possíveis de  $\theta_k - \theta_m$ , e (b) representa  $|\theta_k - \theta_m|$ . A figura 3.2(c), contém duas funções, a azul representa  $\delta_{km}^+$ , com os valores positivos da diferença angular, e a vermelha representa  $\delta_{km}^-$ , com o módulo de valores negativos da diferença angular. A soma das linhas resulta no módulo de 3.2(b), dado também pela equação (3.6) (a). Em 3.2(d), temos a diferença dada pela equação (3.6) (b), que é igual à reta 3.2(a).

Deste modo, a equação quadrática (3.3) das perdas pode ser aproximada pela

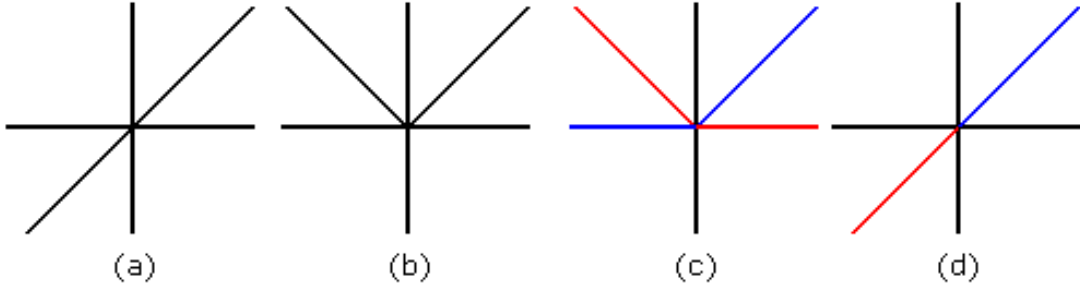


Figura 3.2: Representação da função valor absoluto com variáveis positivas.

relação linear por partes:

$$q_{mk} = \eta_{km} \sum_{l=1}^L (2l-1) \Delta \delta_{km} \delta_{km}(l)$$

para os circuitos existentes, ou

$$q_{mk} = x_{km} \eta_{km} \sum_{l=1}^L (2l-1) \Delta \delta_{km} \delta_{km}(l)$$

para os circuitos candidatos.

Assim como na SLK do fluxo de potência ativa, a restrição para as perdas também foi linearizada em ALGUACIL *et al.* (2003) com o parâmetro disjuntivo  $M$ . A diferença nesse caso é que o valor das perdas é sempre positivo, com o qual a restrição para as perdas no modelo fica na forma:

$$0 \leq -\frac{q_{mk}}{\eta_{km}} + \sum_{l=1}^L (2l-1) \Delta \delta_{km} \delta_{km}(l) \leq (1 - x_{km}) M_{km}. \quad (3.7)$$

As próximas restrições adicionadas estão relacionadas com a capacidade dos circuitos. No modelo sem perdas, o fluxo já era limitado pela capacidade. Ao se considerar as perdas, temos que os valores das perdas em um circuito também são limitados e como o fluxo e as perdas estão juntos no circuito, a soma do fluxo sem perdas e as perdas precisam respeitar a restrição de capacidade. Como o valor das perdas é sempre positivo, a soma do fluxo com as perdas terá um valor absoluto maior no lado onde o sinal do fluxo for positivo. Portanto, basta fazer o teste nos dois extremos dos circuitos e verificar se está dentro da capacidade com valor positivo:

$$\begin{aligned}
+f_{km} + \frac{1}{2}q_{km} &\leq \bar{p}_{km} \\
-f_{km} + \frac{1}{2}q_{km} &\leq \bar{p}_{km}.
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Como foi visto inicialmente para a linearização da SLK em (2.10), a formulação disjuntiva é equivalente a restrição para os circuitos existentes com  $x_{km} = 1$ , então podemos juntar as restrições para circuitos candidatos e existentes na forma disjuntiva, e criar uma restrição forçando  $x_{km} = 1$  para os circuitos existentes para poder reduzir o número de restrições diferentes.

O modelo DC com perdas fica com a seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{ll}
\min & \sum_{km \in \Omega^1} c_{km} x_{km} \\
s.a. & \\
& g_k - \sum_{m \in \Omega_k} (f_{km} + \frac{1}{2}q_{km}) = d_k, k \in B \tag{a} \\
& -(1 - x_{km})M_{km} \leq \frac{f_{km}}{\gamma_{km}} + (\theta_k - \theta_m) \leq (1 - x_{km})M_{km}, km \in \Omega \tag{b} \\
& |f_{km}| \leq x_{km}\bar{p}_{km}, km \in \Omega \tag{c} \\
& 0 \leq q_{km} \leq x_{km}\bar{p}_{km}, km \in \Omega \tag{d} \\
& 0 \leq -\frac{q_{km}}{\eta_{km}} + \sum_{l=1}^L (2l-1)\Delta\delta_{km}\delta_{km}(l) \leq (1 - x_k)M_{km}, km \in \Omega \tag{e} \\
& \delta_{km}^+ + \delta_{km}^- = \sum_{l=1}^L \delta_{km}(l), km \in \Omega \tag{f} \\
& \theta_k - \theta_m = \delta_{km}^+ - \delta_{km}^-, km \in \Omega \tag{g} \\
& f_{km} + \frac{1}{2}q_{km} \leq \bar{p}_{km}, km \in \Omega \tag{h} \\
& -f_{km} + \frac{1}{2}q_{km} \leq \bar{p}_{km}, km \in \Omega \tag{i} \\
& 0 \leq g_k \leq \bar{g}_k, k \in B \tag{j} \\
& x_{km} \in \{0, 1\}, km \in \Omega \tag{k} \\
& x_{km} = 1, k \in \Omega^0 \tag{l} \\
& \delta_{km}^+ \geq 0; \delta_{km}^- \geq 0, km \in \Omega \tag{m} \\
& \delta_{km}(l) \geq 0, km \in \Omega, l = 1, \dots, L \tag{n} \\
& \delta_{km}(l) \leq \Delta\delta_{km} + (1 - x_{km})M_{km}, km \in \Omega, l = 1, \dots, L. \tag{o}
\end{array} \right. \tag{3.9}$$

Neste problema, (3.9) (a) corresponde à equação (3.2); (b), (c) e (k) são as mesmas restrições de (2.10), só que requeridas para todos os circuitos do conjunto  $\Omega$ ; (d) é o limite para os valores de perdas; (e) é a restrição (3.7); (f), (g), (m), (n) e (o) são restrições derivadas das equações em (3.5) e (3.6); (h) e (i) são os limites (3.8); (j) é a restrição da geração presente nos outros modelos; (k) representa as restrições binárias; e (l) assegura que para os circuitos existentes, a variável será 1. Sem essa restrição, o modelo estaria permitindo a reconfiguração, uma vez que todas as restrições já estão na mesma forma para circuitos existentes e candidatos.

### 3.2.2 Modelagem de perdas: segunda variante

Em ARAUJO *et al.* (2012), é notado que a representação da primeira variante permitia que para uma mesma diferença angular, diversos valores de perdas poderiam ser encontrados, o que foi comprovado verificando alguns resultados. O que acontece é que a divisão da diferença angular em blocos não impede que um bloco superior tenha valor positivo enquanto um bloco anterior ainda seja nulo ou que um bloco superior seja positivo antes que o anterior chegue ao máximo. Por ser uma aproximação, é compreensível que essa margem ocorra e a segunda variante apresentada em ARAUJO *et al.* (2012) procura reduzir o valor máximo que a aproximação pode encontrar.

Essa modelagem combina a primeira variante com outra técnica para definir uma nova formulação chamada de SOS-2. A curva continua sendo dividida em  $L$  blocos e o valor da variação continua sendo representado por valores positivos como em (3.6). As mudanças ocorrem em relação às equações (3.5), que representam a forma como a variação e o seu quadrado são descritos:

$$\begin{aligned}
 \delta_{km}^+ + \delta_{km}^- &= \sum_{l=0}^L \Delta\delta_{km} \frac{l}{L} \theta^l & (a) \\
 (\delta_{km}^+ + \delta_{km}^-)^2 &= \sum_{l=0}^L (\Delta\delta_{km} \frac{l}{L})^2 \theta^l & (b) \\
 \sum_{l=0}^L \theta^l &= 1 & (c) \\
 0 \leq \theta^l &\leq 1 & (d)
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

onde  $\theta^l$  é a variável usada nessa modelagem.

Assim como a primeira variante, os resultados dessa aproximação serão exatamente iguais ou maiores que os valores da curva que esta sendo linearizada, o objetivo dessa modelagem é diminuir o máximo que pode ser encontrado.

Para maiores detalhes, ver ARAUJO *et al.* (2012).

O modelo com perdas então fica:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\min \sum_{km \in \Omega^1} c_{km} x_{km} \\
s.a. \\
g_k - \sum_{m \in \Omega_k} (f_{km} + \frac{1}{2} q_{km}) = d_k, k \in B \\
-(1 - x_{km}) M_{km} \leq \frac{f_{km}}{\gamma_{km}} + (\theta_k - \theta_m) \leq (1 - x_{km}) M_{km}, km \in \Omega \\
|f_{km}| \leq x_{km} \bar{p}_{km}, km \in \Omega \\
0 \leq q_{km} \leq x_{km} \bar{p}_{km}, km \in \Omega \\
0 \leq -\frac{q_{km}}{\eta_{km}} + \sum_{l=0}^L (\Delta \delta_{km} \frac{l}{L})^2 \theta^l \leq (1 - x_k) M_{km}, km \in \Omega \\
\delta_{km}^+ + \delta_{km}^- = \sum_{l=0}^L \Delta \delta_{km} \frac{l}{L} \theta^l \\
\theta_k - \theta_m = \delta_{km}^+ - \delta_{km}^-, km \in \Omega \\
f_{km} + \frac{1}{2} q_{km} \leq \bar{p}_{km}, km \in \Omega \\
-f_{km} + \frac{1}{2} q_{km} \leq \bar{p}_{km}, km \in \Omega \\
0 \leq g_k \leq \bar{g}_k, k \in B \\
x_{km} \in \{0, 1\}, km \in \Omega \\
x_{km} = 1, k \in \Omega^0 \\
\delta_{km}^+ \geq 0; \delta_{km}^- \geq 0, km \in \Omega \\
\sum_{l=0}^L \theta^l = 1 \\
0 \leq \theta^l \leq 1, l = 0, \dots, L
\end{array} \right. \quad (3.11)$$

### 3.3 Critério de confiabilidade N-1

Os modelos mostrados nas seções anteriores procuram a expansão mais econômica para que o sistema seja capaz de atender aos requisitos futuros, mas existe um assunto importante que não é considerado nesses modelos, referido à confiabilidade.

Qualquer equipamento pertencente ao sistema, assim como os novos equipamentos indicados pelas expansões, podem 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 que os estados de um sistema pode ter. Isso porque se a chance de uma falha é baixa, acontecer mais de uma falha ao mesmo tempo é muito mais raro. Além do mais para sistemas de grande porte, ter duas falhas simultâneas em lugares muito distantes podem ser representadas como duas falhas simples, acontecendo separadamente. Ou então durante planejamentos um sistema pode simplesmente ser dividido em sistemas menores.

No Brasil, o PET é realizado com o critério de confiabilidade N-1, isto é, quando o sistema for 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.

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 devem-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.

### 3.3.1 Critério de confiabilidade N-1/2

Um sistema que permite que algumas falhas resultem em corte de carga por motivos econômicos, deixa de atender ao critério N-1 e pode ser classificado como N-1/2, isto é, sua confiabilidade não é tão boa quanto a um sistema com N-1, mas também não é um sistema onde qualquer falha resultará em cortes severos. O corte de energia deve, porém, resultar em um custo, que pode variar de acordo com a quantidade, duração e o tipo de consumidor afetado. Portanto, é importante que a modelagem incorpore alguma estratégia para limitar os cortes de carga e/ou penalizar os cortes no custo total.

Em MOULIN *et al.* (2010), foram adicionadas variáveis ao modelo para admitir cortes de carga na presença de falhas. A função objetivo incorpora custos derivados dos cortes causados por cada falha. Porém diferente, este enfoque, baseado no valor do corte de carga, também foi considerado em OLIVEIRA *et al.* (2007). O sistema resultante, portanto, não atenderá ao N-1, pois ao incorporar custos para os cortes e permitir que algumas falhas continuem gerando cortes, o critério procura evitar custos de investimento maiores, decorrentes de planos com corte de carga nulo. Para o caso sem falhas no sistema, as variáveis de corte devem ser nulas obrigatoriamente. O custo correspondente para o PET com confiabilidade é da forma:

$$\sum_{km} c_{km} x_{km} + \sum_{h,k} p_h^k u_h^k, \quad (3.12)$$

onde  $p_{km}^i$  é a probabilidade de ocorrer a falha no trecho entre as barras  $k$  e  $m$  multiplicado pelo custo de um corte de carga na barra  $i$  e  $u_{km}^i$  é o corte de carga na barra  $i$ , quando existe uma falha no trecho entre as barras  $k$  e  $m$ .

A probabilidade  $p_{km}^k$  é obtida a partir dos valores de tempo médio de reparo e da taxa de falha de cada equipamento, como visto em BORGES (2005). As variáveis  $u_h^k$  também são usadas nas restrições de carga, como se fossem geradores suprindo

a falta de energia nas barras.

A dificuldade do modelo é que, se a quantidade de variáveis já era grande para representar um sistema com muitos equipamentos, agora todas as variáveis contínuas serão replicadas como variáveis diferentes para cada conjunto de restrições que represente um cenário do sistema (uma falha ou o cenário sem falhas), pois poderão ter valores diferentes em cada cenário. Assim, só podemos fazer a confiabilidade desta forma para sistemas com poucos equipamentos.

### 3.3.2 Modelo aplicado

Os sistemas existentes no SIN (Sistema Interligado Nacional) são robustos por considerar algum critério de confiabilidade, como o N-1. Após uma expansão sem considerar as falhas, o sistema deve deixar de atender ao critério de confiabilidade, porém, o sistema ainda pode ser capaz de continuar operando sem cortes de carga para algumas falhas, mesmo que seja necessário que o operador atue no sistema. Portanto, no modelo que replica as restrições para cada falha possível existirão grupos de restrições que não exigirão a construção de novos circuitos e dessa forma, eles poderiam ser evitados. As restrições importantes seriam as restrições que representassem uma falha com corte de carga.

Considerando os casos com cortes como os mais importantes, é possível fazer um modelo que procure tratar exatamente esses casos. Fazendo testes de confiabilidade após um planejamento de expansão sem confiabilidade, é possível identificar essas falhas. Dessa forma, seria mais fácil fazer a expansão replicando as restrições do modelo, e aumentando as variáveis, apenas um grupo pequeno de falhas, além de ter o conjunto de restrições para o caso base, sem falhas.

Outra mudança proposta é, ao invés de (3.12), manter a função objetivo como era em (2.10) e passar a usar uma restrição para controlar os cortes de carga, dada por (3.13), onde  $p_h$  é a probabilidade de ocorrer a falha no trecho  $h$ , como antes, mas agora multiplicada por 525600 (minutos em um ano), e o valor de  $u_h^k$  é dividido pelo total da carga máxima. O conjunto  $\Phi$  contém todos os circuitos  $h$  onde as falhas são consideradas. A restrição por sua vez não usaria mais o custo dos cortes, mas sim o Índice de Severidade (IS) do sistema, uma medição que indica quantos minutos o sistema deixaria de fornecer a energia equivalente a demanda máxima, na presença de falhas. Dessa forma, se espera ter resultados mais rápidos e que respeitem uma medição que já é uma referência para indicar a confiabilidade de sistemas, entre outros índices mostrados em GUERTIN *et al.* (1978), e usada para classificar níveis de riscos no Brasil, como descrito em SCHILLING *et al.* (2008).



$$\frac{\sum_{h \in \Phi} \sum_{k \in B} p_h u_h^k * 525600}{\sum_{k \in B} d_k} \leq \overline{IS} \quad (3.13)$$

Enquanto esse método procura fazer com que o problema de otimização fique menor e mais fácil de resolver, para redes de grande porte ainda é necessário definir o planejamento em várias iterações. Para cada plano encontrado, é feito um novo ranking com todas as contingências simples, para verificar a confiabilidade do sistema e verificar se seria necessário aumentar o número de circuitos que definem o conjunto de falhas, modificar o valor do IS, ou se o nível atingido está satisfatório. Este método iterativo pode ser visto melhor na construção de planos com confiabilidade para os sistemas IEEE24 barras e Sul, vistos no capítulo 4.

O teste de confiabilidade para classificar quais falhas seriam mais críticas pode ser feito de duas formas. A primeira foi utilizar o plano resultante e realizar a enumeração de falhas no NH2 (CEPEL (2007)). Outra alternativa consiste em utilizar a função que determina os cortes de carga no cálculo do Índice de Severidade do programa de otimização. Essa função, realizada ao fim da execução do programa, realiza o cálculo de corte para cada falha para indicar o IS, considerando as falhas em todo o sistema, também fazendo uma Enumeração de Contingências Simples como no NH2, e não restringe as falhas apenas nos circuitos escolhidos para falhar durante o planejamento.

O modelo com confiabilidade usado então é dado por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \quad \sum_{km \in \Omega^1} c_{km} x_{km} \\ s.a. \quad \frac{\sum_{h \in \Phi} \sum_{k \in B} p_h u_h^k * 525600}{\sum_{k \in B} d_k} \leq \overline{IS} \\ g_k^h - \sum_{m \in \Omega_k} f_{km}^h + u_h^k = d_k, k \in B, h \in \Phi(+1) \\ -M_{km}(1 - \pi_{km}^h x_{km}) \leq \frac{f_{km}^h}{\gamma_{km}} + (\theta_k^h - \theta_m^h) \leq M_{km}(1 - \pi_{km}^h x_{km}), km \in \Omega, h \in \Phi(+1) \\ |f_{km}^h| \leq \pi_{km}^h x_{km} \bar{p}_{km}, km \in \Omega, h \in \Phi(+1) \\ 0 \leq g_k^h \leq \bar{g}_k, k \in B, h \in \Phi(+1) \\ x_{km} \in \{0, 1\}, km \in \Omega \\ x_{km} = 1, km \in \Omega^1 \\ \pi_{km}^h = 0, h = km \\ \pi_{km}^h = 1, h \neq km \\ u_k^h = 0, caso base \\ u_k^h \leq d_k, h \in \Phi \end{array} \right. \quad (3.14)$$

O objetivo deste trabalho é a busca de planos N-1, um requerimento entendido como mínimo que um sistema deve atender. Uma alternativa interessante para trabalhos futuros consiste em considerar planos N- $k$  com  $k > 1$ , que procurem um compromisso entre o custo de investimento e o custo da confiabilidade, medindo este custo em termos dos cortes de energia resultantes da ocorrência de falhas simultâneas no sistema.

### 3.4 Modelo completo

Aplicando as 3 modificações apresentadas o modelo DC fica:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \min \quad \sum_{km \in \Omega^1} c_{km} x_{km} \\
 s.a. \quad \frac{\sum_{h \in \Phi} \sum_{k \in B} p_h u_h^k * 525600}{\sum_{k \in B} d_k} \leq \overline{IS} \\
 g_k^h - \sum_{m \in \Omega_k} (f_{km}^h + \frac{1}{2} q_{km}^h) + u_k^h = d_k, k \in B, h \in \Phi(+1) \\
 -M_{km}(1 - \pi_{km}^h x_{km}) \leq \frac{f_{km}^h}{\gamma_{km}} + (\theta_k^h - \theta_m^h) \leq (1 - \pi_{km}^h x_{km}) M_{km}, km \in \Omega, h \in \Phi(+1) \\
 |f_{km}^h| \leq \pi_{km}^h x_{km} \bar{p}_{km}, km \in \Omega, h \in \Phi(+1) \\
 0 \leq q_{km}^h \leq \pi_{km}^h x_{km} \bar{p}_{km}, km \in \Omega, h \in \Phi(+1) \\
 0 \leq -\frac{q_{km}^h}{\eta_{km}} + \sum_{l=1}^L (2l - 1) \Delta \delta_{km}^h \delta_{km}^h(l) \leq (1 - \pi_{km}^h x_{km}) M_{km}, km \in \Omega, h \in \Phi(+1) \\
 \delta_{km}^{h+} + \delta_{km}^{h-} = \sum_{l=1}^L \delta_{km}^h(l), km \in \Omega, h \in \Phi(+1) \\
 \theta_k^h - \theta_m^h = \delta_{km}^{h+} - \delta_{km}^{h-}, km \in \Omega, h \in \Phi(+1) \\
 f_{km}^h + \frac{1}{2} q_{km}^h \leq \bar{p}_{km}, km \in \Omega, h \in \Phi(+1) \\
 -f_{km}^h + \frac{1}{2} q_{km}^h \leq \bar{p}_{km}, km \in \Omega, h \in \Phi(+1) \\
 0 \leq g_k^h \leq \bar{g}_k, k \in B, h \in \Phi(+1) \\
 x_{km} \in \{0, 1\}, km \in \Omega \\
 \delta_{km}^{h+} \geq 0; \delta_{km}^{h-} \geq 0, km \in \Omega, h \in \Phi(+1) \\
 \delta_{km}^h(l) \geq 0, km \in \Omega, l = 1, \dots, L, h \in \Phi(+1) \\
 \delta_{km}^h(l) \leq \Delta \delta_{km} + (1 - \pi_{km}^h x_{km}) M_{km}, km \in \Omega, l = 1, \dots, L, h \in \Phi(+1) \\
 \pi_{km}^h = 0, h = km \\
 \pi_{km}^h = 1, h \neq km \\
 u_k^h = 0, caso base \\
 u_k^h \leq d_k, h \in \Phi
 \end{array} \right. \tag{3.15}$$

## 3.5 Implementação e resolução dos modelos

Esta seção procura tratar de aspectos da passagem dos modelos apresentados para o programa computacional e seu processamento.

### 3.5.1 Variável binária

Nos modelos descritos anteriormente a variável binária de investimento  $x_{km}$  é apresentada como a representação da existência ou não do circuito entre as barras  $k$  e  $m$  no planejamento. Mas entre o mesmo par de barras pode existir mais de um circuito, onde o caminho entre as barras onde passa o(s) circuito(s) é indicado pela palavra “trecho”. Sendo uma variável binária, é necessário ter uma variável para cada circuito e no programa são usados dois índices para representar cada circuito, sendo  $km$  o primeiro índice. O segundo índice corresponde à numeração dos circuitos no trecho. Portanto, as variáveis  $x_{km}$  possuem um outro índice oculto nos modelos para representar circuitos paralelos, podendo ser representada como  $x_{km}^j$  e implementada como  $x_i^j$ , onde  $i$  ou  $km$  indicam o trecho e  $j$  indica o número do circuito paralelo.

O primeiro índice indicado como a numeração das barras é representado por um único número. As informações sobre as barras  $k$  e  $m$  que fazem parte do conjunto de informações sobre cada circuito é armazenada em um vetor de dados fornecidos ao programa, que segue a mesma numeração do primeiro índice de  $x$

Assim, um outro conjunto de restrições é adicionado nos modelos de otimização, para fazer a ordenação das variáveis binárias, assegurando que os circuitos sejam adicionados, ou removidos no caso da reconfiguração, na ordem indicada, evitando assim a redundância devido à existência de várias soluções que seriam iguais, mas com diferentes posições entre essas variáveis.

Para cada par de barras  $km$ , e da mesma forma que  $x$ , as outras variáveis descritas no modelo com o índice  $km$  são representadas por apenas um número como índice, tendo um outro índice para especificar o número do circuito, quando houver vários em paralelo.

### 3.5.2 Big M

O parâmetro disjuntivo  $M$ , conhecido como “big-M”, pode ser tão complicado de se calcular como resolver o próprio problema de expansão da transmissão, visto em MOULIN *et al.* (2010). Retornando para a relação (2.9), o valor de  $M$  para o trecho não pode limitar a variação angular, pois não existe ligação direta entre as barras. Portanto, o valor ideal seria exatamente o maior valor possível para a variação angular do trecho, calculado somando as variações angulares dos circuitos

que podem ligar direta ou indiretamente as barras envolvidas. Lembrando que sem usar a forma disjuntiva, essa restrição não existiria, e portanto, o valor do parâmetro deve assegurar que a restrição não causará erros na ausência de ligação direta entre as barras.

O cálculo do parâmetro “big-M” então para um par de barras que já estão conectadas no sistema poderia ser encontrado como o menor valor da soma da diferença angular possível entre os circuitos que unem esse par de barras onde existe um circuito candidato. Ou seja, nesse caso, encontrar o valor exato para “big-M” equivale a resolver um problema combinatório conhecido como do “Caminho mais curto” (SP - *Shortest Path* em inglês), onde cada circuito existente seria uma opção de caminho, e cada uma teria um valor, o peso, para definir o caminho mais curto, igual a diferença angular máxima.

O peso máximo de cada trecho pode ser dado de acordo com o valor máximo da capacidade do circuito, considerando que

$$f_{km} = \gamma_{km}(\theta_k - \theta_m) \quad (3.16)$$

logo,

$$(\theta_k - \theta_m)_{MAX} = \frac{\bar{f}_{km}}{\gamma_{km}}. \quad (3.17)$$

Definido o valor usado para cada trecho, restaria resolver o problema do caminho mais curto e seria encontrado o valor para o parâmetro.

Porém, o caminho mais curto pode não ser tão fácil de se calcular, dependendo da rede de transmissão. Além do mais, se houver adição de novas barras (o que implica em adicionar circuitos onde pelo menos uma das pontas não pertence à rede original), o cálculo para os parâmetros fica ainda mais complexo, sendo necessário resolver problemas conhecidos em otimização combinatória como do “Caminho mais longo” (LP - *Longest Path* em inglês). Para poder cobrir todas as alternativas de caminhos, o valor de M deve considerar a pior situação possível. Logo, se somente uma das barras não pertence ao sistema, é necessário encontrar o maior valor de uma soma entre o caminho mais longo entre a nova barra do circuito candidato e uma outra barra que faria a conexão com o sistema e o caminho mais curto entre essa última barra e a outra barra do circuito candidato. A continuação, devem ser analisadas, entre todas as possibilidades, aquelas com um maior valor ao somar o SP entre as barras existentes e o LP partindo da barra candidata.

No caso onde as duas barras não pertencem ao sistema, seria possível fazer no máximo duas formas diferentes para calcular o valor. Mais precisamente, ou o valor é

a soma entre 2 caminhos mais longos ligando as novas barras ao sistema e o caminho mais curto entre as barras pertencentes ao sistema que fariam a conexão de cada barra. Ou o valor é simplesmente o caminho mais longo entre as barras candidatas, sem passar por barras existentes. Em casos onde fosse possível traçar caminhos das duas formas distintas, o valor seria o maior entre as duas alternativas.

Resumindo, o valor do parâmetro para cada trecho é dado por uma das expressões a seguir:

$$\begin{aligned}
 SP_{i-j} & & i, j \in B^0 \\
 \max_{l \in B^0} (LP_{i-l}^j + SP_{l-j}) & & i \notin B^0, j \in B^0 \\
 \max(LP_{i-j}, \max_{l_1, l_2 \in B^0} (LP_{i-l_1}^j + SP_{l_1-l_2} + LP_{l_2-j}^i)) & & i, j \notin B^0.
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

Em um modelo onde a reconfiguração é permitida, não seria possível garantir que um caminho mais curto encontrado com os circuitos existentes continuaria a existir. Portanto, não pode ser mais usado um SP, e o parâmetro M deve ser calculado como o caminho mais longo entre todas as barras, sem fazer qualquer diferenciação entre o que é existente e o que é candidato.

Também deve ser lembrado que casos onde não exista nenhum outro caminho entre as barras para o circuito candidato, com ou sem reconfiguração, o valor de M é igual a zero.

Estes cálculos podem ser difíceis para sistemas de grande porte. Para evitar o cálculo de múltiplos caminhos mais curtos ou mais longos, neste trabalho foram considerados apenas os caminhos de maior custo (maior  $\frac{\bar{f}_{km}}{\gamma_{km}}$ ) para cada barra. Dessa forma, ao invés de fazer um cálculo específico para cada trecho, o mesmo cálculo serve para todos os trechos: apenas precisa-se fazer o somatório dos trechos de maior custo para cada barra, sem repetir trechos.

Esse somatório será geralmente maior do que o valor obtido usando caminhos mais longos, mas ao mesmo tempo é garantido que o valor vai ser grande suficiente para que as restrições com o parâmetro disjuntivo não cortem porções indevidas do conjunto viável do problema de planejamento.

### 3.5.3 Outras informações

O código do programa foi feito em Java usando a biblioteca do Cplex versão 11.2 em um computador com processador Intel Pentium 4 3,0 GHz com 1,5 GB de memória RAM. A fase da implementação foi desenvolvida por Michael Poss da Université Libre de Bruxelles durante o artigo MOULIN *et al.* (2010) que foi estendido por mim baseado no modelo de representação de perdas. Posteriormente trabalhamos em conjunto para implementar o modelo de confiabilidade que também foi usado

para a realização do artigo ARAUJO *et al.* (2012).

Os resultados obtidos são apresentados no próximo capítulo.

# Capítulo 4

## Planejamento da Expansão da Transmissão - Testes e Resultados

Este capítulo apresenta diversos PET's analisados. Em cada seção, são aplicados diferentes modelos usando as modificações mostradas no capítulo 3 para um sistema teste determinado.

Para cada sistema, os resultados são divididos em três seções. Primeiro são mostrados os resultados para o planejamento clássico (sem nenhuma das 3 modificações) e clássico com reconfiguração. Depois os planejamentos com perdas, e com perdas e reconfiguração. Segue uma análise de confiabilidade e os quatro planejamentos são refeitos considerando contingências.

Para simplificar a identificação de diferentes planejamentos, algumas siglas são usadas para mostrar qual modelo está sendo considerado. O planejamento clássico (2.10) é denominado pela sigla PET, e letras adicionais indicam as modificações no modelo. A letra "r" indica a reconfiguração, "p" indica as perdas nos circuitos e "f" indica a consideração das falhas.

### 4.1 Garver com redespacho

Este sistema, proposto por GARVER (1970), é ainda muito utilizado para apresentar resultados de trabalhos sobre planejamento da transmissão e, sendo assim, é uma boa base de comparação com publicações na literatura. Isto, porque o tamanho do sistema, com apenas 6 barras, torna o sistema de fácil resolução. Porém, por ser muito pequeno e com dados poucos realistas, não é representativo como única forma de validar um método. Por exemplo, para este sistema o Modelo de Transportes (2.2) encontra o mesmo planejamento que o Modelo DC (2.10).

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.

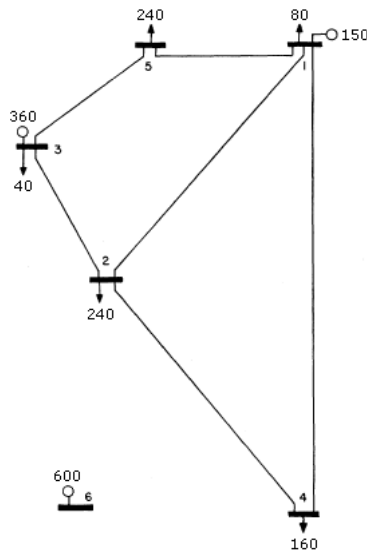


Figura 4.1: Sistema de Garver inicial.

#### 4.1.1 Planejamento clássico

Por ser um sistema pequeno, os planejamentos clássicos, com ou sem reconfiguração, fornecem o mesmo planejamento, indicado na tabela 4.1. Para este caso a reconfiguração não encontrou vantagens em desligar algum dos circuitos existentes.

Tabela 4.1: Novos circuitos para Garver no PET com redespacho

Trecho	Custo unitário	Quantidade
3 - 5	20	1
4 - 6	30	3
Custo total		110
Tempo (segundos)		0,17

O custo do plano coincide com o informado em todas as referências bibliográficas, onde alguns planos são diferentes apenas por trocar linhas de mesmo custo (como trocas de linhas do trecho 4 - 6 por 2 - 6).

#### 4.1.2 Planejamento com perdas

Novamente, os resultados do planejamento com perdas e com ou sem reconfiguração coincidem, conforme apresentado na tabela 4.2.



Tabela 4.2: Novos circuitos para Garver no PETp com redespacho

Trecho	Custo unitário	Quantidade
2 - 3	20	1
3 - 5	20	1
4 - 6	30	3
Custo total		130
Tempo (segundos)		0,34

O resultado encontrado foi diferente do informado em ALGUACIL *et al.* (2003), que teve custo total maior, igual a 140, logo sub-ótimo. O custo do plano da tabela 4.2 coincide com o de DE OLIVEIRA *et al.* (2005). Em comparação com o resultado sem perdas da tabela 4.1, a inclusão de um circuito no trecho 2-3 acresceu o custo do plano em 20.

### 4.1.3 Planejamento com confiabilidade

O sistema de Garver é suficientemente pequeno para que seja possível realizar um planejamento considerando falhas em todas as linhas. Porém, para ilustrar a heurística aplicada, foi seguido o método explicado no capítulo 3, considerando falhas para subgrupo de circuitos. O subgrupo possui 10 trechos, que foram escolhidos por apresentarem as falhas mais críticas ou trechos importantes, de acordo com a avaliação de confiabilidade do PETp com redespacho com fluxo AC no modelo NH2, desenvolvido pelo CEPEL (2007). Nessa avaliação AC, 7 trechos resultaram em cortes de carga, portanto um subgrupo com 10 falhas já estaria considerando todos os circuitos existentes que podem resultar em cortes. Os trechos testados no caso foram todos os 7 trechos com pelo menos um circuito de acordo com o plano PETp, mais 3 trechos ligando a barra 6 às barras 2, 3 e 5. O índice de severidade escolhido para o grupo foi fixado em  $\bar{IS} = 0$  minutos para a restrição (3.13), em busca de um plano resultante que tenha critério N-1.

A tabela 4.3 apresenta os planejamentos anteriores combinados com a consideração de falhas para o grupo escolhido. Ambos os planejamentos tiveram um aumento significativo no custo.

Para verificar se os planos obtidos são realmente mais confiáveis, a tabela 4.4 informa o índice de severidade calculado pelo programa, bem como o custo de cada plano. Observa-se que, adicionando as perdas ao modelo, o sistema resultante tende a ser mais confiável (mesmo se o cálculo do IS para o sistema sem perdas também seja feito sem perdas). Já o modelo com falhas resulta em um índice zero como esperado, envolvendo em consequência um aumento do custo da expansão.

Tabela 4.3: Novos circuitos em Garver para diferentes PET's com confiabilidade N-1 e redespacho

Trecho	Custo unitário	PETf	PETpf
2 - 3	20	1	0
3 - 5	20	2	2
2 - 6	30	1	2
4 - 6	30	3	3
Custo total		180	190
Tempo (segundos)		3,56	22,30

Tabela 4.4: Índices de severidade para os diferentes planejamentos com redespacho

	PET	PETp	PETf	PETpf
IS	93,89	82,93	0	0
Custo	110	130	180	190

## 4.2 Garver sem redespacho

Para fazer o planejamento sem redespacho, as gerações foram fixadas nos valores descritos em GARVER (1970) mostrados na tabela 4.5:

Tabela 4.5: Valores de geração usadas para os planejamentos sem redespacho

Barra	Geração
1	50
3	165
6	545

### 4.2.1 Planejamento clássico

Como esperado, o custo do plano (mostrado na tabela 4.6) aumentou, principalmente pela necessidade de criar trechos suficientes para levar a energia gerada na barra 6, que foi a barra indicada em GARVER (1970) para ter a maior parte da geração. O custo, porém, está de acordo com os planejamentos encontrados em outros trabalhos, como o trabalho original de Garver e RODRIGUEZ *et al.* (2008).

### 4.2.2 Planejamento com perdas

Quando as perdas são consideradas não é possível manter a geração fixa durante o planejamento, pois a geração deve aumentar para compensar as perdas. Para manter o despacho o mais próximo possível ao determinado, apenas a barra de referência teve o valor de geração livre para aumentar, até a capacidade máxima do gerador. Foram realizados dois planejamentos diferentes considerando as perdas, um com a barra 6 sendo a referência, como no original. Como em RODRIGUEZ *et al.* (2008), a

Tabela 4.6: Novos circuitos para Garver no PET sem redespacho e barra 6 como referência

Trecho	Custo unitário	Quantidade
3 - 5	20	1
2 - 6	30	4
4 - 6	30	2
Custo total		200
Tempo (segundos)		0,34

barra referência escolhida foi a de número 1, então também foi feito o planejamento permitindo o redespacho apenas nessa barra.

A tabela 4.7 mostra o plano com a barra 6 de referência. Em relação ao plano da tabela 4.6, há mais duas linhas no trecho 4-6 e mais uma linha no trecho 3-5.

Tabela 4.7: Novos circuitos para Garver no PETp sem redespacho e barra 6 como referência

Trecho	Custo unitário	Quantidade
3 - 5	20	2
2 - 6	30	4
4 - 6	30	4
Custo total		280
Tempo (segundos)		3,19

A tabela 4.8 mostra o plano com a barra 1 como referência. Como a barra 1 tem uma folga na geração que é maior do que a da barra 6 com relação ao despacho inicial, o programa foi capaz de encontrar um plano mais econômico, voltando ao mesmo plano encontrado sem considerar as perdas.

Tabela 4.8: Novos circuitos para Garver no PETp sem redespacho e barra 1 como referência

Trecho	Custo unitário	Quantidade
3 - 5	20	1
2 - 6	30	4
4 - 6	30	2
Custo total		200
Tempo (segundos)		0,64

### 4.2.3 Planejamento com confiabilidade

Para escolher o subgrupo de 10 falhas simples de transmissão que seria usado para os planos com confiabilidade foi feita uma enumeração dos casos com perda, ordenando as falhas de acordo com a severidade dos cortes, de maior a menor. O índice de severidade escolhido em (3.13) foi de zero minutos. Mais uma vez, o grupo é

suficientemente grande para considerar todos os casos que resultaram em cortes nos planejamentos anteriores e mais alguns circuitos sem falhas, com o qual o plano obtido foi de tipo N-1 para o fluxo DC, como pode ser visto na tabela 4.10.

A tabela 4.9 mostra os três planejamentos da subseção 5.2, agora considerando falhas. O custo do plano sem perdas ficou igual ao custo encontrado por RODRIGUEZ *et al.* (2008) usando fluxo DC.

O custo do plano com perdas e barra 6 como referência também teve um grande aumento. Já o plano com perdas e com a barra 1 sendo referência, indicado abaixo por um subíndice ( $PETf_1$ ), teve um custo menor do que o caso sem perdas. Em RODRIGUEZ *et al.* (2008), observa-se o mesmo fenômeno, uma vez que o plano com fluxo AC teve um custo menor que o plano DC.

Tabela 4.9: Novos circuitos em Garver para diferentes PET's com confiabilidade N-1 e redespacho

Trecho	Custo unitário	PETf	PETpf	PETpf <sub>1</sub>
1 - 5	20	0	0	1
2 - 5	31	0	1	0
2 - 6	30	4	4	4
3 - 5	20	2	2	2
3 - 6	48	1	1	0
4 - 6	30	3	4	3
Custo total		298	359	270
Tempo (segundos)		8,64	179,88	31,72

A tabela 4.10 a seguir mostra os custos dos planos, bem como os IS's calculados pelo programa do planejamento ao fazer a enumeração das falhas sem permitir o redespacho. Pela tabela, fica claro que escolher a barra 1 como referência, que tem mais folga que a barra 6, resulta em sistemas mais confiáveis. Com essa escolha, os custos dos planos são menores e nos casos sem confiabilidade, a simples troca da barra de referência entre o resultado do PET e do PETp<sub>1</sub> reduziu o índice pela metade, sem alterar nenhuma linha, mesmo incluindo as perdas no modelo. Novamente, observa-se que a consideração das perdas leva a uma redução do IS. Também como esperado os índices foram reduzidos a zero, uma vez que o índice usado no grupo foi zero e que o subgrupo escolhido para as falhas contém todas as contingências que poderiam gerar cortes.

Tabela 4.10: Índices de severidade para os diferentes planejamentos sem redespacho

	PET	PETp	PETp <sub>1</sub>	PETf	PETpf	PETpf <sub>1</sub>
IS	80,10	39,37	37,29	0	0	0
Custo	200	280	200	298	359	270

### 4.3 IEEE 24 barras

Sistema proposto em GRIGG *et al.* (1999) para a realização de testes de confiabilidade que, após modificações de geração e na carga, ALGUACIL *et al.* (2003), MOULIN *et al.* (2010), passou a ser usado também para planejamentos de expansão da transmissão. Por ser conhecido pela comunidade internacional, é uma outra boa opção para comparação de resultados, apesar de ser muito menos usado que Garver. Por possuir mais barras, é um sistema mais complexo que o de Garver, de solução mais complicada, mas de tamanho suficiente pequeno para que o problema não seja considerado muito grande, sendo uma boa opção de validação para modelos.

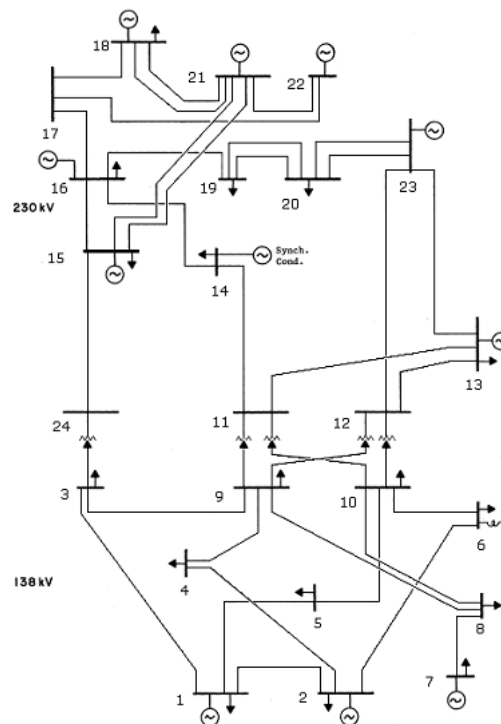


Figura 4.2: Sistema IEEE 24 barras inicial

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.

#### 4.3.1 Planejamento clássico

Mesmo sendo um sistema um pouco maior que Garver, os resultados do planejamento clássico com ou sem reconfiguração são o mesmo planejamento indicado na tabela 4.11, o que significa que a reconfiguração não encontrou vantagens em des-

ligar nenhum dos circuitos existentes. O custo do planejamento coincide com o encontrado na literatura.

Tabela 4.11: Novos circuitos para IEEE 24 barras no PET

Trecho	Custo unitário	Quantidade
6 - 10	16	1
7 - 8	16	2
10 - 12	50	1
14 - 16	54	1
Custo total		152
Tempo (segundos)		1,16

### 4.3.2 Planejamento com perdas

Novamente, os resultados do planejamento com perdas e com ou sem reconfiguração coincidem, conforme apresentado na tabela 4.12, onde é possível observar que os planos clássico e com perdas diferem apenas na construção de uma linha. Porém, quando comparado ao plano sem perdas da tabela 4.10 o custo do plano aumentou em 43,4%.

Tabela 4.12: Novos circuitos para IEEE 24 barras no PETp

Trecho	Custo unitário	Quantidade
6 - 10	16	1
7 - 8	16	2
10 - 12	50	1
12 - 13	66	1
14 - 16	54	1
Custo total		218
Tempo (segundos)		3,09

### 4.3.3 Planejamento com confiabilidade

Por possuir 4 vezes o número de barras que o sistema Garver e um número maior de trechos, o sistema IEEE 24 barras já é suficientemente complexo para que um planejamento que combine confiabilidade e reconfiguração seja computacionalmente caro. Em particular, o tempo necessário para realizar o planejamento considerando tanto confiabilidade quanto reconfiguração pode passar facilmente de um dia (sendo que para Garver precisam-se apenas de alguns minutos no máximo), se for usado um computador normal como o especificado no capítulo anterior.

Considerando também que a alteração do modelo para incorporar as perdas nas linhas não causa um grande impacto no tempo de cálculo e que a solução de um

modelo com perdas não terá uma confiabilidade menor do que um modelo sem perdas, os planejamentos com confiabilidade foram feitos apenas considerando as perdas no modelo.

Seguindo o planejamento que foi feito com Garver, o grupo de falhas foi de 17 trechos, dessa vez sem ter circuitos onde falhas não resultam em cortes de carga. Os 17 trechos foram identificados novamente de acordo com a enumeração de estados no programa NH2. A execução do programa no entanto foi realizada em um cluster com 8 processadores de 3,2 GHz (dois computadores com Quad Core), como em Garver, com  $\overline{IS} = 0$  minutos para a restrição (3.13) e não foi feita a reconfiguração. A tabela 4.13 contém o resultado obtido, após pouco mais de uma hora e meia.

Tabela 4.13: Novos circuitos em IEEE 24 barras para PETp com confiabilidade

Trecho	Custo unitário	PETpf
2 - 4	33	1
3 - 24	50	1
5 - 10	23	1
6 - 10	16	2
7 - 8	16	2
10 - 11	50	1
10 - 12	50	1
12 - 13	66	1
14 - 16	54	1
14 - 23	86	1
15 - 24	72	1
16 - 17	36	1
17 - 18	20	1
Custo total		604
Tempo (horas)		1,53

Porém, foi observado durante os testes no computador inicial que o Cplex consegue encontrar boas soluções em um tempo razoável e que as melhorias tendem a levar mais tempo quanto mais próximo se chega a solução ótima, também observado em KHODAEI *et al.* (2010). Dessa forma, foi criada para este trabalho uma técnica heurística com o objetivo de chegar na mesma solução encontrada no cluster.

O método heurístico faz o planejamento de forma iterativa, variando o valor de  $\overline{IS}$  e do grupo de trechos considerados para falhas, partindo do resultado encontrado na iteração anterior. Assim como para Garver, o subgrupo inicial estava composto por 10 trechos que apresentavam os maiores cortes, entre os 17 trechos indicados no programa NH2 com corte de carga.

A cada etapa da iteração, o valor de  $\overline{IS}$  foi reduzido, e os valores das iterações foram 100, 80, 50, 30, 10 e 0. Após cada iteração, é efetuada uma nova enumeração dos estados no programa NH2, verificando as mudanças nos cortes, para que o sub-

grupo aumente, conferindo sempre os 10 trechos com maiores cortes e adicionando ao grupo os novos trechos conforme eles se entram na lista dos 10 maiores cortes. Dessa forma, o plano termina considerando falhas nos 17 trechos, para  $\overline{IS} = 0$ , assim como no primeiro método heurístico.

Para ajudar o andamento do método iterativo, as etapas realizam o planejamento sem reconfiguração e com reconfiguração, porém limitando o tempo de execução em até 2 horas para a reconfiguração. A idéia é que um plano com reconfiguração obtido após rodar duas horas seria suficiente para alterar circuitos que poderiam ser boas opções para uma etapa inicial (mas que deixariam de ser boas opções de um planejamento com índice de confiabilidade menor).

Dessa forma, o resultado inicial passado para a próxima etapa consiste apenas nos trechos que foram adicionados tanto no plano sem reconfiguração como no plano com reconfiguração. Esta escolha está justificada pelo fato que os circuitos adicionados apenas na etapa sem reconfiguração não pareciam fornecer boas escolhas. Já os circuitos adicionados exclusivamente na reconfiguração poderiam depender do desligamento de alguma linha, o que não seria uma boa indicação para iniciar a próxima etapa, uma vez que ela iria usar apenas as informações de linhas adicionadas e não das removidas, prejudicando o resultado do plano sem reconfiguração.

A tabela 4.14 mostra alguns resultados encontrados durante as iterações, onde os tempos mostrados representam apenas a etapa anterior às duas horas com reconfiguração. Os números 100, 50 e 10 indicam o valor do  $\overline{IS}$  aplicado em cada etapa. Os resultados dos outros índices estão incluídos no Apêndice A. Em relação ao subgrupo de falhas considerado, as iterações com  $\overline{IS} \leq 30$  já contavam com os 17 trechos identificados pelo programa NH2 como trechos com corte de carga.

Tabela 4.14: Novos circuitos em IEEE 24 barras para PETp em etapas com confiabilidade

Trecho	Custo unitário	PETpf100	PETpf50	PETpf10
2 - 4	33	0	0	1
3 - 24	50	1	1	1
6 - 10	16	1	1	2
7 - 8	16	2	2	2
9 - 12	50	0	1	0
10 - 12	50	1	1	2
12 - 13	66	1	1	1
14 - 16	54	1	1	1
15 - 24	72	0	0	1
16 - 17	36	0	1	1
Custo total		268	354	475
Tempo (minutos)		2,56	1,45	36,62

Comparando as tabelas 4.13 e 4.14, algumas observações são feitas. Primeiro que



no plano com  $\overline{IS} = 50$ , um circuito foi adicionado no trecho 9-12, já no plano com  $\overline{IS} = 10$  o circuito não existe, concordando com o plano encontrado inicialmente que não possui este trecho. Segundo, o plano com  $\overline{IS} = 10$  possui dois circuitos adicionados no trecho 10-12, enquanto que este trecho possui apenas um circuito novo no plano inicial. Porém, o resultado da reconfiguração para  $\overline{IS} = 10$  aponta um plano com apenas um circuito neste trecho, significando que seguindo as iterações, o plano seguinte teria como base um plano que adiciona o mesmo número de circuitos que o plano esperado. Por fim, considerando a segunda observação, temos que o plano base que seria passado para iteração com  $\overline{IS} = 0$ , teria apenas circuitos que sabemos que fazem parte da solução encontrada no cluster. Esta última iteração não foi realizada, pois não foi considerada necessária uma vez que não existia nenhum circuito que poderia indicar uma solução diferente.

Por fim, na tabela 4.15, temos a comparação de confiabilidade entre os resultados obtidos sem confiabilidade e alguns dos resultados encontrados, enquanto que a figura 4.3 mostra um gráfico mostrando a variação do custo de investimento ao longo das etapas. O gráfico mostra a tendência parabólica, característica das curvas de investimento x confiabilidade, onde a inclinação aumenta quando o valor de  $\overline{IS}$  fica próximo a zero (alta confiabilidade). A mesma tendência aparece na tabela, onde os passos do método iterativo mostram custo com crescimento maior para os valores menores de  $\overline{IS}$ .

Outro ponto observado é que, embora tenha ficado com um índice pequeno, o índice calculado pelo programa não chegou a zero, como aconteceu com Garver ao escolher um subgrupo que continha todas as falhas que geravam corte. Porém, a verificação da confiabilidade desse sistema final no programa NH2 (usando fluxo AC, segundo explicado no capítulo 5) resultou em um IS de zero, mostrando que o modelo do programa não é tão eficaz para resolver as contingências quanto o modelo AC, por poder controlar basicamente apenas o despacho. Portanto, o plano com confiabilidade encontrado é do tipo N-1.

Tabela 4.15: Índices de severidade para os diferentes planejamentos de IEEE 24 barras

	PET	PETp	PETpf100	PETpf50	PETpf10	PETpf
IS	152,51	171,43	132,54	71,21	12,39	0,42
Custo	152	218	268	354	475	604

## 4.4 Sul do Brasil

Versão reduzida do sistema existente na região sul do Brasil. Inicialmente considerado em MONTICELLI *et al.* (1982), é um sistema muito usado em trabalhos

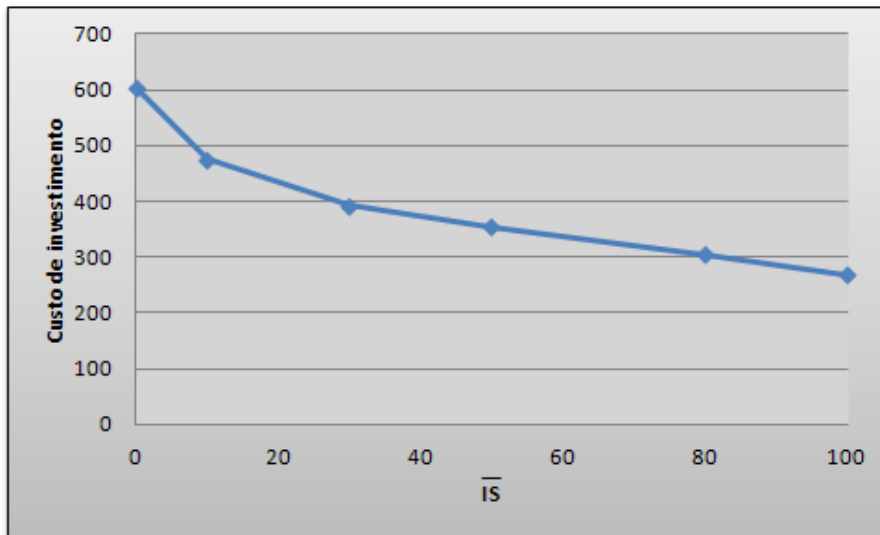


Figura 4.3: Sensibilidade do custo de investimento em relação ao índice de severidade para IEEE 24 barras.

brasileiros sobre o PET, portanto, é um outro bom exemplo para estudar. Como ponto negativo, esse sistema não possui dados de geração e carga reativa. Além disso, o sistema não tem um valor certo para a resistência nos circuitos, mas os trabalhos consideram que a resistência é 1/10 da reatância.

A figura 4.4 (extraída de BINATO (2000) e modificada) 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 em 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 máximo quatro circuitos. Assim como com o sistema Garver, há trabalhos na literatura que consideram o sistema Sul com ou sem redespacho. Este trabalho apresenta resultados apenas de planejamentos com redespacho. Os dados completos do sistema se encontram no Apêndice A.

#### 4.4.1 Planejamento clássico

A tabela 4.16 contém os planos clássicos sem e com reconfiguração para o sistema Sul, tendo uma redução de custo de aproximadamente de 13% no segundo plano, reproduzindo assim os resultados encontrados de MOULIN *et al.* (2010). O plano com reconfiguração desliga um circuito em cada um dos seguintes trechos: 1 - 7, 1 - 2, 4 - 9, 5 - 9, 7 - 8, 16 - 17, 34 - 35, 37 - 39, 40 - 42 e 46 - 19. Ainda foram desligados 2 circuitos em 38 - 42. Nem todos esses circuitos desligados são necessários para que a reconfiguração pudesse encontrar o plano mais econômico,

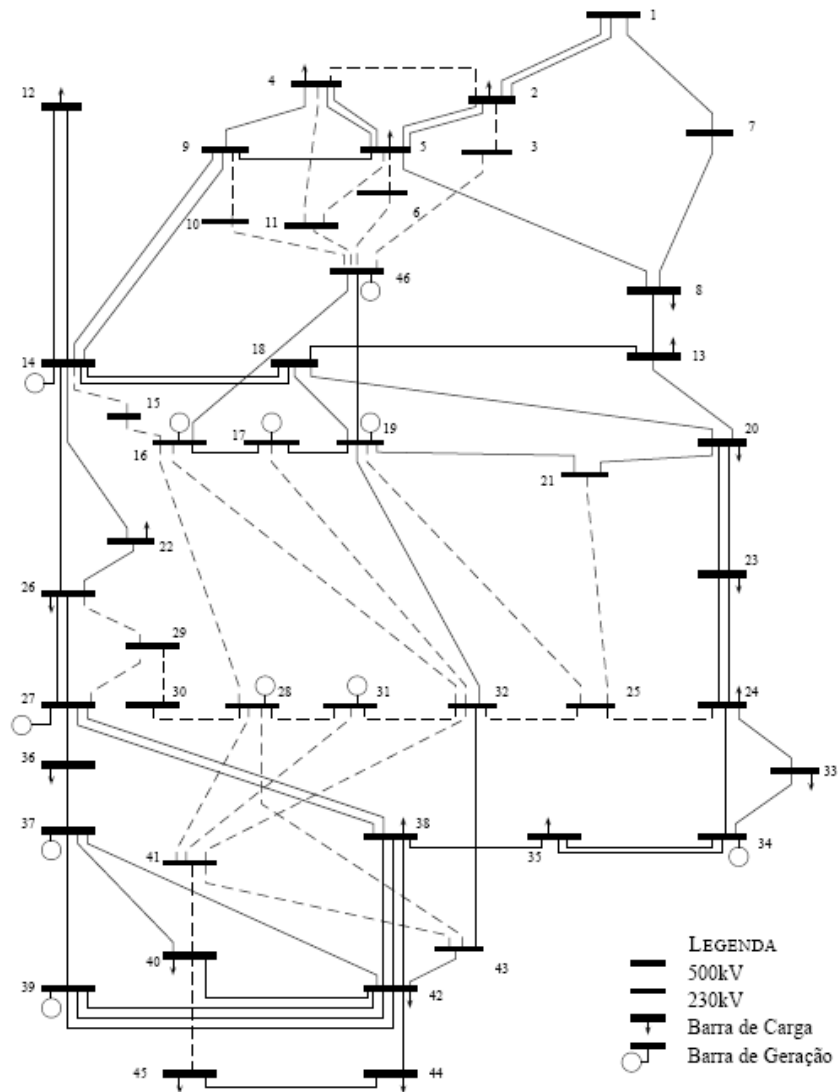


Figura 4.4: Sistema reduzido da região sul do Brasil

mas é uma indicação do que o sistema inicial deve ter uma confiabilidade alta, permitindo tantos desligamentos sem comprometer o funcionamento do sistema.

#### 4.4.2 Planejamento com perdas

Os planos com perdas sem e com reconfiguração do sistema Sul se encontram na tabela 4.17. Observa-se uma redução menor no custo dos planos, de 9%, assim com um número menor de desligamentos. A saber, um circuito foi desligado nos seguintes trechos: 5 - 9, 4 - 5, 14 - 18, 16 - 17, 38 - 42 e 46 - 19.

Embora mais caro, o planejamento com perdas e sem reconfiguração adicionou menos circuitos que o planejamento clássico sem reconfiguração, enquanto que nos planejamentos com reconfiguração, não só o custo aumentou, mas o planejamento com perdas também construiu mais circuitos.

Tabela 4.16: Novos circuitos para o sistema Sul no PET e PETr

Trecho	Custo unitário	PET	PETr
2 - 5	2,581	1	0
13 - 20	7,126	1	0
20 - 23	6,268	1	1
20 - 21	8,178	2	2
42 - 43	8,178	1	1
46 - 6	16,005	1	1
5 - 6	8,178	2	2
Custo total		72,87	63,163
Tempo (minutos)		0,13	1,79

Tabela 4.17: Novos circuitos para o sistema Sul no PETp e PETpr

Trecho	Custo unitário	PETp	PETpr
2 - 5	2,581	0	2
13 - 20	7,126	0	0
18 - 20	12,732	0	2
19 - 21	32,632	1	0
20 - 23	6,268	1	1
20 - 21	8,178	2	1
42 - 43	8,178	1	1
46 - 6	16,005	1	1
5 - 6	8,178	2	2
Custo total		95,795	85,611
Tempo (minutos)		0,37	22,21

### 4.4.3 Planejamento com confiabilidade

Apesar de se tratar de um sistema com quase o dobro de barras que o sistema IEEE 24 barras, tendo também uma quantidade maior de circuitos existentes e candidatos, o planejamento com confiabilidade não foi feito no cluster usado no sistema IEEE, para permitir a observação do tempo necessário para se fazer um planejamento com confiabilidade de um sistema com bases reais. Assim como foi feito no cluster, a opção da reconfiabilidade também não foi utilizada.

A enumeração de estados no programa NH2 identificou 28 trechos com falhas resultando em corte de carga. Para alguns desses trechos, o programa NH2 não conseguiu fazer o sistema convergir (dois para o PETp e oito para o PETpr), e foi considerado para esses casos que toda a carga do sistema deixou de ser abastecida, 6880 MW. O planejamento realizado considerando os 28 trechos com falhas e  $\overline{IS} = 0$  é apresentado na tabela 4.18. O subíndice 1 foi usado para indicar que este foi o resultado encontrado pelo método inicial.

Para o método heurístico, dos 28 trechos críticos, foram selecionados os 17 trechos com corte superior a 100 MW e foi usado um índice de severidade máximo  $\overline{IS}$  de

Tabela 4.18: Novos circuitos para o sistema Sul com confiabilidade.

Trecho	Custo unitário	PETpf <sub>1</sub>
2 - 5	2,581	1
12 - 14	5.106	1
19 - 21	32,632	1
40 - 42	6,268	1
32 - 43	35,196	1
42 - 44	7,934	1
44 - 45	11,924	1
20 - 21	8,178	2
42 - 43	8,178	2
46 - 6	16,005	2
5 - 6	8,178	3
31 - 32	7.052	1
24 - 25	8,178	2
19 - 25	34,748	1
Custo total		249,053
Tempo (horas)		30,39

350, para encontrar o plano sem reconfiguração apresentado na tabela 4.17.

Os passos da heurística reduzem o valor de  $\overline{IS}$  no conjunto 300, 200, 100 50, 30, 10, e 0. O subgrupo de falhas escolhidas adicionar apenas falha com cortes maiores de 100 MW pela enumeração de estados dos planos de cada etapa. Assim, o grupo aumentou para 23 a partir de  $\overline{IS} = 200$  e somente para  $\overline{IS} = 0$ , as falhas menores de 100 MW que não foram removidas nas etapas anteriores entraram no grupo de falhas, totalizando assim 26 trechos testados.

Diferente do sistema IEEE 24 barras, alguns trechos que apresentaram cortes inicialmente foram removidos da lista de falhas com cortes na enumeração conforme as etapas foram realizadas, justificando a diferença entre os 28 trechos identificados no plano sem confiabilidade e os 26 trechos testados na última etapa.

A tabela 4.19 mostra alguns resultados encontrados durante as iterações. Os números 200, 50, e 0 indicam o valor do  $\overline{IS}$  aplicado, onde os índices de 200, 50 e outros foram usados etapas anteriores ao último plano obtido com índice máximo de zero. O subíndice 2 foi usado para indicar que este foram os resultados encontrado pelo método heurístico. Os resultados completos são incluídos no Apêndice A.

Lembrando que o custo do plano sem reconfiguração e sem confiabilidade, mas com perdas, foi de 95,795, observa se junto a tabela 4.19 que assim como no sistema IEEE 24 barras, os custos aumentaram de modo significativo. Pela tabela não é possível identificar nenhuma indicação de que um circuito usado numa etapa deixou de estar presente na etapa seguinte. Mas pela tabela completa no Apêndice A é possível notar que um circuito adicionado no trecho 2-5 foi adicionado no planeja-

Tabela 4.19: Novos circuitos para o sistema Sul em etapas com confiabilidade.

Trecho	Custo unitário	PETpf200 <sub>2</sub>	PETpf50 <sub>2</sub>	PETpf0 <sub>2</sub>
2 - 5	2,581	0	0	1
12 - 14	5.106	0	0	1
18 - 20	12,732	0	0	2
19 - 21	32,632	1	1	1
20 - 23	6,268	1	2	2
33 - 34	8,288	0	0	1
40 - 42	6,268	0	0	1
32 - 43	35,196	0	1	1
42 - 44	7,934	0	0	1
44 - 45	11,924	0	0	1
20 - 21	8,178	3	3	3
42 - 43	8,178	2	2	2
46 - 6	16,005	1	1	2
5 - 6	8,178	2	3	3
31 - 32	7.052	0	0	1
Custo total		112,151	161,793	252,415
Tempo (minutos)		5,33	17,71	30,40

mento para  $\overline{IS} = 30$ , saiu com  $\overline{IS} = 10$ , mas retornou na solução final. Acreditamos então que se as etapas da heurística fossem realizadas sem reconfiguração, o resultado final poderia ser diferente.

Por fim, a tabela 4.20, permite analisar o custo “parabólico” da confiabilidade, observando que novamente variações maiores no índice de severidade resultam inicialmente em pequenos aumentos no custo de investimento, enquanto que para diminuir os últimos 60 minutos o custo dá um salto maior.

Tabela 4.20: Índices de severidade para os diferentes planejamentos do sistema Sul.

	PETp	PETrp	PETpf0 <sub>1</sub>	PETpf200 <sub>2</sub>	PETpf50 <sub>2</sub>	PETpf0 <sub>2</sub>
IS	890,67	1149,94	5,629	287,07	60,25	0
Custo	95,795	85,611	249,053	112,151	161,7927	252,4147

Pela comparação das tabelas, vemos que os planejamentos realizados pelos dois métodos resultaram em planos diferentes. A diferença de custo entre eles é muito pequena, (menor que 2%), e pode ser explicada pelo fato da reconfiguração usada nas iterações não ser feita até o fim, mas é esperado que diferenças entre os planos obtidos pelos dois métodos não sejam significativas. Por outro lado, o método das iterações possui um tempo total menor. Neste caso, cada iteração custou poucos minutos para encontrar um plano, seguidos pelo tempo definido para a reconfiguração (neste caso, de 2 horas). O planejamento realizado em uma iteração precisou de pouco mais de 30 horas para terminar. A diferença no índice de confiabilidade é verificada no próximo capítulo com fluxo AC.

# Capítulo 5

## Análise AC

Este capítulo apresenta algumas análises dos planejamentos realizados pelo modelo DC em relação ao fluxo AC obtido para o mesmo plano pelo programa NH2.

Todos os casos apresentados usaram o limite de tensão entre 0,85 e 1,15 pu.

### 5.1 Garver com redespacho

Por falta de dados, a geração reativa para os testes com Garver ficou ilimitada em todos os geradores, pelo uso de um valor alto para o sistema, 1000MVar. Os dados restantes são os originais de Garver, descritos no Apêndice A.

#### 5.1.1 Planejamento clássico

O sistema resultante do planejamento clássico não é capaz de passar por uma avaliação de fluxo AC sem violações, o que é normal após efetuar planejamento com modelo DC mais simples. Como o redespacho foi permitido na expansão, foram realizados testes de fluxo escolhendo qualquer uma das barras geradoras como referência, menos a barra 6, pois a quantidade de linhas conectadas será facilmente violada se a geração dessa barra aumentar. Em todos os casos, algumas violações foram indicadas. Com referência tanto na barra 3 como na 1, ocorreram violações de geração na referência escolhida (39,18% em 1 ou 3,14% em 3), uma vez que as perdas foram maiores que a folga em cada gerador. Embora a violação de geração com barra referência em 3 ser menor, nesse caso também ocorre uma violação de fluxo no trecho 2-3, de 11,56%.

#### 5.1.2 Planejamento com perdas

Ao considerar as perdas, a diferença entre o plano é justamente a adição de um circuito no trecho 2-3 e, assim, a violação de fluxo neste trecho não ocorre mais para

ambas as escolhas de barra referência, novamente foram testadas as barras 1 e 3. Já a violação de geração continua, mas a porcentagem cai para menos de 2% em ambos os casos.

### 5.1.3 Planejamento com confiabilidade

#### Sem perdas

Para o planejamento com confiabilidade mas sem perdas, duas das barras geradoras não ficaram com a geração no limite, portanto foram realizados fluxos no NH2 usando as barras 1 e 6 como referência. Para ambos os casos, o índice de severidade calculado foi menor que 2 minutos. No caso com a barra 6 sendo referência, ainda foi encontrada uma violação no circuito do trecho 2-6.

#### Com perdas

Para o plano encontrado com perdas e confiabilidade, o cálculo do NH2 não detectou violações e o índice de severidade foi nulo. Neste caso, apenas a barra 6 ainda possuía folga na geração e, portanto, só ela foi usada como referência no NH2.

A tabela 5.1 repete a tabela dos índices de severidade para os planos, mas agora adicionando os melhores valores de índices calculados pelo NH2. É possível ver diferenças entre os valores dos índices calculados pelo próprio modelo DC usado no planejamento e os índices do NH2, que ocorrem por causa da diferença entre os modelos usados no programa de otimização e do NH2. O resultado da confiabilidade com perdas no entanto, continuou tendo um critério N-1 de confiabilidade.

Tabela 5.1: Comparação entre índices de severidade para diferentes planos para Garver com redespacho - NH2 e modelos DC aplicados

	PET	PETp	PETf	PETpf
IS - DC	93,89	82,93	0	0
IS - NH2	57,9106	32,0718	1,0086	0
Custo	110	130	180	190

## 5.2 Garver sem redespacho

Como no caso com redespacho, a geração reativa para os testes com Garver ficou ilimitada em todos os geradores, pelo uso de um valor alto para o sistema, 1000MVar. Os dados restantes são os originais de Garver, descritos no Apêndice A. Assim como no planejamento, o redespacho foi permitido apenas para a barra de referência para a realização da enumeração de estados no NH2.



No sistema resultante do planejamento clássico, a geração máxima na barra 6 foi aumentada em 100 MW para permitir que o sistema tivesse uma solução, pois o sistema estava divergente. Nesse caso, ocorreu uma violação de aproximadamente 3% de geração ou 17,5 MW, junto com pequenas violações, menores de 4% ocorrem nas linhas que conectam a barra 6 ao sistema. Em todos os outros resultados a análise com fluxo AC não identificou nenhuma violação para o caso base dos planos.

Comparando com o resultado do planejamento com perda  $PET_{p_1}$  com RODRIGUEZ *et al.* (2008), o plano ficou um pouco mais barato, por não ter o custo dos capacitores, apesar de ter um custo maior considerando apenas os circuitos. Porém, no sistema usado por Rodriguez, além da mudança na barra de referência, foram feitas mudanças nas cargas reativas também, podendo resultar em uma diferença.

A tabela 5.2 repete a tabela dos índices de severidade para os planos, junto com os valores de índices calculados pelo NH2 (lembrando que o índice 1 indica os casos planejados com a barra de referência sendo a 1, e os demais tiveram como referência a barra 6). Como esperado, o índice para  $PET_f$ , que foi de zero no modelo sem perdas não foi repetido agora com fluxo AC. Embora tenha sido muito próximo de zero, apenas o plano obtido com perdas e confiabilidade teve índice zero no fluxo AC. Em relação aos resultados onde a barra 1 foi referência, seus resultados tiveram números baixos, mas ocorreram problemas de convergência e alguns casos foram removidos da estatística, levando a crer que o índice seria maior.

Tabela 5.2: Comparação entre índices de severidade para diferentes planos para Garver sem redespacho - NH2 e modelos DC aplicados

	PET	$PET_p$	$PET_{p_1}$	$PET_f$	$PET_{pf}$	$PET_{pf_1}$
IS - DC	80,10	39,37	37,29	0	0	0
IS - NH2	132,3548*	31,4871	4,9259*	2,5830	0	0*
Custo	200	280	200	298	359	270

O asterisco nos índices indicam que o valor deve ser maior que os valores presentes na tabela, pois para PET, a geração máxima da barra de referência foi aumentada para permitir a realização do fluxo, e esse aumento pode ter melhorado o índice, enquanto que nos outros casos ocorreram falhas que foram removidas da estatística após o NH2 não ter sido capaz de convergir para uma solução. Para  $PET_{p_1}$ , foram 9 falhas removidas da estatística, enquanto que para  $PET_{pf_1}$  foram 4.

### 5.3 IEEE 24 barras

Os dados originais deste sistema continha valores de geração e carga reativa, que para esse trabalho foram multiplicados por 3, da mesma forma como foi feito com a geração e carga ativa na adaptação do sistema de teste de confiabilidade para um

sistema de teste para planejamento da expansão.

### **5.3.1 Planejamento clássico**

O sistema resultante do planejamento clássico possui várias violações na análise com fluxo AC. Apesar do limite de tensão ser grande, duas barras tiveram tensões mais baixas que o limite. A barra de referência já estava com a geração no limite pelo resultado do planejamento, as perdas adicionadas pelo modelo AC resultaram então em violação em 27,3% da geração da barra de referência. Pela quantidade de barras, não foi dado o mesmo tratamento dado a Garver onde foram verificadas a possibilidade de alterar a barra referência. Por fim, 4 circuitos em 3 trechos tiveram violações que variaram entre 6,84 e 22,04%.

### **5.3.2 Planejamento com perdas**

Assim como no caso anterior, algumas violações foram encontradas. Uma das barras com violação de tensão continua com tensão menor que o limite, apesar de ter aumentado. Dos circuitos com violação, um dos quatro continua tendo violação, mas de apenas 4,98%. Por considerar as perdas e aumentar a geração em todo o sistema, esse plano não apresenta violação de geração na barra de referência.

### **5.3.3 Planejamento com confiabilidade**

Para esse sistema o planejamento com confiabilidade foi realizado apenas para o modelo com perdas. O planejamento também foi feito com dois métodos, um como foi feito para Garver, onde o processamento foi realizado em um cluster e outro num método iterativo que indicou chegar ao plano do método direto. Verificando esse plano encontrado, o fluxo AC não possui qualquer violação.

A tabela 5.3 repete a tabela dos índices de severidade para os planos junto com os índices obtidos no programa NH2, sem mostrar nenhum dos resultados intermediários obtidos nas iterações. Novamente observa-se a progressão do índice que teve reduções semelhantes entre cada plano, mas que teve seu custo crescendo muito mais quando a confiabilidade foi adicionada. Como ocorreu com Garver, o resultado da confiabilidade, com perdas, continuou tendo um critério N-1 de confiabilidade no fluxo AC, apesar da indicação pelo programa de que ainda poderia haver falhas com cortes, mostrando que o NH2 e o fluxo AC possuem uma flexibilidade maior para a remoção de cortes.

Tabela 5.3: Comparação entre índices de severidade para os diferentes planejamentos de IEEE 24 barras - NH2 e modelos DC aplicados

	PET	PET <sub>p</sub>	PET <sub>pf</sub>
IS - DC	152,51	171,43	0,42
IS - NH2	144,4642	86,0388	0
Custo	152	218	604

## 5.4 Sul do Brasil

Os dados originais deste sistema não continham dados sobre geração e carga reativa. Os resultados apresentados foram realizados considerando uma geração sem limite (valor alto) de geração reativa, mas as cargas são todas de potência puramente ativa.

### 5.4.1 Planejamento clássico

O sistema resultante do planejamento clássico apresentou um tipo de violação na análise com fluxo AC. Neste caso, foram 4 circuitos em 3 trechos que tiveram violações entre 1,47 e 8,58%. O sistema do plano com reconfiguração não teve convergência.

### 5.4.2 Planejamento com perdas

O planejamento com perdas reduziu as violações de fluxo de 4 circuitos para apenas um, mas a gravidade dessa violação é maior, de 13,45%. Já para o plano com perdas e reconfiguração, um trecho teve pequenas violações de 2,28% em seus dois circuitos.

### 5.4.3 Planejamento com confiabilidade

O planejamento com confiabilidade nesse caso foi feito todo pelo método iterativo e o sistema final encontrado ainda apresenta uma violação de fluxo no mesmo circuito que do planejamento com perdas, a gravidade, no entanto, é menor, de 1,87%. Enquanto que o plano encontrado pelo método direto não apresentou violações.

A tabela 5.3 mostra os índices de severidade para esses planos analisados com fluxo AC, junto com os índices anteriores obtidos com os modelos com fluxo DC, que mostra uma boa progressão do índice. Embora pequeno, o índice do plano encontrado de forma direta realmente não possui critério N-1 (como o índice calculado pelo programa indicou), enquanto que o plano resultante das iterações possui o critério N-1 de confiabilidade no fluxo AC, como também foi visto na tabela 4.20.

O IS de PET<sub>pf1</sub> foi diferente de zero por causa de apenas um circuito, no trecho 19-25. Este trecho não possuía nenhum circuito no sistema original e nem nos planejamentos encontrados sem confiabilidade, o que significa que ele não poderia

Tabela 5.4: Comparação entre índices de severidade para os diferentes planejamentos do sistema Sul - NH2 e modelos DC aplicados

	PET <sub>Trp</sub>	PET <sub>p</sub>	PET <sub>pf<sub>1</sub></sub>	PET <sub>pf<sub>0</sub>2</sub>
IS - DC	1149,94	890,67	5,629	0
IS - NH2	841,8477	316,6455	4,7259	0
Custo	85,611	95,795	249,053	252,4147

ser identificado entre o grupo de falhas que geram corte usado no planejamento com confiabilidade.

Caso o planejador queira que o sistema atenda ao critério N-1, duas opções podem ser escolhidas, duplicar o circuito 19-25 (que é muito caro) ou refazer o planejamento adicionando este trecho no grupo de falhas. Duplicar o circuito é uma escolha rápida, mas o custo passará a ser mais de 10% maior. Realizando um novo planejamento, um plano mais caro será encontrado, reduzindo mais a diferença entre os custos entre os planos obtidos, podendo até mesmo igualar os resultados. Porém como o tempo necessário para fazer um novo planejamento é grande e a diferença de custo possível é pequena, não foi realizado um novo planejamento.

## 5.5 Observações gerais

Com esses resultados foi possível observar que o planejamento clássico com o modelo DC realmente pode resultar em muitos problemas quando se faz uma verificação com fluxo AC. A representação das perdas consegue diminuir os aspectos negativos, embora não consiga remover por completo em todos os casos.

Sobre a confiabilidade, foi observado uma melhora nos sistemas em comparação ao modelo com perdas. Mas para ter bons resultados as perdas precisam ser consideradas também, uma vez que os planejamentos sem perdas não chegaram ao critério N-1 de confiabilidade.

## Capítulo 6

# Planejamento da Expansão no Sistema de Distribuição de Alta Tensão - Testes e Resultados

Este capítulo apresenta um problema real de planejamento da expansão da transmissão em um sistema de distribuição em uma cidade do nordeste do Brasil. O desafio deste planejamento ocorre na intenção da distribuidora de dividir o sistema regional atual em dois regionais separados. Assim sendo, o planejamento deve indicar como dividir o sistema em duas partes, atendendo a critérios de economia e confiabilidade. Essa separação implica na eliminação de alguns circuitos no sistema existente, eliminação que só é possível usando o modelo com reconfiguração.

Este capítulo considera diferentes planos, obtidos impondo a separação em dois regionais, e também planos para expandir o sistema sem fazer a separação, a efeito de comparação.

### 6.1 O sistema de distribuição

O sistema considerado é representado pela figura 6.1, que mostra subestações e linhas do sistema de distribuição. As subestações em cor verde estão na fronteira entre o SIN e o sistema de distribuição (com tensões de 230 e 69 kV) e, portanto, são consideradas as barras geradoras do sistema. A futura subestação na fronteira é mostrada inicialmente isolada, mas é considerado que, assim como a subestação anterior, ela terá 4 transformadores com capacidade de 100 MW. Os transformadores não aparecem na imagem (os lados de alta e de baixa tensão estão representados como uma única barra para simplificar a figura). Assim, a geração máxima para o sistema é de 800 MW, com 400 MW em cada barra geradora.

As barras pretas representam as subestações existentes e as barras azuis repre-

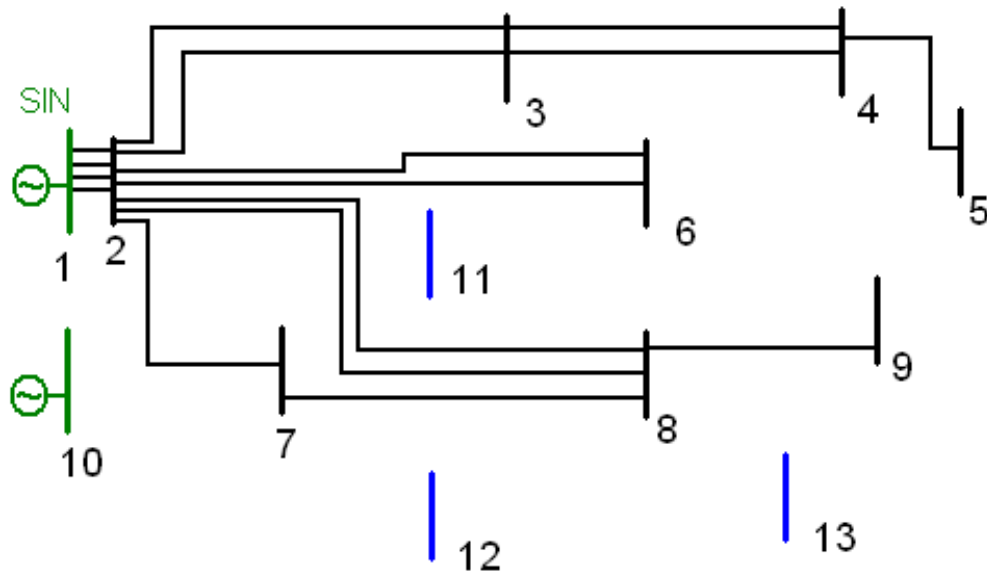


Figura 6.1: Sistema de Distribuição de uma cidade nordestina

sentam as novas subestações previstas para a expansão do sistema de distribuição. Em cada uma das barras pretas, existem transformadores (69/13kV) e o sistema de distribuição continua com mais as linhas até chegar aos consumidores, exceto uma subestação próxima a um polo industrial, que também possui uma alimentação de 69kV. Este estudo porém, é aplicado apenas na região de 69 kV e a carga de tensões menores é aplicada na saída dos transformadores, que assim como os transformadores de 230 para 69 kV, também não estão representados na imagem da figura 6.1.

## 6.2 Planejamento

Para o planejamento, todas as barras azuis serão construídas e o custo delas foi imbutido no custo dos transformadores, conforme valores reais de transformadores e de custo para subestações (que depende da quantidade de transformadores nela indicados pela distribuidora). Nas subestações existentes também há transformadores candidatos, mas apenas para as subestações com espaço físico para novos transformadores, ou com transformadores existentes a serem substituídos por transformadores de capacidade maior. A capacidade e a reatância desses transformadores candidatos também são reais. Para as novas subestações, o planejamento já iniciava alterando as variáveis de decisão de alguns transformadores, pois sabendo a carga e a capacidade dos transformadores, um número mínimo de transformadores era facilmente identificado.

As linhas candidatas foram escolhidas de acordo com a proximidade entre as subestações e pela indicação da distribuidora, no caso das escolhas de 3 das 4 opções

de ligação da nova subestação de 230/69 kV e o sistema de distribuição. Os valores de custo e dados de linhas como reatância, resistência e capacidade são valores reais de dois tipos de cabos. Para a ligação entre a nova barra verde com barras pretas ou azuis foi usado um cabo com maior capacidade, enquanto que para os outros trechos foram usados cabos com menos capacidade, assim como já ocorre nas linhas existentes.

Os dados completos do sistema foram incluídos no apêndice A.

Uma vez que não houve troca de transformadores em nenhum plano com reconfiguração, e os transformadores adicionados são necessários em todos os planos, a tabela 6.1 indica onde e quantos transformadores de 69/13 kV foram adicionados. Esse custo será constante em todos os planos apresentados. O campo “Custo SE” na tabela indica o custo da preparação da subestação para o número de transformadores adicionados, valor este presente apenas para as novas subestações, dado em milhões de reais. Já o valor unitário de cada transformador é de 2,13, em milhões de reais.

Tabela 6.1: Transformadores adicionados ao sistema de distribuição

Barra	Quantidade	Custo SE
7	1	-
9	1	-
11	1	0,8
12	3	1,2
13	2	1,2
Custo dos transformadores		18,11

### 6.2.1 Reconfiguração

Além da necessidade da reconfiguração para a divisão do sistema, pela escolha da distribuidora em adicionar novas subestações que estão próximas de algumas linhas existentes, o planejamento com reconfiguração considera a possibilidade de “quebrar” algumas linhas para realizar novas ligações usando linhas já existentes. Por exemplo, as linhas entre as barras 2 e 6 passam próximas à barra 11. Cada uma dessas linhas poderia ser “quebrada” fazendo uma ligação da barra 2 para 11 e de 11 para 6, assim como apenas uma dessas novas ligações podem ser feita, desligando algum outro trecho se necessário. Ou seja, as quebras são possíveis seccionamentos que podem ser realizados em algumas linhas.

Para permitir essas diferentes combinações, as linhas que podem ser quebradas foram representadas em partes diferentes e novas restrições foram adicionadas especificamente para as quebras possíveis, mostradas na tabela 6.2.

Tabela 6.2: Trechos do sistema de distribuição que podem ser quebrados

Trecho	Quebra em
2 - 8	7
2 - 8	12
7 - 8	12
2 - 6	11

Este tipo de problema só pode ser resolvido se além de adicionar linhas, o modelo permitir a *reconfiguração*.

Nos planos, uma quebra de linha será representada por um asterísco (\*) seguindo o número da barra onde a quebra foi realizada.

Além dessas restrições, também foram criadas restrições para a troca de transformadores onde existem transformadores com capacidade menor que o transformador candidato, mas como já explicado, nenhuma troca foi realizada pelo processo de otimização.

## 6.2.2 Um sistema único de distribuição

Primeiro são mostrados alguns resultados para a expansão do sistema sem realizar a separação em dois regionais.

### Planejamento Clássico

A tabela 6.3 mostra os planos encontrados com o planejamento clássico sem e com reconfiguração. Vemos que a reconfiguração reduziu o custo total em aproximadamente 14%, e além de utilizar uma quebra de linha, quebrando o trecho entre 7 e 8, ainda teve o desligamento dos circuitos 4 - 5, 2 - 7, bem como o trecho restante da quebra 12\* - 8.

Tabela 6.3: Novos circuitos para o sistema de distribuição no PET e PETr

Trecho	Custo unitário	PET	PETr
10 - 7	2,82	0	1
10 - 12	4,43	1	0
2 - 11	1,82	1	1
7 - 12	1,83	1	0
9 - 13	1,33	1	1
6 - 5	1,48	1	1
6 - 11	1,82	1	0
7 - 12*	0,82	0	1
Custo dos transformadores			18,11
Custo total		30,82	26,38



## Planejamento com perdas

A tabela 6.4 mostra os planejamentos com perdas sem e com reconfiguração. Mais uma vez a reconfiguração voltou a reduzir o custo total em 11,5%, realizando apenas desligamentos dos trechos 7 - 8 e 4 - 5, sem quebras. Em comparação com os planos sem perdas, o aumento foi muito pequeno, uma vez que a diferença entre os planos foi basicamente a inclusão de uma linha um pouco mais cara do que a linha que saiu da solução (troca da linha em 9 - 13 por uma em 8 - 13).

Tabela 6.4: Novos circuitos para o sistema de distribuição no PETp e PETrp

Trecho	Custo unitário	PETp	PETrp
10 - 7	2,82	0	1
10 - 12	4,43	1	0
2 - 11	1,82	1	1
7 - 12	1,83	1	1
8 - 13	1,46	1	1
6 - 5	1,48	1	1
6 - 11	1,82	1	0
Custo dos transformadores			18,11
Custo total		30,95	27,39

## Custo das perdas de potência

Para Sistemas de Distribuição, o custo das perdas de potência ativa é relevante, pois essa potência perdida no caminho já foi paga pela distribuidora, mas por não ser consumida pelo consumidores representa um custo para a operação da distribuidora. De acordo com uma nota técnica publicada pela ANEEL em 2009, a distribuidora pode cobrar dos consumidores a potência perdida, porém existe um limite proveniente da revisão tarifária.

Para calcular o custo das perdas, temos que o custo da energia é de 113 reais/MWh, que é o Custo Marginal de Expansão da Geração calculado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética), FERREIRA *et al.* (2011).

Como explicado na seção 3.2.1, o modelo de perdas é uma aproximação que estará quase sempre indicando um valor superior às perdas reais do sistema. Além disso, em 3.2.2 foi mostrado que o modelo poderia deixar de seguir a curva linearizada da figura 3.1, indicando valores ainda maiores de perdas.

Para evitar que o programa use valores muito maiores que os da curva linearizada, foi adicionada uma nova restrição ao problema de planejamento. Essa restrição faz o somatório das perdas multiplicado pelo custo da energia para identificar o custo anual, depois de subtrair das perdas o valor máximo de perdas que a distribuidora pode repassar na conta dos consumidores. O limite superior da restrição usa um

fator que indica a relação máxima permitida entre o custo da perda de potência e o custo de investimento (que é multiplicado por 0,11 para ser anualizado e permitir uma comparação justa dos valores). Em (6.1) o custo das perdas e de investimento são denotados por  $C_p$  e  $C_{inv}$ , respectivamente. Os cálculos correspondentes são dados pelas equações (6.2) e (6.3). Por usar valores em pu, no cálculo realizado para o custo das perdas o fator 100 transforma o valor em MW, 8760 são as horas em um ano e  $0,65^2$  é um fator usado para reduzir a energia, uma vez que os valores de geração e carga usados representam a carga máxima, sem a variação da carga ao longo dos dias. Por limitar as perdas em função do investimento, a nova restrição ajuda a controlar perdas excessivas:

$$C_p \leq FATOR * 0,11 * C_{inv} \quad (6.1)$$

$$C_p = 113 * 100 * 8760 * 0.65^2 * \left( \sum_{i \in B} g_i - \sum_{i \in B} d_i \right) \quad (6.2)$$

$$C_{inv} = \sum_{km \in \Omega^1} c_{km} x_{km} \quad (6.3)$$

A utilidade da condição (6.1) depende de achar um bom fator, uma vez que um fator muito grande permitirá investimentos mínimos e perdas grandes enquanto que um fator pequeno demais forçará investimentos maiores para reduzir as perdas, sendo que o custo total pode ser o mesmo nos dois casos. É necessário fazer diferentes rodadas para encontrar um fator que consiga reduzir o custo total de forma satisfatória.

Para encontrar um custo total mínimo, poderia ser adicionado na função objetivo o custo das perdas, uma vez que assim os valores tanto de investimento como das perdas teriam que ser mínimos e o programa certamente terá as perdas seguindo a curva linearizada. Porém essa abordagem resulta em um custo computacional muito maior do que o uso da restrição, pelo menos para os casos rodados.

Mesmo tendo um custo computacional menor, o uso da restrição também tem impacto no tempo de execução além de precisar de algumas rodadas para verificar se o fator está bem escolhido.

Pensando em permitir uma boa comparação entre o plano sem e com reconfiguração, o fator usado para encontrar os planos da tabela 6.5 foi fixado em 1,3. Desta forma o custo das perdas não pode superar o custo de investimento em mais de 30%. Comparando com os planejamentos anteriores, que não consideravam o custo das perdas, vemos que houve um aumento no custo de investimento de aproximadamente 6,6% entre os plano sem reconfiguração e 13% para os planos com reconfiguração.

Algumas mudanças podem ser observadas entre os resultados obtidos ao se con-

Tabela 6.5: Novos circuitos para o sistema de distribuição no PETp+ e PETrp+

Trecho	Custo unitário	PETp+	PETrp+
10 - 13	6,05	1	1
2 - 12	2,21	1	1
2 - 11	1,82	1	1
9 - 13	1,33	1	1
6 - 4	1,66	1	0
6 - 5	1,48	0	1
6 - 11	1,82	1	0
Custo dos transformadores			18,11
Custo total		33,0	31,0

siderar ou não o custo das perdas como restrição. A notação “+” na tabela se refere ao caso que considera a restrição. Mais uma vez, o plano com reconfiguração diminui o custo, deixando de adicionar o circuito no trecho 6 - 11. A não construção desse circuito está sempre relacionada à remoção do circuito 4 - 5, que voltou a ser desligado junto com uma linha nos trechos 2 - 8, 7 - 8, 8 - 9 e 3 - 4.

A tabela 6.6 contém o custo total anual para os últimos 4 planejamentos (tabelas 6.4 e 6.5). Como pode ser visto nestes casos, a reconfiguração reduziu o custo de investimento, mas resultou em uma alta no custo das perdas. O valor do custo total anual não é a soma direta das duas colunas anteriores. Como foi dito inicialmente, existe um limite que a distribuidora pode repassar para os consumidores na tarifa e o valor anual nesse caso é pouco mais de 5 milhões de reais, fazendo com que o custo causado pelas perdas para a distribuidora seja nulo nos dois planos sem reconfiguração, já a redução no custo de investimento feito pela reconfiguração resulta em custos significativos de perda de potência, resultando em totais maiores.

Tabela 6.6: Comparação dos custos totais para a distribuidora dos planos com perda de potência

Plano	Custo anual de investimento	Custo das perdas	Total anual
PETp	3,40	4,98	3,40
PETrp	3,01	8,41	6,21
PETp+	3,63	4,64	3,63
PETrp+	3,41	6,52	4,73

Nesse caso, por causa do limite de repasse do custo das perdas, o planejamento realizado com o fator não teve impacto no custo total para a distribuidora. Mas fazendo a soma dos valores sem o limite, o plano com a restrição de relação máxima entre custo de perda de potência e investimento (sem reconfiguração) conseguiria reduzir o custo total, indicando que é uma abordagem válida em sistemas de transmissão, tanto por reduzir custos totais como também por reduzir um pouco a quantidade de energia que deveria ser gerada. Da mesma forma que se o limite do repasse

fosse menor, provavelmente também seria possível fazer uma economia. Neste sentido, se desejado pela distribuidora, o modelo poderia ser aprimorado incorporando esse valor máximo de repasse no problema de otimização, através de uma restrição, por exemplo.

### Planejamento com confiabilidade

Como nos sistemas do capítulo anterior, o planejamento com confiabilidade escolhe um subgrupo de falhas críticas bem como um índice de severidade máximo,  $\overline{IS}$ . O subgrupo escolhido teve as 23 falhas com os maiores cortes (de acordo com a enumeração de contingências simples do programa NH2) para o plano com perdas e sem reconfiguração da tabela 6.4. Para agilizar o processo, o valor de  $\overline{IS}$  foi fixado em 10.

A tabela 6.7 mostra o resultado do planejamento encontrado após 20 horas de execução, resultando em um aumento significativo no custo de investimento em relação aos planos com perdas (sem considerar o custo de perdas, superior a 40 milhões de reais). Com o aumento da quantidade de linhas adicionadas, o valor das perdas ficou menor do que o valor encontrado nos casos anteriores e, portanto, teve um custo menor que o limite que a distribuidora pode repassar na conta. A reconfiguração não melhorou o plano obtido sem reconfiguração.

Tabela 6.7: Novos circuitos para o sistema de distribuição com confiabilidade

Trecho	Custo unitário	PETpf
10 - 12	4,43	1
10 - 13	6,05	1
2 - 12	2,21	1
2 - 11	1,82	1
2 - 3	3,41	1
9 - 5	1,64	1
9 - 13	1,33	1
6 - 12	1,99	1
12 - 11	1,77	1
C. dos transformadores		18,11
Custo total		42,76

A tabela 6.8 apresenta os índices de severidade já calculados pelo programa NH2 para todos os planos com perdas apresentados no capítulo. É possível observar que os planos sem confiabilidade têm índices de severidade catastróficos (mais de 1000 minutos). Esse índice cai para pouco mais de 40 minutos após introduzir confiabilidade no modelo, mesmo sem considerar todas as falhas, e ainda permitindo que existissem falhas no grupo escolhido.

Tabela 6.8: Índices de severidade para os diferentes planejamentos do sistema de distribuição.

	PETp	PETrp	PETp+	PETrp+	PETpf
IS	1079,61	1400,23	841,61	1357,19	26,47
Custo	30,95	27,39	33,0	31,0	42,76

### 6.2.3 Divisão em dois sistemas de distribuição

Com a escolha da distribuidora em criar um regional separado a partir da futura subestação de fronteira com o SIN, o PET fica mais complexo. O ideal seria definir antes da expansão quais barras ficariam em cada regional, pois bastaria evitar os circuitos entre os regionais. Sem essa informação, foi necessário evitar qualquer caminho que pudesse ligar as barras 1 e 10 pois apenas sabe-se que essas barras deviam ficar em regionais diferentes. Para isso, foram adicionadas manualmente restrições com as variáveis  $x_{km}$ , que representam cada caminho possível, indicando que a soma das variáveis de um caminho que liga as barras 1 e 10 devem ser no máximo a quantidade de circuitos no caminho menos um, impossibilitando assim que o caminho em questão possa existir.

Apesar da figura 6.1 ter apenas 13 barras, o uso de barras fictícias para as quebras de linhas possíveis e quantidade de circuitos candidatos fez com que existissem mais de 1000 caminhos possíveis entre as barras 1 e 10. Dessa forma, o circuito candidato entre as barras 10 e 13 foi removido do conjunto, por ter uma grande distância, sendo muito caro também. Outra medida adotada para diminuir o número de caminhos foi não fazer nenhum caminho com quebra de linha. Assim, foram adicionadas pouco menos de 600 restrições.

#### Etapa de Identificação dos regionais

De posse das restrições necessárias para realizar a divisão, foi realizado um primeiro planejamento com perdas e reconfiguração, uma vez que sem reconfiguração o planejamento só poderia fazer ligações entre as barras isoladas. Porém, uma quebra de linha foi realizada, como não existiam restrições para casos com quebra, e o sistema não ficou separado. Era esperado que isso pudesse ocorrer, tendo duas quebras de linha próximas à barra 10. Então foram criadas mais duas restrições para representar o caminho criado por essa quebra e o caminho paralelo e foi feito um novo planejamento. Adicionando apenas essas duas restrições e não todos os caminhos possíveis por todas as quebras, o programa dividiu o sistema em dois regionais como desejado. O resultado é apresentado na coluna PETrpS da tabela 6.9.

A divisão foi feita removendo um caminho específico que impedia a separação no planejamento inicial. Assim sendo, talvez seja possível fazer a separação sem criar

manualmente tantas restrições, simplesmente fazendo um planejamento e criando as restrições específicas para eliminar os caminhos indesejados introduzidos no plano obtido. Embora seja necessário repetir o planejamento várias vezes, ainda pode ser mais rápido do que listar 600 ou mais caminhos.

Porém, a divisão criou dois regionais de porte muito diferente (como pode ser visto na figura 6.2): o regional da futura subestação de fronteira ficou com apenas 3 barras, incluindo a barra 10. Dessa forma, foi feito um novo planejamento, limitando a geração mínima da barra 10 em 220 MW, com o intuito de encontrar uma divisão melhor balanceada em relação à carga do sistema para cada regional. Para que o programa não fugisse da curva de perdas, dando uma ilusão de divisão da carga do regional iniciado na barra 10 (com grande parte de uma das gerações sendo perdida simplesmente por usar pontos fora da curva), o problema de otimização incorporou uma restrição para o custo das perdas em relação ao custo de investimento. Como o objetivo dessa expansão era apenas identificar como poderiam ficar os dois regionais, o fator usado foi de 1,8 para evitar que o erro das perdas fosse muito maior, mas sem forçar a construção de muitas linhas. O resultado pode ser visto na coluna PETrpS220 da tabela 6.9 e na figura 6.3, onde as linhas tracejadas em ambas as figuras indicam os circuitos existentes que foram desligados.

Tabela 6.9: Circuitos adicionados e removidos para a divisão do sistema.

	Divisão 1	Divisão 2
Trecho	PETrpS	PETrpS220
10 - 7	1	2
10 - 12	0	1
2 - 11	1	0
7 - 12	1	0
7* - 8	0	2
8 - 13	1	1
6 - 5	1	1
6 - 11	1	0
12 - 11	0	1
Circuitos removidos		
2 - 7	-1	-1
7 - 8	-1	-1
2 - 7*	0	-2
3 - 4	0	-1
4 - 5	-1	-1

Dessa forma, temos duas formas diferentes de dividir o sistema. A tabela 6.10 indica as barras que fazem parte de cada regional com ambas as divisões, sendo que o regional 1 faz fronteira com o SIN pela barra 1 e o regional 2 pela barra 10. A divisão sem valor especificado de geração é chamada de divisão 1 a seguir, já a

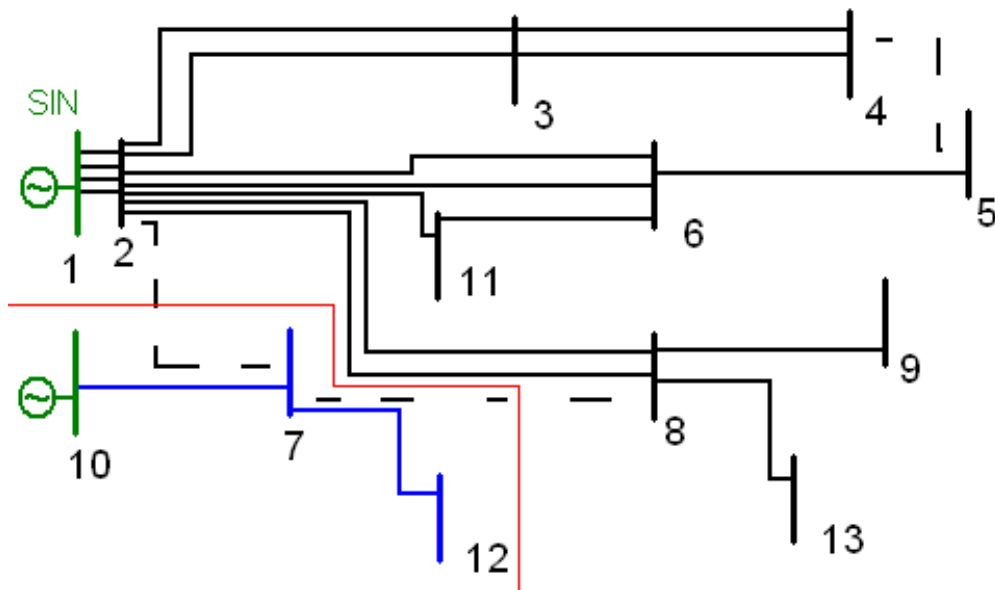


Figura 6.2: Divisão 1 do sistema de distribuição.

divisão 2 é a encontrada com a geração em 10 tendo valor mínimo de 220 MW. Além de dividir a carga, a segunda divisão também possui uma boa repartição das barras.

Tabela 6.10: Distribuição das barras nos regionais.

Regional	Barras	
	Divisão 1	Divisão 2
1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11 e 13	1, 2, 3, 4, 5 e 6
2	7, 10 e 12	7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13

### Etapa de Planejamento

De posse dos dois regionais separados, é feito o planejamento para cada subsistema, que passa a ter menos candidatos ao se remover as linhas candidatas entre barras de regionais diferentes, a quantidade de circuitos iniciais também é menor e, no caso da segunda divisão, trechos que foram desligados na divisão, mas que podem ser aproveitados mantendo a divisão, são usados como candidatos sem custo adicional. Sobre a nova configuração inicial para o sistema usada nos próximos planejamentos, foram removidas apenas as linhas existentes ao redor das barras movidas para o segundo regional: os trechos 2-7, 7-8 e 2 - 8 (este último apenas para a segunda divisão, tendo a quebra que permite o trecho 7\* - 8 como candidata). Já os circuitos adicionados nos planejamentos da divisão, voltam a ser circuitos candidatos, assim como o trecho 10 - 13, removido para diminuir os caminhos possíveis entre 1 e 10, volta a ser candidato para a segunda divisão.

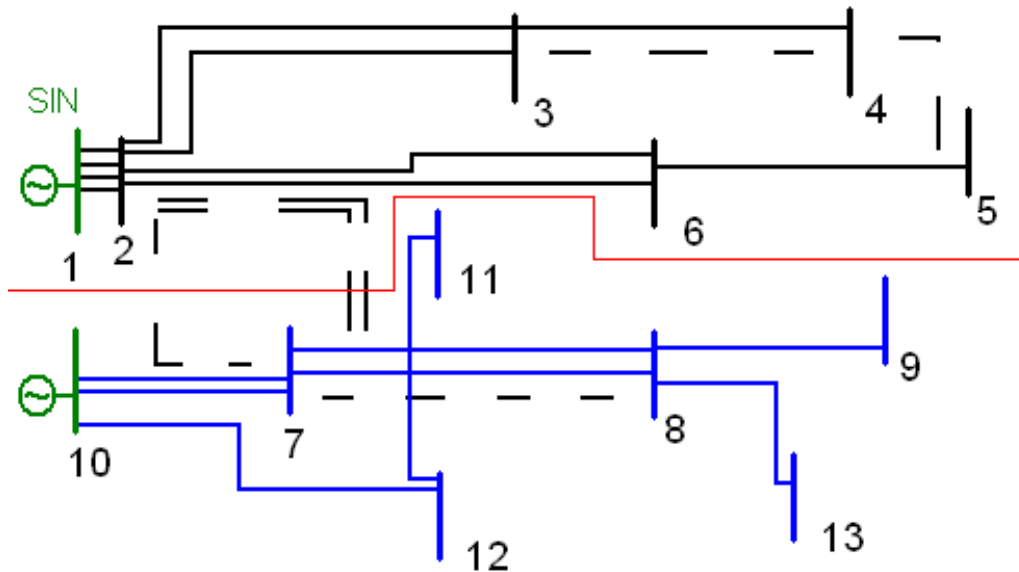


Figura 6.3: Divisão 2 do sistema de distribuição.

### Planejamento com perdas

Como foi visto na seção com o sistema de distribuição sem divisão, considerar o custo das perdas no modelo pode aumentar o custo de investimento para reduzir a soma do custo total, de investimento e perdas. Ao mesmo tempo, foi visto que o planejamento com confiabilidade adiciona mais circuitos e reduz mais as perdas. Assim, tendo os regionais separados, foi feito um novo planejamento com perdas, mas sem o fator que limita o custo das perdas em função do custo de investimento. Outra modificação refere-se à barra 11, que pela divisão 2 ficou no regional 2, mas foi mantida no regional 1 em ambos os casos, pela proximidade da barra às barras 2 e 6, sendo um dos pontos de quebra.

A tabela 6.11 mostra os planos para o sistema dividido para as divisões 1 e 2, indicados pelo índice d1 e d2 respectivamente, também mostrados nas figuras 6.4 e 6.5. Os planos foram semelhantes aos planos da divisão, porém sem a restrição para limitar as perdas, foram construídos menos circuitos. O circuito 4 - 5 voltou a ser desligado nos dois planos, e o circuito 3 - 4 dessa vez foi desligado na divisão 1 e não na 2, provavelmente esse desligamento não causa nenhuma redução do investimento, diferente do circuito 4 - 5.

Como esperado, a tabela mostra que existe uma diferença significativa de custo importante entre a divisão 1, onde um dos regionais possui poucas barras, e a nova divisão, que define dois regionais com uma distribuição parecida da carga (e um número semelhante de barras). Porém, os planos não são completamente diferentes, tendo muitos circuitos em comum, e com possibilidade de transição entre eles. Assim, os planos indicam que se a distribuidora pretender ter regionais com níveis



Tabela 6.11: Novos circuitos para o sistema de distribuição dividido.

Trecho	Custo unitário	PETrp <sub>d1</sub>	PETrp <sub>d2</sub>
10 - 7	2,82	1	2
10 - 12	4,43	0	1
2 - 11	1,82	1	1
7 - 12	1,83	1	0
7* - 8	0,82	0	2
8 - 13	1,46	1	1
6 - 5	1,48	1	1
Custo dos transformadores			18,11
Custo total		27,52	34,58

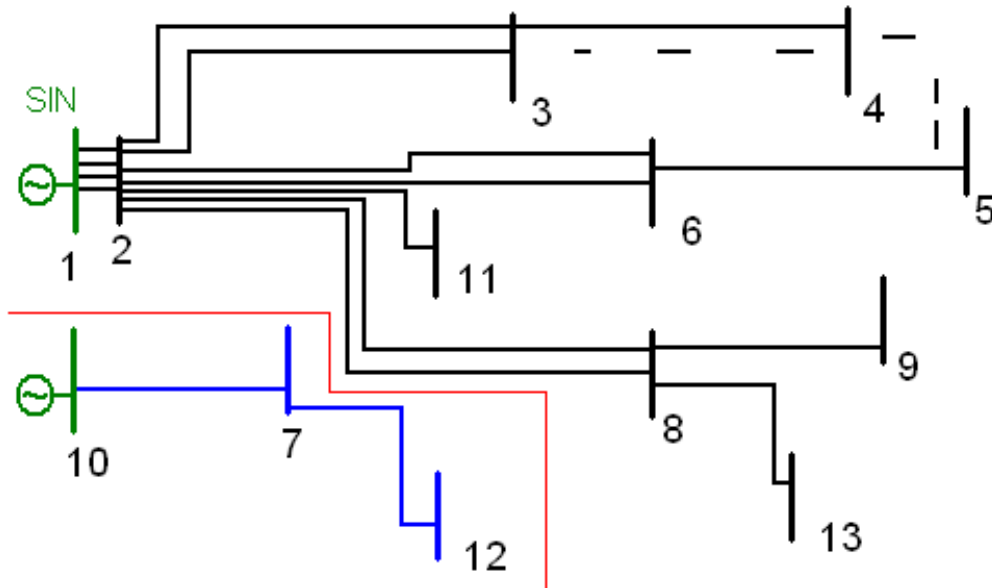


Figura 6.4: Novos circuitos para o planejamento da divisão 1

de carga parecidos, mas sem ter um custo de investimento inicial muito grande, ela pode começar com a divisão 1 e planejar para os anos posteriores as mudanças para uma divisão mais parecida com a segunda, dividindo assim o custo correspondente em etapas.

### Planejamento com confiabilidade

A partir dos planos da tabela 6.11, foi feita a enumeração de estados para as falhas no programa NH2, de modo a definir os grupos críticos. Os grupos para cada divisão foram formados exclusivamente por linhas, 13 para a divisão 1 e 10 para a divisão 2. Os planos foram feitos com  $\overline{IS} = 10$ , como no planejamento com sistema único. O resultado inicial não teve um índice de severidade tão baixo quanto os pouco mais de 40 minutos vistos no sistema único, isso provavelmente ocorreu pela possibilidade do planejamento de usar trechos que não estavam no grupo de falhas consideradas como

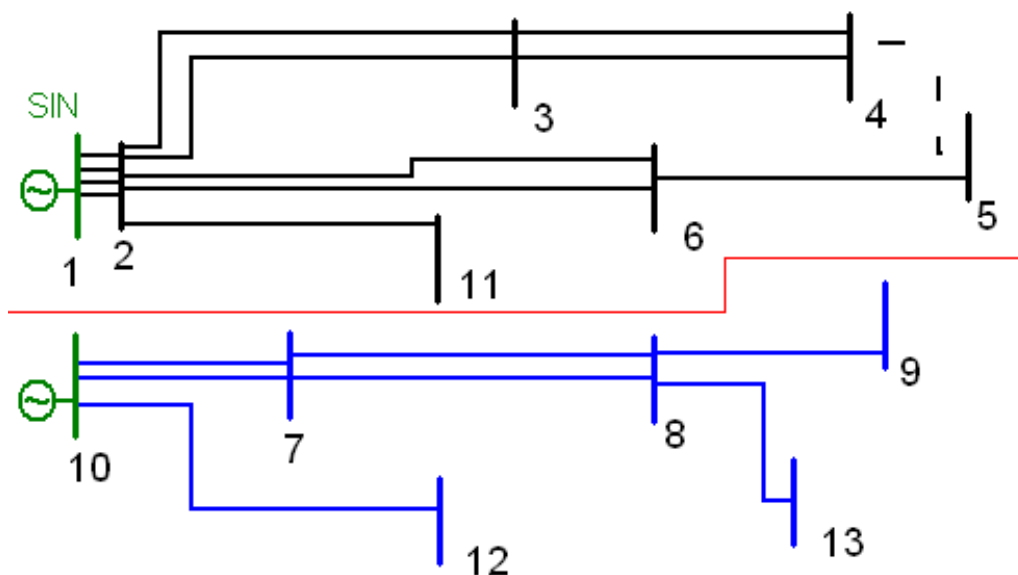


Figura 6.5: Novos circuitos para o planejamento da divisão 2

alternativa. Dessa forma, foram adicionados mais dois trechos para cada divisão e o planejamento foi refeito.

A tabela 6.12 apresenta os planos obtidos sem reconfiguração, uma vez que os planos com reconfiguração resultam em sistemas com menos confiabilidade. Os custos aumentaram e, como esperado, o custo de fazer a divisão em dois regionais ficou mais caro que o planejamento feito com confiabilidade para o sistema único, pelo fato de precisar de mais linhas.

A tabela 6.13 apresenta os índices de severidade, calculados pelo programa NH2, para os planos apresentados com a divisão do sistema, indicando uma grande diferença entre os índices do planejamento com reconfiguração e sem confiabilidade para os resultados com confiabilidade. Vemos que, apesar de ter sido o plano mais de maior custo, a divisão 1 (figura 6.6) com confiabilidade teve um índice de severidade grande, enquanto que o plano da segunda divisão (figura 6.7) obteve um índice muito bom.

#### 6.2.4 Observações

Como esperado, o planejamento realizado fazendo a divisão do sistema resultou em planos mais caros que o planejamento em um único sistema. A divisão mais simples e mais barata inicialmente, no entanto, se mostrou ser a mais cara quando a confiabilidade foi aplicada, uma vez que além de precisar construir um sistema confiável para o novo regional, precisou reforçar muitos pontos em um regional com apenas uma fonte de potência e com uma carga próxima do limite da geração. Enquanto que na divisão mais equilibrada da carga, foi mais fácil tratar da confiabilidade.

Tabela 6.12: Circuitos adicionados e removidos para a divisão do sistema de distribuição.

Trecho	Custo unitário	PET $pf_{d1}$	PET $pf_{d2}$
10 - 7	2,82	2	1
10 - 12	4,43	0	2
10 - 13	6,05	0	1
2 - 11	1,82	1	2
2 - 3	3,41	2	0
7 - 12	1,83	1	0
12* - 8	0,82	0	2
8 - 12	1,89	0	1
8 - 13	1,46	1	0
9 - 5	1,64	2	0
9 - 13	1,46	1	1
6 - 5	1,48	0	2
6 - 11	1,82	1	1
3 - 4	2,59	2	0
4 - 5	1,54	2	0
Custo dos transformadores			18,11
Custo total		50,5	47,43

Tabela 6.13: Índices de severidade para os diferentes planejamentos da divisão do sistema de distribuição.

	PET $rp_{d1}$	PET $rp_{d2}$	PET $pf_{d1}$	PET $pf_{d2}$
IS	992,39	1157,46	117,50	4,22
Custo	27,52	34,58	50,5	47,43

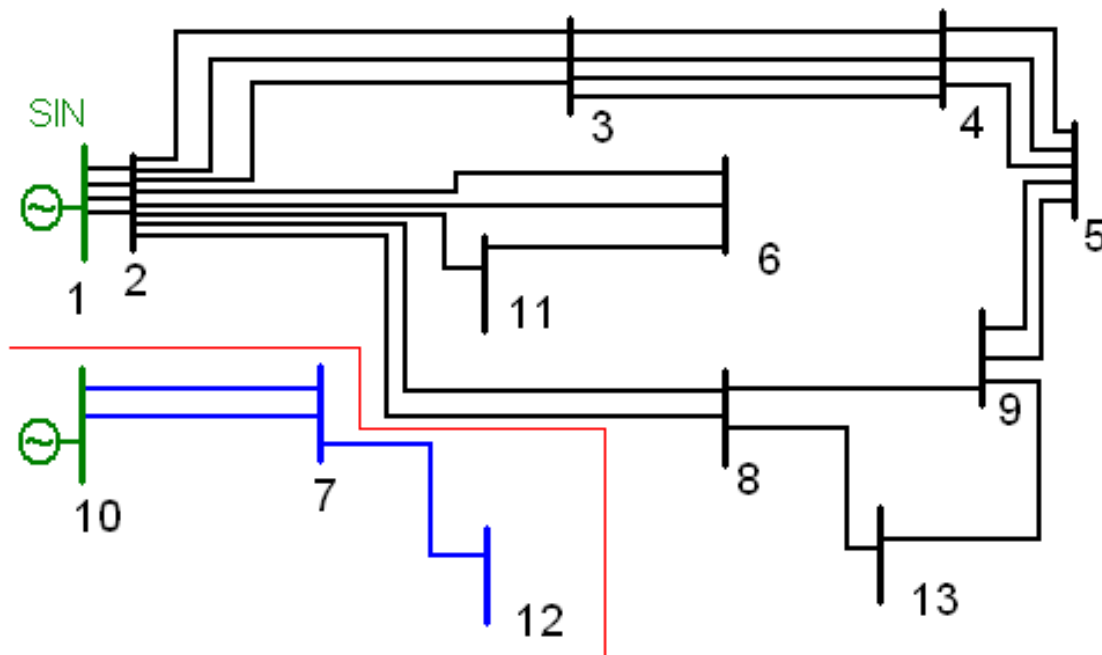


Figura 6.6: Novos circuitos para o planejamento da divisão 1 com confiabilidade.

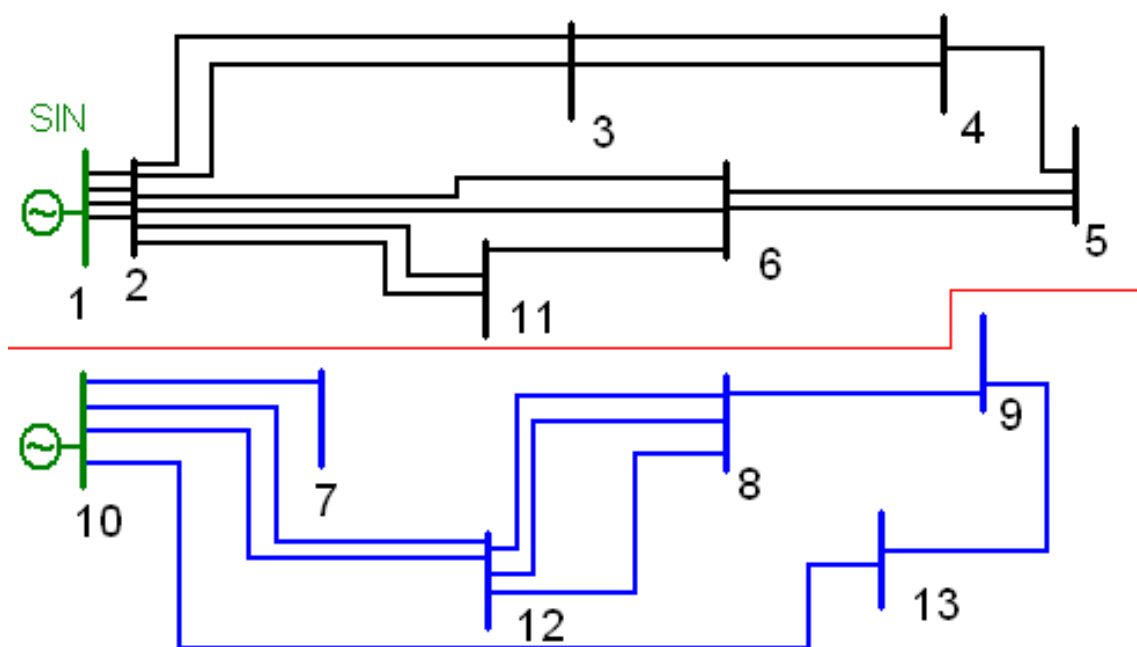


Figura 6.7: Novos circuitos para o planejamento da divisão 2 com confiabilidade.

# Capítulo 7

## Conclusões e linhas de trabalhos futuros

O planejamento da expansão dos sistemas de potência é realizado para que o sistema continue cumprindo a 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 das Leis de Kirchoff e vimos nas referências que trabalhos recentes consideram modelos com apenas um foco particular, por exemplo a confiabilidade do sistema resultante, ou a inclusão das perdas. Este trabalho analisa ambos estes assuntos de forma conjunta. Além dessas alterações, outra alternativa apresentada foi a reconfiguração, usualmente empregada na operação da rede, e que começa a ser usada no planejamento da expansão também.

Quando comparados com resultados na literatura, os modelos e os métodos de resolução empregados chegaram nos resultados esperados. Foi observado que o planejamento com perdas resultou em modificações para todos os sistemas, e que estas modificações reduziram ou eliminaram violações quando a análise com fluxo AC foi realizada.

Sobre a confiabilidade, foi visto tanto pelo cálculo do programa com modelo usado na expansão em DC, quanto pelo método de enumeração de estados com fluxo AC no programa NH2, que a adição de perdas e/ou confiabilidade resulta em planos com índices melhores.

Contrariamente ao que seria necessário em um modelo de confiabilidade N-1, que considera cada uma das possíveis falhas, apenas um grupo dos circuitos tiveram representadas suas falhas no modelo utilizado (com exceção de Garver, para o qual falhas em todos os circuitos existentes e construídos foram analisadas). O critério empregado para a escolha simplesmente analisa se a falha resultava em corte de carga. No caso do sistema da região sul do Brasil, nem mesmo todos os circuitos

cuja falha resulta em corte de carga foram testados pelo modelo. Mesmo assim, o modelo de confiabilidade com um subgrupo de falhas conseguiu achar planos com confiabilidade N-1, que também modelou as perdas.

A reconfiguração se mostrou capaz de reduzir o custo de investimento em alguns sistemas, mostrando ligações alternativas que só poderiam ser usadas com eficiência se ocorresse o desligamento de outro circuito. Porém, os planos não apresentavam bons índices de severidade. Mesmo assim, seu uso para o planejamento com confiabilidade de sistemas grandes se mostrou útil para a heurística iterativa, permitindo alterações nos circuitos escolhidos em etapas anteriores. Além do mais, para o problema de dividir um sistema de distribuição em dois regionais, o uso da reconfiguração foi fundamental para definir qual seria a melhor separação.

Ainda sobre o sistema de distribuição, na primeira variante só foi possível fazer a divisão adicionando restrições específicas para eliminar um caminho que ligava os dois regionais (uma vez que com a possibilidade das quebras, nem todos os caminhos estavam cobertos pelas restrições). O fato de ter adicionado essas restrições em uma segunda etapa indica que poderia ser possível fazer a separação sem criar todas restrições de caminhos. Ao inves disto, poderia simplesmente se fazer um planejamento inicial, criando as restrições específicas para eliminar os caminhos indesejados que estivessem unindo os dois regionais apos obtencao do plano. Embora dessa forma seja necessário repetir o planejamento várias vezes até que o sistema tenha dois regionais, ainda pode ser mais rápido do que listar manualmente tantos caminhos. Outra forma prática seria o caso da distribuidora especificar um conjunto de subestações que deseja manter no mesmo regional. Mesmo que não seja definido o conjunto completo para cada regional, o fato de fixar algumas barras também diminuiria a quantidade de caminhos proibidos.

A dificuldade principal enfrentada durante esse trabalho foi o tempo necessário para executar o planejamento dos sistemas usando a reconfiguração e/ou a confiabilidade. Deixando de lado o pequeno sistema de Garver, os planejamentos facilmente levam até algumas horas. Para contornar essa dificuldade, o planejamento da confiabilidade foi feito de modo heurístico por etapas e limitando o tempo para a reconfiguração. Embora tenha sido possível encontrar resultados bons, existem sistemas maiores, onde o tempo necessário para realizar um planejamento seria ainda maior, e para os quais estas heurísticas seriam menos eficientes. Além do tempo de cálculo, sistemas grandes necessitam de mais memória, alguns dos resultados tiveram que ser limitados por tempo não apenas para evitar que demorasse muito, mas também para que a memória disponível não acabasse antes do término da execução do programa.

Para melhorar o desempenho do modelo, poderiam ser usados métodos de paralelização em múltiplos processadores, técnicas de decomposição ou em um cluster

de computadores, que se não reduzem a quantidade de processos realizados, podem ao menos reduzir o tempo total de cálculo. Uma alternativa interessante, a ser explorada em trabalhos futuros, consiste em utilizar metaheurísticas e buscas locais como em FIGUEIREDO *et al.* (2011). Tendo um desempenho melhor, outras modificações ao modelo podem ser propostas como a inclusão de patamares de carga, cenários hidráulicos, planejamento considerando diferentes anos, confiabilidade para mais de uma falha ao mesmo tempo, etc.

# 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., 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.
- BORGES, C. L. T., 2005, *Confiabilidade de Sistemas de Potência*. Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ.
- CEPEL, 2007, *Programa NH2: Guia do Usuário*.
- 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. PMAPS 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 Interruption 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.
- FERREIRA, C. C., CONTI, A. M., FREITAS, J. R., et al., 2011, “Avaliação das Taxas de Indisponibilidade Forçada e Programada Utilizadas nas Etapas de Planejamento e Operação de Usinas Hidrelétricas”, *XXI SNTPEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, (Out).
- 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.
- GRANVILLE, S., PEREIRA, M. V. F., 1985, *Analysis of the linearized power flow model in Benders decomposition*. Relatório técnico, Technical Report SOL 85-04, System Optimization Lab, Dept. of Operations Research, Stanford University.
- 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.
- GUERTIN, M. B., ALBRECHT, P. F., BHAVARAJU, M. P., et al., 1978, “Reliability Indices for Use in Bulk Power Supply Adequacy Evaluation”, *Power*

*Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, v. PAS-97, n. 4 (july), pp. 1097 –1103.

HEDMAN, K. W., O'NEILL, R. P., FISHER, E. B., et al., 2009, "Optimal Transmission Switching With Contingency Analysis", *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 24, n. 3 (ago).

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., PREMRUDEEPREECHACHARN, S., CHAROENPACHARAKIJ, 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.
- 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.
- OLIVEIRA, G. C., BINATO, S., PEREIRA, M. V. F., 2007, “Value-Based Transmission Expansion Planning of Hydrothermal Systems Under Uncertainty”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 22, n. 4 (nov).
- RODRIGUEZ, J. I. R., FALCÃO, D. M., TARANTO, G. N., 2008, “Short-Term Transmission Expansion Planning with AC Network Model and Security Constraints”, *16th Power Systems Computer Conference (PSCC)*, (Jul.).
- SCHILLING, M., SOUZA, J. S., COUTTO FILHO, M., 2008, “Power System Probabilistic Reliability Assessment: Current Procedures in Brazil”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 23, n. 3 (aug.), pp. 868 –876.
- SHARIFNIA, A., AASHTIANI, M. H., 1985, “Transmission network planning: a method for synthesis of minimum cost secure networks”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. PAS-104, n. 8 (Ago).
- VILLASANA, R., 1984, *Transmission network planning using linear and linear mixed integer programming*. Tese de Doutorado, Ressenlaer Polytechnic Institute.

# Apêndice A

## Dados de sistemas e outros resultados

### A.1 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.1.1 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.1.2 IEEE 24 barras

Dados das barras do sistema IEEE 24 barras

Barra	Geração		Carga	
	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.1.3 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

### A.1.4 Sistema de distribuição

Neste caso a quantidade de barras foi reduzida para não ser necessário colocar duas barras em cada subestação para adicionar os transformadores. Portanto, os circuitos do sistema são divididos não em 2 mas em 4 tabelas, para linhas existentes, linhas candidatas, transformadores existentes e transformadores candidatos. Além dessa divisão, uma outra tabela foi adicionada para os seccionamentos das linhas que podem ser quebradas.

Dados das barras do sistema de distribuição

Barra	Geração máxima (MW)	Carga (MW)
1	400	0
2	0	43.68
3	0	48,22
4	0	31.43
5	0	37.44
6	0	47.46
7	0	38.32
8	0	49.12
9	0	49.92
10	400	0
11	0	19.26
12	0	45.91
13	0	28.72

Dados das linhas existentes do sistema de distribuição

Trecho	Res. (pu)	Reat. (pu)	Cap. (MW)	Quantidade	Probabilidade de falha
1-2	0.00064	.00416	129	4	0.00001797368481735160
2-3	0.06768	0.16534	46	2	0.00589177388312786000
2-7	0.02606	0.06366	46	1	0.00226827902394977000
3-4	0.04114	0.09904	46	2	0.00370257907237443000
4-5	0.00705	0.02304	80	1	0.00086273687123287700
8-9	0.01494	0.05005	80	1	0.00183331585136986000

Para não adicionar novas barras nestes dados, a notação do asterisco será usada para mostrar sobre qual barra a quebra pode ocorrer. A pequena parte existente ao redor da barra onde pode ocorrer quebra, que seria removida na ocorrência da quebra, liga dois pontos de quebra na mesma barra e, portanto, é indicado com dois números iguais.

Dados das linhas existentes do sistema de distribuição - Trechos com quebra

Trecho	Parte	Res. (pu)	Reat. (pu)	Cap. (MW)	Quant.	Probabilidade de falha
2-6	2-11*	0.0189765	0.0463843	46	2	0.00165357900319635000
2-6	11*-11*	0.001239	0.0030265	46	2	0.00010784210890411000
2-6	11*-6	0.0234997	0.0574613	46	2	0.00204900006917808000
2-8	2-7*	0.017582	0.058879	80	2	0.00215684217808219000
2-8	7*-7*	0.0008791	0.002944	80	2	0.00010784210890411000
2-8	7*-12*	0.011721	0.039253	80	2	0.00143789478538813000
2-8	12*-12*	0.0008791	0.002944	80	2	0.00010784210890411000
2-8	12*-8	0.0160903	0.0539318	80	2	0.00197710532990868000
7-8	7-12*	0.01652	0.040354	46	1	0.00143789478538813000
7-8	12*-12*	0.001239	0.0030265	46	1	0.00010784210890411000
7-8	12*-8	0.0226779	0.055448	46	1	0.00197710532990868000

Dados dos transformadores existentes do sistema de distribuição

Barra	Res. (pu)	Reat. (pu)	Cap. (MW)	Quantidade	Probabilidade de falha
2	0	.400	20	2	0.00002230649543379000
2	0	.6592	12	2	0.00002230649543379000
3	0	1.26	5	1	0.00002230649543379000
3	0	0.6389	10	1	0.00002230649543379000
4	0	0.6192	12	1	0.00002230649543379000
4	0	0.6032	12	1	0.00002230649543379000
4	0	0.54	12	1	0.00002230649543379000
4	0	0.5208	12	1	0.00002230649543379000
5	0	.40	20	2	0.00002230649543379000
6	0	0.6608	12	1	0.00002230649543379000
6	0	0.662	10	1	0.00002230649543379000
6	0	0.4035	20	1	0.00002230649543379000
6	0	0.4015	20	1	0.00002230649543379000
7	0	0.46	20	1	0.00002230649543379000
7	0	0.61	20	1	0.00002230649543379000
8	0	0.6324	12	2	0.00002230649543379000
8	0	0.40	20	2	0.00002230649543379000
9	0	0.5145	20	1	0.00002230649543379000
9	0	0.509	20	1	0.00002230649543379000



Dados das linhas candidatas do sistema de distribuição

Trecho	Res. (pu)	Reat. (pu)	Cap. (MW)	Custo	Máximo	Probabilidade de falha
2-3	0.0473474	0.1598510	59	3410067.28	2	0.005895368620091320
2-7	0.0160903	0.0539318	59	1941181.10	1	0.001977105329908680
2-11	0.0134641	0.0451169	59	1819896.92	2	0.001653579003196350
2-12	0.0219098	0.0734952	59	2210701.50	2	0.002696052722602740
3-4	0.0300065	0.1008070	59	2588030.06	2	0.003702579072374430
4-5	0.0073235	0.0245292	59	1536900.50	3	0.000898684240867580
6-4	0.009957	0.0333553	59	1658184.68	4	0.001222210567579910
6-5	0.0061523	0.0206055	59	1482996.42	4	0.000754894762328767
6-11	0.0134641	0.0451169	59	1819896.92	2	0.001653579003196350
6-12	0.0172561	0.0578474	59	1995085.18	4	0.002120894808447490
7-11	0.0166733	0.0558898	59	1968133.14	4	0.002049000069178080
7-12	0.0137561	0.0460966	59	1833372.94	1	0.001689526372831050
8-6	0.0125878	0.0421773	59	1779468.86	4	0.001545736894292240
8-9	0.0149236	0.0500148	59	1887277.02	3	0.001833315851369860
8-11	0.020512	0.068692	59	2143321.40	4	0.002516315874429220
8-12	0.0149236	0.0500148	59	1887277.02	1	0.001833315851369860
8-13	0.0055666	0.0186435	59	1456044.38	4	0.000683000023059361
9-5	0.0096644	0.0323748	59	1644708.66	4	0.001186263197945210
9-6	0.0122957	0.0411973	59	1765992.84	4	0.001509789524657530
9-13	0.002930	0.009813	59	1334760.20	4	0.000359473696347032
10-2	0.008949	0.055523	91	2817122.40	4	0.002156842178082190
10-7	0.008949	0.055523	91	2817122.40	4	0.002156842178082190
10-12	0.017898	0.111042	91	4434244.80	4	0.004313684356164380
10-13	0.026844	0.166555	91	6051367.20	4	0.006470526534246580
11-12	0.005861	0.019626	59	1765992.84	4	0.001509789524657530
Dados sobre as quebras, duas quebras por linha por barra com quebra possível						
2-6	0.008260	0.0020177	46	822618.220	4	0.000718947392694064
2-8	0.005861	0.019626	80	869520.400	8	0.000718947392694064
7-8	0.008260	0.0020177	46	822618.220	2	0.000718947392694064

Dados do transformador candidato do sistema de distribuição

Res. (pu)	Reat. (pu)	Cap. (MW)	Custo	Probabilidade de falha
0.000000	.4000000	20	1947282.39	0.00002230649543379000
Barra		Quantidade máxima		
2		2		
3		2		
4		4		
6		2		
7		2		
8		2		
9		1		
11		4		
12		3		
13		3		

## A.2 Outros resultados

Nessa seção são mostrados os planos encontrados pelo método iterativo.

### A.2.1 IEEE 24 barras

Novos circuitos em IEEE 24 barras em etapas com confiabilidade

Trecho	Custo unitário	PETpf100	PETpf80	PETpf50	PETpf30	PETpf10
1 - 5	22	0	0	0	1	0
2 - 4	33	0	0	0	0	1
3 - 24	50	1	1	1	1	1
6 - 10	16	1	1	1	2	2
7 - 8	16	2	2	2	2	2
9 - 12	50	0	0	1	1	0
10 - 12	50	1	1	1	1	2
12 - 13	66	1	1	1	1	1
14 - 16	54	1	1	1	1	1
15 - 24	72	0	0	0	0	1
16 - 17	36	0	1	1	1	1
Custo total		268	304	354	392	475

## A.2.2 Sul do Brasil

Novos circuitos para o sistema Sul em etapas com confiabilidade ( $\overline{IS}$  200 a 50)

Trecho	Custo unitário	PETpf200	PETpf100	PETpf50
19 - 21	32,632	1	1	1
20 - 23	6,268	1	2	2
32 - 43	35,196	0	0	1
20 - 21	8,178	3	3	3
42 - 43	8,178	2	2	2
46 - 6	16,005	1	1	1
5 - 6	8,178	2	3	3
Custo total		112,151	126,597	161,793

Novos circuitos para o sistema Sul em etapas com confiabilidade ( $\overline{IS}$  30 a 0)

Trecho	Custo unitário	PETpf30	PETpf10	PETpf0
2 - 5	2,581	1	0	1
12 - 14	5.106	1	1	1
18 - 20	12,732	0	0	2
19 - 21	32,632	1	1	1
20 - 23	6,268	2	2	2
33 - 34	8,288	0	1	1
40 - 42	6,268	0	0	1
32 - 43	35,196	1	1	1
42 - 44	7,934	0	1	1
44 - 45	11,924	0	0	1
20 - 21	8,178	3	3	3
42 - 43	8,178	2	2	2
46 - 6	16,005	1	2	2
5 - 6	8,178	3	3	3
31 - 32	7.052	1	1	1
Custo total		176,532	206,178	252,415