

ROBINSON ALVES LEMOS

**META-HEURÍSTICAS PARA O PROBLEMA
DE PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO DA
REDE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA CONSIDERANDO RESTRIÇÕES
DE SEGURANÇA**

Ilha Solteira

2015

ROBINSON ALVES LEMOS

**META-HEURÍSTICAS PARA O PROBLEMA DE
PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO DA REDE DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
CONSIDERANDO RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA**

Trabalho apresentado como requisito para
qualificação de doutoramento no Departa-
mento de Engenharia Elétrica da Univer-
sidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita
Filho” – UNESP, campus de Ilha Solteira

Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro
Orientador

Ilha Solteira
2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

L557m Lemos, Robinson Alves.
Meta-heurísticas para o problema de planejamento de expansão da rede de transmissão de energia elétrica considerando restrições de segurança / Robinson Alves Lemos. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2015
170 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2015

Orientador: Rubén Augusto Romero Lázaro
Inclui bibliografia

1. Planejamento de expansão da rede de transmissão. 2. Meta-heurísticas. 3. Restrições de segurança. 4. Framework paradisoEO.

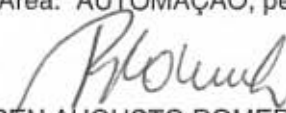
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

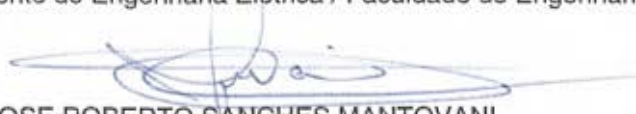
TÍTULO: Metaheurísticas para o problema de planejamento de expansão da rede de transmissão de energia elétrica considerando restrições de segurança

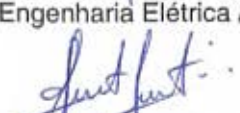
AUTOR: ROBINSON ALVES LEMOS

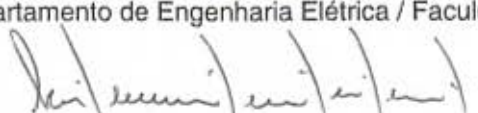
ORIENTADOR: Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO

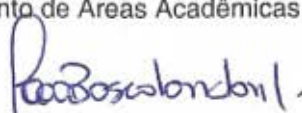
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. SERGIO AZEVEDO DE OLIVEIRA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. LUIS GUSTAVO WESZ DA SILVA
Departamento de Áreas Acadêmicas IV / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnol. de Goiás


Prof. Dr. JOÃO BOSCO AUGUSTO LONDON JUNIOR
Departamento de Engenharia Elétrica e Computação / Escola de Engenharia de São Carlos-USP

Data da realização: 31 de agosto de 2015.

*Este trabalho é dedicado,
com todo amor e carinho,
à minha esposa Fernanda
e minha filha Akemi.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo em minha vida.

Os agradecimentos principais vão para as pessoas mais próximas que ajudaram a tornar esse trabalho realidade. Meu orientador Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro. Aos professores da banca por suas sugestões e contribuições. Minha esposa Fernanda e filha Akemi. Meus pais e sogros Samuel, Emília, Edvaldo e Joana. Minha irmã, cunhados e sobrinhos Karina, Wagner, Elton, Alexandra e Heitor.

Além disso, agradecimentos especiais vão para todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão deste trabalho e, como são muitos, os nomes não são citados, mas todos estão em meu coração. Os professores, amigos e companheiros do curso de pós-graduação, sendo que alguns estão em mais de uma categoria. Todos os familiares que sempre estiveram presentes em minha vida. Os amigos brasileiros que fiz em Boulder, Colorado, US. Aos companheiros de trabalho da UNEMAT (principalmente Barra do Bugres e Tangará da Serra).

Agradeço as instituições e todos os funcionários que lá estão, proporcionando trabalhos como este. UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”. UNEMAT - Univerisdade do Estado de Mato Grosso. CU - University of Colorado at Boulder. CAPES pelo apoio financeiro e oportunidade do doutorado sanduíche.

Last but not least, I send out my international acknowledgments to the people I had the great pleasure of meeting in Boulder, Colorado during my CU-Boulder visit. Manuel Laguna, my research advisor and friend. Jose Ramirez and Mark Zais, my good friends and research partners during my Ph.D. studies. Also, my dearest friends: the Laguna family, the Ramirez family, Nancy & Tom Miller, and Julie & Cliff Daniels.

“In theory there is no difference between theory and practice. In practice there is.”
(Yogi Berra)

RESUMO

Este trabalho aborda o problema de planejamento da expansão da rede de transmissão (PERT) e utiliza o modelo CC no horizonte de planejamento estático, em duas variações: com restrições de segurança N-1 (PERTES) e a formulação usual, sem restrições de segurança (PERTE).

As meta-heurísticas busca tabu, GRASP e busca local iterada foram implementadas utilizando o framework ParadisEO e os parâmetros foram ajustados com auxílio do *software* paramILS.

Os algoritmos foram testados em 42 sistemas teste divididos em 6 grupos de sistemas: Garver 6 barras (4 sistemas teste), IEEE 24 barras (10 sistemas teste), Sul Brasileiro 46 barras (4 sistemas teste), Sudeste Brasileiro 79 barras (4 sistemas teste), Nordeste Brasileiro 87 barras (8 sistemas teste) e Colombiano 93 barras (12 sistemas teste).

Os testes verificaram a viabilidade de utilizar o framework ParadisEO para implementação de meta-heurísticas para o PERT. Além disso, foi criado um conjunto de informações de referência para utilização em trabalhos futuros com os problemas PERTE e PERTES.

Palavras-chave: Meta-heurística. Planejamento de expansão da transmissão. Framework ParadisEO.

ABSTRACT

This work deals with the energy network transmission expansion planning problem (TEP) and uses two variations of the CC model on the static planning horizon: with N-1 security constraints (STEPS) and the usual formulation, without security constraints (STEP).

The meta-heuristics tabu search (TS), GRASP and iterated local search (ILS) were implemented using the framework ParadisEO and the parameters tuning were made with the aid of paramILS.

The algorithms were tested in 42 test systems divided into 6 groups: Garver 6 bars (4 test systems), IEEE 24 bars (10 test systems), 46 South Brazilian bars (4 test systems), Brazilian Southeast 79 bars (4 test systems), Brazilian Northeast 87 bars (8 test systems) and Colombian 93 bars (12 test systems).

The tests showed the viability of ParadisEO framework to implement meta-heuristics for the TEP problem. In addition, a large benchmark for use in future STEP and SSTEP works was created.

Keywords: Meta-heuristics. Transmission expansion planning. ParadisEO framework.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Codificação de uma solução.	41
Figura 2 – Exemplo de vizinhanças.	42
Figura 3 – Correspondência vizinho-movimento.	43
Figura 4 – Fluxograma para AHC VGS.	45
Figura 5 – Fluxograma de uma busca local.	48
Figura 6 – Ótimos locais dependentes da vizinhança.	49
Figura 7 – Movimentos Tabu.	51
Figura 8 – Fluxogramas para busca local iterada e GRASP	54
Figura 9 – Diagrama UML para Busca Local.	57
Figura 10 – Diagrama UML para Busca Tabu.	59
Figura 11 – Diagrama UML para busca local iterada e GRASP.	60
Figura 12 – Tempo gasto em 200 execuções para cada métodos de cálculo da função objetivo no PERTES.	72
Figura 13 – Tempo gasto em 200 execuções para cada métodos de cálculo da função objetivo no PERTES: sistemas de 6, 24 e 46 barras.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tempo médio, melhor tempo e pior tempo de execução da busca local.	65
Tabela 2 – Valores de referência para os sistemas treino: PERTE.	66
Tabela 3 – Pontuação dos algoritmos para o PERTE no primeiro teste	69
Tabela 4 – Tempo até o alvo para cada algoritmos no segundo teste no PERTE.	70
Tabela 5 – Melhores resultados dos algoritmos no segundo teste para o PERTE.	71
Tabela 6 – Tempo de execução da busca tabu por grupo de sistemas teste para o PERTES	75
Tabela 7 – Melhores soluções encontradas para o PERTE.	81
Tabela 8 – Informações sobre as soluções dos testes para cada algoritmo e cada sistema teste no PERTE.	94
Tabela 9 – Melhores soluções encontradas para o PERTES.	105
Tabela 10 – Dados das barras: Garver com redespacho.	124
Tabela 11 – Dados das barras: Garver sem redespacho.	124
Tabela 12 – Dados dos ramos: Garver.	124
Tabela 13 – Dados das barras: IEEE24 sem redespacho - Plano 1.	125
Tabela 14 – Dados das barras: IEEE24 sem redespacho - Plano 2.	126
Tabela 15 – Dados das barras: IEEE24 sem redespacho - Plano 3.	126
Tabela 16 – Dados das barras: IEEE24 sem redespacho - Plano 4.	127
Tabela 17 – Dados das barras: IEEE24 com redespacho.	128
Tabela 18 – Dados dos ramos: IEEE24.	128
Tabela 19 – Dados das barras: Sul-BR sem redespacho.	130
Tabela 20 – Dados das barras: Sul-BR com redespacho.	131
Tabela 21 – Dados dos ramos: Sul-BR.	132
Tabela 22 – Dados das barras: Sudeste-BR sem redespacho.	135
Tabela 23 – Dados das barras: Sudeste-BR com redespacho.	137
Tabela 24 – Dados dos ramos: Sudeste-BR.	138
Tabela 25 – Dados das barras: Nordeste-BR sem redespacho - Plano 1.	144
Tabela 26 – Dados das barras: Nordeste-BR sem redespacho - Plano 2.	145
Tabela 27 – Dados das barras: Nordeste-BR com redespacho - Plano 1.	147
Tabela 28 – Dados das barras: Nordeste-BR com redespacho - Plano 2.	148
Tabela 29 – Dados dos ramos: Nordeste-BR.	149
Tabela 30 – Dados das barras: Colombiano sem redespacho - Plano 1.	153
Tabela 31 – Dados das barras: Colombiano sem redespacho - Plano 2.	154
Tabela 32 – Dados das barras: Colombiano sem redespacho - Plano 3.	155
Tabela 33 – Dados das barras: Colombiano com redespacho - Plano 1.	157
Tabela 34 – Dados das barras: Colombiano com redespacho - Plano 2.	158

Tabela 35 – Dados das barras: Colombiano com redespacho - Plano 3. 160

Tabela 36 – Dados dos ramos: Colombiano. 161

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens dos modelos CC e CA	31
Quadro 2 – Algoritmos implementados.	63
Quadro 3 – Valores possíveis para os parâmetros.	65
Quadro 4 – Parâmetros utilizados em cada algoritmo.	66
Quadro 5 – Descrição dos parâmetros.	67
Quadro 6 – Melhores parâmetros encontrados.	68
Quadro 7 – Valores possíveis para os parâmetros no treinamento do algoritmo BT para PERTES.	74
Quadro 8 – Características dos sistemas teste: Garver 6 barras.	121
Quadro 9 – Características dos sistemas teste: IEEE 24 barras.	121
Quadro 10 – Características dos sistemas teste: Sul Brasileiro 46 barras.	122
Quadro 11 – Características dos sistemas teste: Sudeste Brasileiro 79 barras.	122
Quadro 12 – Características dos sistemas teste: Nordeste Brasileiro 87 barras.	122
Quadro 13 – Características dos sistemas teste: Colombiano 93 barras.	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHC	Algoritmo heurístico construtivo.
BL	Busca local.
BLI	Busca local iterada.
bliBL	Algoritmo de busca local iterada.
bliBT	Algoritmo de busca local iterada, com a busca tabu no lugar da busca local.
BT	Busca tabu.
CA	Corrente alternada.
CC	Corrente contínua.
EO	Módulo evolving objects do framework ParadisEO.
EOT	Evolving object type, utilizado para representar um tipo de codificação de solução no framework ParadisEO.
FACTS	Flexible AC transmission system, em português: sistema de transmissão CA flexível.
FitT	Fitness type, normalmente utilizado para alterar da maximização para minimização no framework ParadisEO.
FO	Função objetivo.
GRASP	Greedy randomized adaptative search procedure, em português: procedimento de busca adaptativo guloso e aleatório.
graspBL	Algoritmo GRASP.
graspBT	Algoritmo GRASP com a busca tabu no lugar da busca local.
max	Máximo, no caso $\max(a, b)$.
MHR	Modelo híbrido relaxado.
min	Minimizar, no caso $\min v$. Mínimo, no caso $\min(a, b)$.
MO	Módulo moving objects do framework ParadisEO.

MOEO	Módulo multiobjective evolving objects do framework ParadisEO.
MW	Megawatt.
p.u.	Por unidade.
PEO	Módulo parallel evolving objects do framework ParadisEO.
PERT	Problema da expansão da rede de transmissão do sistema de energia elétrico.
PERTE	Problema da expansão da rede de transmissão do sistema de energia elétrico estático.
PERTES	Problema da expansão da rede de transmissão do sistema de energia elétrico estático e com restrições de segurança N-1.
PL	Problema de programação linear.
PSO	Particle swarm optimization, em portugues: otimização por enxame de partículas.
s.a.	Sujeito(a) às restrições.
VGS	Villasana-Garver-Salon, utilizado para denominar um AHC para o PERT.

LISTA DE SÍMBOLOS

v	função objetivo v .
Σ	Somatório.
L	Conjunto de ramos. Os elementos de L serão representados de duas formas: $ij \in L$ indica o ramo de extremidades nas barras i e j , ou $i \in L$, $1 \leq i \leq L $ se uma ordenação for necessária.
c_{ij}	Custo de um circuito no ramo ij .
n_{ij}	Número de circuitos a serem construídos no ramo ij , $ij \in L$.
f_{ij}	Fluxo de potência ativa no ramo ij . Este valor é a soma do fluxo de potência ativa em todos os circuitos do ramo ij (a não ser no modelo híbrido, que esse valor indica a soma de todos os circuitos novos, desconsiderando os circuitos já existentes). Pode possuir um valor negativo, no caso do fluxo ser da barra j para a barra i .
g_i	Geração de potência ativa na barra i .
d_i	Demanda na barra i .
B	Conjunto de barras.
n_{ij}^0	Número de circuitos existentes no ramo ij .
θ_i	Ângulo de fase na barra i .
x_{ij}	Reatância de um circuito no ramo ij .
$\bar{f}_{ij}$	Fluxo máximo de potência ativa de cada circuito no ramo ij .
$\bar{g}_i$	Geração máxima de potência ativa na barra i .
$\bar{n}_{ij}$	Número máximo de novos circuitos no ramo ij .
$n, \{n_{ij}\}$	Um plano de expansão para o PERTE e/ou PERTES.
RO	Conjunto formado por todas as soluções satisfazendo as restrições operacionais.

RS	Conjunto formado por todas as soluções satisfazendo as restrições de segurança N-1.
SL	Um subconjunto do conjunto L que indica onde poderá ocorrer contingência.
RS_{kl}	Conjunto formado por todas as soluções satisfazendo as restrições operacionais com uma linha em contingência no ramo kl .
f_{ij}^{kl}	Fluxo de potência ativa no ramo ij com uma linha em contingência no ramo kl .
g_i^{kl}	Geração de potência ativa na barra i com uma linha em contingência no ramo kl .
θ_k^{kl}	Ângulo de fase na barra i com uma linha em contingência no ramo kl .
$\bar{f}_{ij}^c$	Fluxo máximo de potência ativa de cada circuito no ramo ij com uma linha em contingência.
$\bar{g}_i^c$	Geração máxima de potência ativa na barra i com uma linha em contingência.
α	Parâmetro que representa o custo para se cortar 1MW de potência ativa.
r_i	Corte de carga na barra i .
RO'	Conjunto formado por todas as soluções satisfazendo as restrições operacionais com variáveis de corte de carga.
r_i^{kl}	Corte de carga na barra i com contingência no ramo kl .
v_{kl}	Função objetivo representando o corte de carga para o cenário com a linha kl em contingência.
N	Espaço de busca para o PERTE e/ou PERTES utilizando meta-heurísticas.
$ L $	Número de elementos no conjunto L .
$n[i]$	Número de circuitos a serem construídos no ramo i , $1 \leq i \leq L $.
$V_t(n)$	Vizinhança de uma solução n .
t	Parâmetro inteiro e positivo que altera a dimensão da vizinhança $V_t(n)$.
$\bar{n}[i]$	Número máximo de novos circuitos no ramo i , $1 \leq i \leq L $.

(i, u)	O movimento (i, u) representa o vizinho n' , de n , com $n'[i] = u$ e $n'[j] = n[j]$, para $j \neq i$.
$c[i]$	Custo de um circuito no ramo i , $1 \leq i \leq L $.
f_{ij}^0	Fluxo de potência ativa no ramo ij das linhas já existentes, ou seja, não considera o fluxo de novas linhas.
IS_{ij}	Índice de sensibilidade para o ramo ij .
SL^0	Subconjunto de SL , onde cada ramo possui, no mínimo, uma linha já construída.
f_{kl}^{0kl}	Fluxo de potência ativa no ramo ij das linhas já existentes, quando há uma contingência no ramo kl , ou seja, não considera o fluxo de novas linhas.
$cc(n)$	Custo de investimento para construção do plano de expansão n .
C	Custo de corte de carga, que pode variar de acordo com o problema ou a forma de calcular a função objetivo.
$cc(i, u)$	Custo de investimento para construção do plano de expansão vizinho de n obtido pelo movimento (i, u) .
$LC_1(n)$	Lista de movimentos candidatos para a solução n levando em conta o custo de construção.
$LC_2(n)$	Lista de movimentos candidatos para a solução n levando em conta a resolução do MHR.
LC	Lista de candidatos final.
A	Algoritmo em treinamento.
θ	Configuração de parâmetros para um algoritmo A .
St	Conjunto de sistemas treino.
Sd	Conjunto com as sementes para números aleatórios.
$A'(\theta, st, sd)$	Valor do plano de expansão resultante do algoritmo A utilizando a configuração θ , o sistema treino st e a semente sd .
st	Um sistema treino.
sd	Uma semente para geração de números aleatórios.

$C'(\theta)$	Função objetivo com valor absoluto para utilizar no ParamILS.
VR_{st}	Valor de referência para o sistema treino st .
$A(\theta, st, sd)$	Valor relativo do plano de expansão resultante do algoritmo A utilizando a configuração θ , o sistema treino st e a semente sd .
$C(\theta)$	Função objetivo com valor relativo para utilizar no ParamILS.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	27
1.2	OBJETIVOS	28
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	28
2	PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA REDE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	31
2.1	INTRODUÇÃO	31
2.2	O MODELO CC ESTÁTICO	32
2.3	O MODELO CC ESTÁTICO COM RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA N-1 . .	33
2.4	FACTIBILIDADE DE UM PLANO DE EXPANSÃO	35
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	38
3	META-HEURÍSTICAS APLICADAS AO PERT	39
3.1	META-HEURÍSTICAS	39
3.2	ELEMENTOS BÁSICOS	40
3.2.1	Espaço de busca, codificação e função objetivo	40
3.2.2	Vizinhos e vizinhança	41
3.2.3	Movimentos e atributos	42
3.2.4	Solução inicial	43
3.2.4.1	<i>Algoritmo heurístico construtivo</i>	<i>44</i>
3.2.4.2	<i>Modelo CC híbrido e índice de sensibilidade para o PERTE</i>	<i>44</i>
3.2.4.3	<i>AHC de Villasana-Garver-Salon</i>	<i>46</i>
3.2.4.4	<i>Algoritmo heurístico construtivo e modelo CC híbrido para o PERTES . . .</i>	<i>46</i>
3.3	BUSCA LOCAL	47
3.4	BUSCA TABU	49
3.4.1	Vizinhança adaptativa	49
3.4.1.1	<i>Detalhes para implementação da vizinhança adaptativa</i>	<i>50</i>
3.5	BUSCA LOCAL ITERADA E GRASP	52
3.6	FRAMEWORK PARADISEO	53
3.6.1	Busca local utilizando ParadisEO	55
3.6.2	Busca tabu utilizando ParadisEO	57
3.6.3	Busca local iterada e GRASP utilizando o ParadisEO	58
3.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	60
4	TESTES E RESULTADOS	63

4.1	O PROBLEMA PERTE	63
4.1.1	Ajuste de parâmetros, treinamento, teste e resultados para o PERTE	64
4.1.1.1	<i>Preparativos para o treinamento</i>	64
4.1.1.2	<i>Definições e configurações para o ParamLS</i>	66
4.1.1.3	<i>Treinamento e testes</i>	68
4.2	O PROBLEMA PERTES	72
4.2.1	Testes iniciais da função objetivo para o PERTES	72
4.2.2	Treinamento do algoritmo BT para o PERTES	74
4.2.3	Testes do algoritmo BT para o PERTES	75
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	75
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	77
5.1	TRABALHOS FUTUROS	78
	Referências	79
	APÊNDICE A – PLANOS DE EXPANSÃO E SEUS CUSTOS	81
	ANEXO A – SISTEMAS TESTE	121

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O trabalho aborda meta-heurísticas (MH) para solucionar o problema de planejamento da rede de transmissão de energia elétrica (PERT). Segundo Talbi (2009) as MH conseguem resultados satisfatórios em um tempo razoável, sua popularidade cresceu nos últimos 20 anos e mostram eficiência ao resolver problemas complexos e de grande porte.

Implementar as meta-heurísticas com um *framework* não é comum, mas é desejável (TALBI, 2009). Este trabalho contempla o uso do *framework* ParadisEO, que foi escolhido por possuir a maior variedade de técnicas de otimização, dentre os que utilizam a linguagem de programação C++ (PAREJO et al., 2012).

Outro aspecto inovador do trabalho é a utilização da ferramenta ParamILS para realização dos ajustes de parâmetros de meta-heurísticas aplicadas ao PERT. Ele não possui limitações quanto ao número de parâmetros e pode ser utilizado em praticamente qualquer programa que possua passagem de parâmetros por linha de comando. Sugere-se uma atenção especial para o ajuste de parâmetros e o uso de ferramentas, como ParamILS, também é recomendado por Talbi (2009).

O uso dessas ferramentas foi ilustrado com o PERT e não foram encontrados trabalhos utilizando o *framework* ParadisEO ou o *software* ParamILS, para o problema PERT. Dentro de várias opções, escolheu-se o modelo CC do PERT, pois é não linear e complexo, sendo suficiente para exibir a aplicabilidade das ferramentas. Ressalta-se que o modelo CA é mais preciso, porém com não linearidades mais complexas e, assim, não foi julgado interessante para uma primeira abordagem. O modelo CC para o problema PERT foi visto em duas variações: sem restrições de segurança (PERTE) e com restrições de segurança N-1 (PERTES). As duas variações utilizam o horizonte de planejamento estático, ou seja, apenas uma etapa de construção é considerada.

Apenas um módulo do *framework* foi utilizado, pois uma tentativa de abordar mais de um módulo poderia comprometer o tempo disponível para realização do trabalho. O módulo escolhido foi o MO (*Moving Objects*) que possui as meta-heurísticas de solução única. Os algoritmos disponibilizados pelo *framework* não foram alterados, e implementou-se apenas partes dependentes do problema PERT. Escolheu-se os algoritmos de busca tabu, busca local iterada e GRASP pois, a busca tabu aproveita grande parte do código da busca local e as meta-heurísticas busca local iterada e GRASP possuem grande similaridade, exibida na Seção 3.5, além de utilizarem os códigos da busca local (e uma variação utilizando a busca tabu).

Finalmente, algumas dificuldades encontradas ao buscar sistemas teste para o PERT foram a limitação na quantidade de sistemas teste, a falta de padronização, problemas no acesso dos dados e dados no formato PDF. Por exemplo, os dados do sistema de 78 barras do sudeste brasileiro não está mais disponível no endereço eletrônico indicado pelo artigo de Romero et al. (2002), mas um sistema similar, com 79 barras, é encontrado no trabalho de Mendonça (2012). Entretanto, um trabalho utilizando as informações de Mendonça (2012) não deve ser comparado com os resultados de Romero et al. (2002). Outro problema é encontrar os dados disponibilizados em formato PDF, pois a extração nem sempre é simples e, geralmente, ajustes e conferências manuais são necessárias, consumindo um tempo relativamente grande e completamente sujeito a erros humanos.

Desta forma, o trabalho propõe a criação de um banco de dados para o problema PERT e suas variações, atualizados com a ajuda da comunidade científica para melhorar o acesso a essas informações.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo é apresentar uma nova perspectiva na utilização de meta-heurísticas para o problema PERT.

Para tanto, buscou-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- a) Implementar meta-heurísticas utilizando o *framework* ParadisEO:
 - Busca tabu (BT).
 - GRASP.
 - Busca local iterada (BLI).
- b) Realizar ajustes de parâmetros com o *software* ParamILS.
- c) Criar um banco de dados de sistemas teste e soluções factíveis para subsidiar outras pesquisas na área.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No Capítulo 2 são apresentados os modelos PERTE e PERTES. Além disso, exhibe-se formas de mensurar a qualidade de um dado plano de expansão a partir da resolução de problemas de programação linear.

Aspectos e componentes das três meta-heurísticas são discutidos no Capítulo 3. A heurística de busca local e as meta-heurísticas busca tabu, busca local iterada (em duas versões) e GRASP (em duas versões) foram implementadas com o *framework* ParadisEO.

O Capítulo 4 exibe informações sobre o ajuste de parâmetros e os resultados obtidos nos testes.

Cada capítulo conta com considerações finais e o Capítulo 5 exibe as principais contribuições do trabalho, juntamente com algumas ideias para trabalhos futuros.

O Anexo A contém informações de todos os sistemas teste utilizados e o Apêndice A possui as melhores soluções factíveis (encontradas nos treinos e ajustes de parâmetros do trabalho) e os respectivos custos de investimento.

2 PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA REDE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda de energia, o problema de planejamento da expansão da rede de transmissão de energia elétrica (PERT) torna-se um importante problema a ser estudado. O problema é modelado de diversas formas, buscando minimizar o investimento da expansão, garantindo o funcionamento da rede. Em (SILVA, 2013) encontram-se vários modelos para o PERT, entre eles: modelo de transporte, modelo híbrido não-linear, modelo híbrido linear, modelo CC, modelo CC linear disjuntivo e modelo CA.

De acordo com Hemmati, Hooshmand e Khodabakhshian (2013), os principais modelos utilizados atualmente são o modelo CC e o modelo CA, onde suas vantagens e desvantagens foram condensadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens dos modelos CC e CA.

Modelo	Vantagens	Desvantagens
CC	- Mais simples que o modelo CA; - Mais preciso que os modelos de transporte e híbridos.	- Não há como incorporar potência reativa; - O plano resultante do modelo CC precisa ser reforçado quando a operação CA é considerada; - Dificuldade de considerar perda de potência.
CA	- Considera potência reativa no planejamento; - Planejamento de potência reativa pode ser incorporado ao PERT para reduzir as novas linhas; - Perda de potência pode ser completamente introduzida - Outros componentes como dispositivos FACTS podem ser introduzidos; - Outros tipos de estudo, como estabilidade de voltagem, podem ser levados em conta.	- O modelo CA gera um problema de programação não-linear inteiro misto maior e mais complexo que os outros modelos; - Dificuldade para lidar com sistemas desconexos, uma situação comum nas fases iniciais do planejamento de transmissão, quando geradores e carga ainda não foram ligados eletricamente ao sistema.

Fonte: adaptado de (HEMMATI; HOOSHMAND; KHODABAKHSHIAN, 2013).

Cada um dos modelos pode ser abordado de várias formas, o que aumenta as restrições e, em alguns casos, altera a função objetivo. Por exemplo, o modelo CC, com relação ao horizonte de planejamento, pode ser: estático ou multi-estágio. No modelo estático, apenas uma etapa na construção de linhas é considerada e na outra variação, o modelo CC multi-estágio, leva em conta várias etapas para a construção de linhas.

Além disso, pode-se incorporar várias outras restrições em um modelo para o PERT (HEMMATI; HOOSHMAND; KHODABAKHSHIAN, 2013), entre elas estão as restrições de segurança, congestionamento de linhas, mercado de eletricidade, incertezas e impacto ambiental.

O foco deste trabalho é o modelo CC, abordando apenas o horizonte de planejamento estático em duas variações: sem restrições de segurança e com restrições de segurança N-1.

As restrições de segurança N-1 garantem que o sistema continue funcionando, mesmo que uma das linhas na rede de transmissão deixe de funcionar por algum motivo. Porém, o sistema irá funcionar no estado restaurativo após a ocorrência de uma contingência, permitindo um aumento no fluxo das linhas operantes.

No que segue, serão apresentados o modelos CC para o PERT estático (PERTE) e o modelo CC para o PERT estático e com restrições de segurança N-1 (PERTES).

2.2 O MODELO CC ESTÁTICO

O modelo CC para o PERTE é não linear inteiro misto e, baseado em Silva (2013) e Silva et al. (2005), pode ser apresentado pelas Equações 1 a 7.

$$\min v = \sum_{ij \in L} c_{ij} n_{ij} \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{ji \in L} f_{ji} - \sum_{ij \in L} f_{ij} + g_i = d_i, \quad \forall i \in B \quad (2)$$

$$f_{ij} = (n_{ij}^0 + n_{ij}) \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}}, \quad \forall ij \in L \quad (3)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \bar{f}_{ij}, \quad \forall ij \in L \quad (4)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i, \quad \forall i \in B \quad (5)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij}, \quad \forall ij \in L \quad (6)$$

$$n_{ij} \text{ inteiro}, \quad \forall ij \in L \quad (7)$$

A Equação 1 representa o custo do investimento em novas linhas. A Equação 2 indica o balanço de potência em cada barra, ou seja, a lei das correntes de Kirchhoff.

A lei das tensões de Kirchhoff é dada na Equação 3, onde também encontra-se a não linearidade do problema. O limite de capacidade de transmissão dos circuitos (linhas ou transformadores) é representado na Equação 4. Na Equação 5 tem-se o limite de geração. A limitação no número de linhas a serem construídas em cada ramo é indicado na Equação 6. A parte inteira do modelo, adicionando mais complexidade, é dado na Equação 7, representando o número circuitos a serem construídos.

Os conjuntos B e L indicam, respectivamente, o conjunto de barras e o conjunto de ramos. Cada ramo em L é indicado por ij , onde i e j são as barras nas extremidades do ramo. A função objetivo é indicada por v e representa o custo total de investimento em novos circuitos. As variáveis do modelo n_{ij} , f_{ij} , θ_i e g_i representam, respectivamente, o número de circuitos a serem construídos no ramo ij , o fluxo de potência ativa no ramo ij , o ângulo de fase na barra i e a geração de potência ativa na barra i .

Os parâmetros do modelo são representados por c_{ij} , d_i , n_{ij}^0 , x_{ij} , $\bar{f}_{ij}$, $\bar{g}_i$ e $\bar{n}_{ij}$, indicando, respectivamente, custo de um circuito no ramo ij , previsão da demanda na barra i , número de circuitos existentes no ramo ij , reatância de um circuito no ramo ij , fluxo máximo de potência ativa de cada circuito no ramo ij , geração máxima de potência ativa na barra i e número máximo de novos circuitos no ramo ij .

O modelo, dado nas Equações 1 a 7, pode ser formulado de uma forma mais compacta (SILVA et al., 2005):

$$\min v = \sum_{ij \in L} c_{ij} n_{ij} \quad (8)$$

s.a.

$$n = \{n_{ij}\} \in RO \quad (9)$$

onde RO representa as restrições operacionais do PERTE, ou seja, RO indica todas as restrições dadas pelas Equações 2 a 7. Esta formulação facilita o entendimento do modelo CC estático com restrições de segurança N-1.

2.3 O MODELO CC ESTÁTICO COM RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA N-1

O modelo CC com restrições de segurança N-1, garante o funcionamento da rede de transmissão, mesmo que um dos circuitos fique fora de funcionamento.

Utilizando a mesma ideia do modelo compacto da Seção 2.2, o modelo compacto para o PERTES é dado da seguinte forma (SILVA et al., 2005):

$$\min v = \sum_{ij \in L} c_{ij} n_{ij} \quad (10)$$

s.a.

$$n = \{n_{ij}\} \in RO \quad (11)$$

$$n = \{n_{ij}\} \in RS \quad (12)$$

Onde RS representará as restrições de segurança do PERTES. O conjunto RS normalmente leva em conta que linhas de todos os ramos podem vir a falhar, mas em alguns casos, pode-se escolher apenas os ramos críticos para adicionar o reforço. Neste caso, escolhe-se um subconjunto do conjunto de ramos $SL \subseteq L$ para representar todos os ramos que podem apresentar falha. O caso $SL = L$ é o mais complexo e quando $SL = \emptyset$ o modelo PERTES se reduz ao modelo PERTE. Com a introdução do conjunto SL , pode-se expor o conjunto RS da seguinte forma:

$$RS = \bigcap_{kl \in SL} RS_{kl}. \quad (13)$$

Baseado nos trabalhos de Silva (2013) e de Silva et al. (2005), cada conjunto de restrições RS_{kl} , com $kl \in SL \subseteq L$, será formado por todas as soluções que satisfizerem as seguintes restrições:

$$\sum_{ji \in L} f_{ji}^{kl} - \sum_{ij \in L} f_{ij}^{kl} + g_i^{kl} = d_i, \quad \forall i \in B \quad (14)$$

$$f_{kl}^{kl} = \max\{0, n_{kl}^0 + n_{kl} - 1\} \frac{(\theta_k^{kl} - \theta_l^{kl})}{x_{kl}} \quad (15)$$

$$f_{ij}^{kl} = (n_{ij}^0 + n_{ij}) \frac{(\theta_i^{kl} - \theta_j^{kl})}{x_{ij}}, \quad \forall ij \in L, ij \neq kl \quad (16)$$

$$|f_{kl}^{kl}| \leq \max\{0, n_{kl}^0 + n_{kl} - 1\} \bar{f}_{kl}^c \quad (17)$$

$$|f_{ij}^{kl}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \bar{f}_{ij}^c, \quad \forall ij \in L, ij \neq kl \quad (18)$$

$$0 \leq g_i^{kl} \leq \bar{g}_i^c, \quad \forall i \in B \quad (19)$$

Onde f_{ij}^{kl} , g_i^{kl} , θ_i^{kl} , $\bar{f}_{kl}^c$ e $\bar{g}_i^c$ indicam, respectivamente, o fluxo de potência ativa no ramo ij com uma contingência no ramo kl , a geração de potência ativa na barra i com uma contingência no ramo kl , o ângulo de fase na barra i com uma contingência no ramo kl , o fluxo máximo de potência ativa em um circuito no ramo ij com uma contingência no ramo kl e a geração máxima de potência ativa na barra i com uma linha em contingência.

Os valores de $\bar{f}_{kl}^c$ e $\bar{g}_i^c$, normalmente, são superiores aos valores $\bar{f}_{kl}$ e $\bar{g}_i$, permitindo, quando houver contingência, que o sistema opere com uma certa sobrecarga. $\bar{f}_{kl}^c$ costuma ser 20% maior que $\bar{f}_{kl}$ e $\bar{g}_i^c$ ter o valor nominal do gerador (SILVA, 2013). No trabalho utilizou-se $\bar{g}_i^c = \bar{g}_i$, já considerando $\bar{g}_i$ como a capacidade máxima dos geradores.

Considerando as Equações 10 a 19, determina-se o modelo completo para o PERTES nas Equações 20 a 32.

$$\min v = \sum_{ij \in L} c_{ij} n_{ij} \quad (20)$$

s.a.

$$\sum_{ji \in L} f_{ji} - \sum_{ij \in L} f_{ij} + g_i = d_i, \quad \forall i \in B \quad (21)$$

$$f_{ij} = (n_{ij}^0 + n_{ij}) \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}}, \quad \forall ij \in L \quad (22)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \bar{f}_{ij}, \quad \forall ij \in L \quad (23)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i, \quad \forall i \in B \quad (24)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij}, \quad \forall ij \in L \quad (25)$$

$$n_{ij} \text{ inteiro}, \quad \forall ij \in L \quad (26)$$

$$\sum_{ji \in L} f_{ji}^{kl} - \sum_{ij \in L} f_{ij}^{kl} + g_i^{kl} = d_i, \quad \forall i \in B, \forall kl \in SL \quad (27)$$

$$f_{kl}^{kl} = \max\{0, n_{kl}^0 + n_{kl} - 1\} \frac{(\theta_k^{kl} - \theta_l^{kl})}{x_{kl}}, \quad \forall kl \in SL \quad (28)$$

$$f_{ij}^{kl} = (n_{ij}^0 + n_{ij}) \frac{(\theta_i^{kl} - \theta_j^{kl})}{x_{ij}}, \quad \forall ij \in L, ij \neq kl, \forall kl \in SL \quad (29)$$

$$|f_{kl}^{kl}| \leq \max\{0, n_{kl}^0 + n_{kl} - 1\} \bar{f}_{kl}^c, \quad \forall kl \in SL \quad (30)$$

$$|f_{ij}^{kl}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \bar{f}_{ij}^c, \quad \forall ij \in L, ij \neq kl, \forall kl \in SL \quad (31)$$

$$0 \leq g_i^{kl} \leq \bar{g}_i^c, \quad \forall i \in B, \forall kl \in SL \quad (32)$$

2.4 FACTIBILIDADE DE UM PLANO DE EXPANSÃO

Resolver os modelos apresentados anteriormente pode ser inviável, pois o modelo é não linear inteiro misto, principalmente para instâncias referentes a sistemas de grande porte. Uma solução é utilizar o modelo CC disjuntivo que é linear e equivalente ao modelo CC, mas ao custo de um acréscimo significativo no número de variáveis e restrições. Mesmo com a linearização, o modelo continua com variáveis inteiras e o uso fica comprometido em sistemas com dimensões elevadas.

Soluções para instâncias complexas podem ser encontradas através de metodologias não exatas, como as meta-heurísticas. Neste caso, é importante saber quando um plano de expansão dado é factível. Além disso, é importante saber mensurar a qualidade de um plano de expansão.

Para criar uma forma de calcular a qualidade de um plano de expansão qualquer $n = \{n_{ij}\}_{ij \in L}$, altera-se o modelo de programação linear inteiro misto, dado pelas

Equações 1 a 7, da seguinte forma: as variáveis $n = \{n_{ij}\}_{ij \in L}$ serão consideradas parâmetros no novo modelo, pois seus valores serão conhecidos antecipadamente, e haverá a adição de variáveis de corte de carga r_i , $i \in B$.

Os novos parâmetros irão remover a não linearidade do problema e devem satisfazer as Equações 6. Além disso, todas as variáveis, incluindo as novas r_i , não terão restrições de integralidade. As variáveis de corte de carga r_i , $i \in B$ permitirão mensurar a qualidade de qualquer plano de expansão ao resolver o problema de programação linear descrito pelas Equações 33 a 38.

$$\min v = \sum_{ij \in L} c_{ij} n_{ij} + \alpha \sum_{i \in B} r_i \quad (33)$$

s.a.

$$\sum_{ji \in L} f_{ji} - \sum_{ij \in L} f_{ij} + g_i + r_i = d_i, \quad \forall i \in B \quad (34)$$

$$f_{ij} = (n_{ij}^0 + n_{ij}) \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}}, \quad \forall ij \in L \quad (35)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \bar{f}_{ij}, \quad \forall ij \in L \quad (36)$$

$$0 \leq g_{ij} \leq \bar{g}_{ij}, \quad \forall i \in B \quad (37)$$

$$0 \leq r_i \leq d_i, \quad \forall i \in B \quad (38)$$

O modelo PERTE, dado nas Equações 1 a 7, e o modelo PERTE para calcular a qualidade de uma solução, dado pelas Equações 33 a 38, são semelhantes e permitem uma comparação. Na função objetivo da Equação 1 acrescenta-se o produto de um parâmetro α pelo somatório dos cortes de carga, gerando a Equação 33. Nas Equações 2 adicionam-se as variáveis de corte de carga, r_i , gerando a Equação 34. Na Equação 3, n_{ij} é uma variável inteira e gera uma equação não linear pois é multiplicada pela diferença de variáveis $\theta_i - \theta_j$. Por outro lado, n_{ij} é um valor conhecido na Equação 35 e, com isso, a não linearidade deixa de ocorrer. Do mesmo modo, n_{ij} é uma variável na Equação 4 e um valor conhecido na Equação 36. As equações de limite de geração não são alteradas. As restrições nas Equações 6 e 7, referentes às variáveis n_{ij} , são removidas. Finalmente, acrescenta-se a Equação 38, que representa os limites para o corte de carga, caso o plano de expansão n seja implementado.

Seguindo a notação do modelo compacto (Equações 8 e 9), temos o seguinte modelo:

$$\min v = \sum_{ij \in L} c_{ij} n_{ij} + \alpha \sum_{i \in B} r_i \quad (39)$$

s.a.

$$n = \{n_{ij}\} \in RO' \quad (40)$$

Onde RO' indica todas as restrições operacionais nas Equações 34 a 38.

Agora, para calcular a qualidade de um plano de expansão no caso do PERTES, pode-se utilizar um raciocínio análogo ao utilizado na construção do modelo PERTES, dado nas Equações 20 a 32, e obter o modelo dado nas Equações 41 a 51, onde n será um parâmetro e não uma variável.

$$\min v = \sum_{ij \in L} c_{ij} n_{ij} + \alpha \left(\sum_{i \in B} r_i + \sum_{kl \in SL} \sum_{i \in B} r_i^{kl} \right) \quad (41)$$

s.a.

$$\sum_{ji \in L} f_{ji} - \sum_{ij \in L} f_{ij} + g_i + r_i = d_i, \quad \forall i \in B \quad (42)$$

$$f_{ij} = (n_{ij}^0 + n_{ij}) \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}}, \quad \forall ij \in L \quad (43)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \bar{f}_{ij}, \quad \forall ij \in L \quad (44)$$

$$0 \leq g_{ij} \leq \bar{g}_{ij}, \quad \forall i \in B \quad (45)$$

$$\sum_{ji \in L} f_{ji}^{kl} - \sum_{ij \in L} f_{ij}^{kl} + g_i^{kl} + r_i^{kl} = d_i, \quad \forall i \in B, \forall kl \in SL, n_{kl}^0 + n_{kl} > 0 \quad (46)$$

$$f_{kl}^{kl} = (n_{kl}^0 + n_{kl} - 1) \frac{(\theta_k^{kl} - \theta_l^{kl})}{x_{kl}}, \quad \forall kl \in SL, n_{kl}^0 + n_{kl} > 0 \quad (47)$$

$$f_{ij}^{kl} = (n_{ij}^0 + n_{ij}) \frac{(\theta_i^{kl} - \theta_j^{kl})}{x_{ij}}, \quad \forall ij \in L, ij \neq kl, \forall kl \in SL, n_{kl}^0 + n_{kl} > 0 \quad (48)$$

$$|f_{kl}^{kl}| \leq (n_{kl}^0 + n_{kl} - 1) \bar{f}_{kl}^c, \quad \forall kl \in SL, n_{kl}^0 + n_{kl} > 0 \quad (49)$$

$$|f_{ij}^{kl}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \bar{f}_{ij}^c, \quad \forall ij \in L, ij \neq kl, \forall kl \in SL, n_{kl}^0 + n_{kl} > 0 \quad (50)$$

$$0 \leq g_i^{kl} \leq \bar{g}_i^c, \quad \forall i \in B, \forall kl \in SL, n_{kl}^0 + n_{kl} > 0 \quad (51)$$

Com isso, os valores de v nas Equações 33 e 41 mensuram a qualidade de um plano de expansão $n = \{n_{ij}\}$, respectivamente, para o PERTE e PERTES.

Porém, há uma outra forma de calcular a qualidade de um plano de expansão para o PERTES. Troca-se a resolução do PL nas Equações 41 a 51, pela resolução de vários PLs de dimensões inferiores, um PL nas Equações 33 a 38 e múltiplos PLs dados nas Equações 52 a 59.

O PL, dado pelas Equações 33 a 38, verificará o custo do plano de expansão e o custo do corte de carga, se houver, quando não há contingência no sistema. Um PL, dado nas Equações 52 a 59, só será resolvido se $n_{kl} + n_{kl}^0 > 0$ e v_{kl} indicará a quantidade de corte de carga com a linha $kl \in SL$ em contingência. Se $n_{kl} + n_{kl}^0 = 0$, então automaticamente $v_{kl} = 0$, pois não haverá linha no ramo kl e a rede opera no caso base, sem contingência.

$$\min v_{kl} = \sum_{i \in B} r_i \quad (52)$$

s.a.

$$\sum_{ji \in L} f_{ji} - \sum_{ij \in L} f_{ij} + g_i + r_i = d_i, \quad \forall i \in B \quad (53)$$

$$f_{kl} = \left(n_{kl}^0 + n_{kl} - 1 \right) \frac{(\theta_k - \theta_l)}{x_{kl}} \quad (54)$$

$$f_{ij} = \left(n_{ij}^0 + n_{ij} \right) \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}}, \quad \forall ij \in L, ij \neq kl \quad (55)$$

$$|f_{kl}| \leq \left(n_{kl}^0 + n_{kl} - 1 \right) \bar{f}_{kl}^c \quad (56)$$

$$|f_{ij}| \leq \left(n_{ij}^0 + n_{ij} \right) \bar{f}_{ij}^c, \quad \forall ij \in L, ij \neq kl \quad (57)$$

$$0 \leq g_{ij} \leq \bar{g}_{ij}^c, \quad \forall i \in B \quad (58)$$

$$0 \leq r_i \leq d_i, \quad \forall i \in B \quad (59)$$

Portanto, a qualidade de um plano de expansão para o PERTES também pode ser dado pelo seguinte valor:

$$\text{Qualidade de } n = v + \alpha \sum_{\substack{kl \in SL \\ n_{kl}^0 + n_{kl} > 0}} v_{kl}, \quad (60)$$

Onde v é obtido na Equação 33 e os v_{kl} na Equação 52.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo exhibe um dos principais modelos para o problema PERT, o modelo CC, visto em duas de suas variações: estático e estático com restrições de segurança.

Além disso, apresenta formas de calcular a qualidade de um plano de expansão nas duas variações do problema, que é uma ferramenta fundamental para o uso de meta-heurísticas.

A forma alternativa de se calcular a qualidade de um plano de expansão no caso PERTES, troca o uso de um PL com uma dimensão maior, pelo uso de vários PLs de dimensões menores. Espera-se, com esta outra forma de cálculo, uma melhoria no tempo necessário para definir a qualidade de um plano de expansão, resultando em um melhor desempenho das meta-heurísticas.

3 META-HEURÍSTICAS APLICADAS AO PERT

3.1 META-HEURÍSTICAS

Meta-heurísticas são ferramentas de otimização utilizadas para problemas complexos ou de dimensão elevada. Como o grande número de variáveis e restrições acabam inviabilizando o uso de metodologias exatas, elas são uma alternativa viável para sua resolução.

Como toda ferramenta, elas possuem vantagens e desvantagens. As principais vantagens são a facilidade de implementação e a capacidade de lidar com problemas complexos e de grande porte. Sua principal desvantagem é a impossibilidade de garantir otimalidade das soluções encontradas. Dessa forma, seu uso é indicado quando as metodologias exatas encontram dificuldades para encontrar soluções. Porém, mesmo em problemas simples onde existem algoritmos exatos e eficientes para determinação de ótimo global, quando restrições complexas são introduzidas, como determinar soluções em tempo real, o uso de meta-heurísticas torna-se uma alternativa viável. O PERT não possui restrições de tempo real, porém possui não linearidades e, além disso, mesmo em situações de dimensões elevadas, as meta-heurísticas conseguem resultados satisfatórios.

De acordo com Glover e Laguna (1997), uma meta-heurística é uma estratégia que guia ou modifica uma heurística para produzir soluções que superam a qualidade daquelas normalmente encontradas.

As meta-heurísticas podem ser classificadas em dois grandes grupos, como exibido por Talbi (2009): as meta-heurísticas populacionais e as meta-heurísticas de uma única solução.

As meta-heurísticas populacionais trabalham com um conjunto de soluções, melhorando esse conjunto iterativamente. Já as meta-heurísticas de única solução partem de uma única solução e vão fazendo melhorias nessa solução. Os principais conceitos de várias meta-heurísticas são mostrados por Talbi (2009) e alguns exemplos de meta-heurísticas são citados a seguir.

- Algoritmos evolutivos:
 - Algoritmo genético (*genetic algorithm*);
 - Busca dispersa (*scatter search*);
 - Colônia de formigas (*ant colony*);

- Otimização por enxame de partículas (*particle swarm optimization* - PSO);
- Sistema imunológico artificial (*artificial immune system*) .
- Algoritmos de solução única:
 - Busca local (*local search*);
 - Busca tabu (*tabu search*);
 - Busca local iterada (*iterated local search*);
 - Busca local guiada (*guided local search*);
 - GRASP (*greedy randomized adaptative search procedure*).

O principal objetivo nesse capítulo é exibir características da implementação de algumas meta-heurísticas aplicadas aos problemas PERTE e PERTES. Foram escolhidas apenas meta-heurística de solução única, pois somente o respectivo módulo do *framework* ParadisEO será utilizado para implementações.

Inicia-se apresentando alguns componentes das meta-heurísticas, seguindo de detalhes da implementação da heurística de busca local (BL) e a geração, a partir da BL, a meta-heurística busca tabu (BT). Além disso, mostra-se como gerar os algoritmos GRASP e busca local iterada (BLI) utilizando os algoritmos BL e BT para melhoria de soluções. Dessa forma, as implementações dos algoritmos BL, BT, GRASP(BL), GRASP(BT), BLI(BL) e BLI(BT) utilizando o módulo MO do *framework* ParadisEO serão discutidas.

3.2 ELEMENTOS BÁSICOS

Existem várias meta-heurísticas e elas podem ser classificadas, segundo Talbi (2009), de acordo com algumas características: com ou sem memória, inspiradas ou não por processos naturais, determinísticas ou estocásticas, iterativa ou gulosa e as baseadas em populações ou em indivíduos. Cada uma delas com suas características individuais, porém com conceitos comuns a todas: codificação e função objetivo. A codificação é utilizada para representar uma solução e cada uma das soluções possui um valor numérico associado que, normalmente, é atribuído por meio de uma função, chamada função objetivo. Esse valor é usualmente chamado de *fitness*, indicando a qualidade da solução e é o valor a ser minimizado nos problemas abordados.

3.2.1 Espaço de busca, codificação e função objetivo

Nos modelos do Capítulo 2, um plano de expansão para o problema de transmissão foi denotado por $n = \{n_{ij} \mid ij \in L\}$, onde $0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij}$ para todo $ij \in L$ e $\bar{n}_{ij}$ é o número

máximo de linhas que se pode adicionar no ramo ij . Desta forma, o espaço de busca será o conjunto formado por todos os planos de expansão possíveis:

$$N = \{n = \{n_{ij}, ij \in L\} \mid 0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij}, \forall ij \in L\} \quad (61)$$

A codificação de uma solução para o PERT (independentemente dos casos PERTE ou PERTES) será dada por um vetor com dimensão igual ao número de ramos existentes. Cada entrada do vetor definirá a quantidade de novas linhas no respectivo ramo serão construídas e esse vetor indicará um plano de expansão para o sistema estudado.

Inicialmente, um plano de expansão foi denotado por $n = \{n_{ij} \mid ij \in L\}$, porém, para uso computacional, muda-se esta notação para $n = [n[1], n[2], \dots, n[|L|]]$, ou seja, um plano de expansão também pode ser denotado por um vetor, ressaltando que uma ordenação será necessária no conjunto L , de acordo com a Figura 1.

Figura 1 – Codificação de uma solução.

$$n = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} \text{ramo 1} & \text{ramo 2} & & \text{ramo } |L| \\ \hline n[1] & n[2] & \cdots & n[|L|] \end{array} \end{array}$$

Fonte: O autor.

Diferente da codificação, cada problema (PERTE e PERTES) terá uma função objetivo diferente. O valor de v na Equação 33, determinará a qualidade de um plano de expansão para o PERTE e, para o PERTES, utiliza-se o valor v da Equação 41 ou valor encontrado na Equação 60.

3.2.2 Vizinhos e vizinhança

Um plano de expansão n será chamado de uma possível solução ou, simplesmente, solução para o problema. Um vizinho de uma solução n será uma nova solução que altera ligeiramente o vetor n (normalmente uma posição) e uma vizinhança será o conjunto de todos os vizinhos possíveis.

Neste trabalho, aborda-se um tipo de vizinhança, que depende de um parâmetro. A vizinhança de n será denotada por $V_t(n)$, onde t é um parâmetro inteiro e estritamente positivo. Cada elemento de $V_t(n)$ será idêntico a n , salvo uma posição i , que terá um valor diferente de $n[i]$, mas no intervalo com extremos $\max(n[i] - t, 0)$ e $\min(n[i] + t, \bar{n}[i])$.

Ilustra-se, na Figura 2, as vizinhanças $V_1(n)$ e $V_2(n)$ quando $n = [0, 2, 1, 0, 3]$ e o número máximo de novas linhas é dado por $\bar{n} = [2, 2, 2, 1, 4]$. Nota-se que os elementos de $V_2(n)$ marcados com * são também elementos de $V_1(n)$.

Figura 2 – Exemplo de vizinhanças.

Solução n :

0	2	1	0	3
---	---	---	---	---

$\bar{n}$:

2	2	2	1	4
---	---	---	---	---

$V_1(n)$

1	2	1	0	3
0	1	1	0	3
0	2	2	0	3
0	2	0	0	3
0	2	1	1	3
0	2	1	0	4
0	2	1	0	2

$V_2(n)$

1	2	1	0	3	*
2	2	1	0	3	
0	1	1	0	3	*
0	0	1	0	3	
0	2	2	0	3	*
0	2	0	0	3	*
0	2	1	1	3	*
0	2	1	0	4	*
0	2	1	0	2	*
0	2	1	0	1	

Fonte: O autor.

3.2.3 Movimentos e atributos

Uma vizinhança pode ser caracterizada de outra forma, não apenas pelos vizinhos. Em alguns casos, é possível caracterizá-la utilizando transformações que alteram a solução atual em um dos vizinhos. Essas transformações são chamadas de movimento, pois representam a movimentação de uma solução n para um de seus vizinhos.

Para a codificação escolhida e a vizinhança $V_t(n)$, uma representação de movimento é dada por: (i, u) , onde o movimento (i, u) representa o vizinho n' , com

$$n'[i] = u \text{ e } n'[j] = n[j], \text{ para } j \neq i, \quad (62)$$

ou seja, o movimento (i, u) altera o valor da coordenada i do vetor n para o valor u , mantendo o valor de todas as outras coordenadas inalterados. Certamente o valor de u precisa satisfazer as condições $u \neq n[i]$ e $\max(n[i] - t, 0) \leq u \leq \min(n[i] + t, \bar{n}[i])$.

Cada movimento é formado por atributos e (i, u) possui dois atributos: i representando o ramo escolhido e u representando a quantidade de linhas a construir.

Uma vantagem de utilizar movimentos é obter informações sobre uma solução, sem recorrer a um cálculo utilizando os dados de toda a informação. Por exemplo, o custo de

construção das linhas de um plano de expansão n é dado por $\sum_{i \in L} c[i] \cdot n[i]$. Mas sabendo que o custo de construção de n seja, por exemplo, 5000 unidades monetárias e o custo para a construção de uma linha no ramo 4 seja 150 unidades monetárias. Se $n[4] = 2$, então o custo da expansão do vizinho de n obtido a partir do movimento $(4, 5)$ será

$$5000 + (5 - 2) \cdot 150 = 5000 + 3 \cdot 150 = 5450, \quad (63)$$

Além disso, como a busca tabu baseia-se em memória, os movimentos e atributos terão um papel importante na construção e utilização da memória.

Na Figura 3 exemplifica-se a correspondência entre um vizinho e os movimentos.

Figura 3 – Correspondência vizinho-movimento.

Solução n :

0	2	1	0	3
---	---	---	---	---

$\bar{n}$:

2	2	2	1	4
---	---	---	---	---

$V_1(n)$

1	2	1	0	3	$= (1,1)$
0	1	1	0	3	$= (2,1)$
0	2	2	0	3	$= (3,2)$
0	2	0	0	3	$= (3,0)$
0	2	1	1	3	$= (4,1)$
0	2	1	0	4	$= (5,4)$
0	2	1	0	2	$= (5,2)$

$V_2(n)$

1	2	1	0	3	$= (1,1)$
2	2	1	0	3	$= (1,2)$
0	1	1	0	3	$= (2,1)$
0	0	1	0	3	$= (2,0)$
0	2	2	0	3	$= (3,2)$
0	2	0	0	3	$= (3,0)$
0	2	1	1	3	$= (4,1)$
0	2	1	0	4	$= (5,4)$
0	2	1	0	2	$= (5,2)$
0	2	1	0	1	$= (5,1)$

Fonte: O autor.

3.2.4 Solução inicial

Tanto para as meta-heurísticas de populações quanto para as de indivíduo, uma solução/população inicial é necessária. Uma forma simples de obtê-la é utilizando a geração aleatória, porém essa geração pode comprometer a eficiência do algoritmo.

Uma solução/população inicial de boa qualidade pode poupar bastante esforço computacional e as heurísticas construtivas são ferramentas comumente utilizadas para essa tarefa.

3.2.4.1 Algoritmo heurístico construtivo

Algoritmos heurísticos construtivos (AHC) são comumente utilizados para gerar soluções iniciais nas meta-heurísticas e existem vários AHCs para o PERTE: de Garver (GARVER, 1970), de Villasana-Garver-Salon (VGS) (VILLASANA; GARVER; SALON, 1985), do mínimo esforço (MONTICELLI et al., 1982) e do mínimo corte de carga (PEREIRA; PINTO, 1985). Detalhes e versões atualizadas desses algoritmos são discutidas por Sousa (2009).

Em geral, esses algoritmos são baseados em um índice de sensibilidade e, partindo de uma solução, possivelmente não factível, a cada iteração do AHC uma linha é adicionada nessa solução, até torná-la factível. Depois desse processo removem-se as linhas redundantes (caso existam) e tem-se uma solução de boa qualidade com um custo computacional relativamente baixo. Uma linha em um ramo é considerada redundante se é possível removê-la e manter o sistema satisfazendo todas as restrições aplicáveis, ou seja, o plano de expansão sem essa linha continua factível.

Este trabalho aborda o AHG VGS, que foi utilizado para construção de soluções iniciais das meta-heurísticas implementadas.

3.2.4.2 Modelo CC híbrido e índice de sensibilidade para o PERTE

O ponto central do AHG VGS é o modelo CC híbrido, encontrado nas Equações 64 a 71 (SOUSA, 2009). O modelo híbrido leva em conta as restrições da lei das tensões de Kirchhoff para as linhas existentes, mas não as considera para as linhas a serem construídas. Ele é um modelo de programação linear inteira que fica entre o modelo CC (mais complexo) e o modelo de transportes (mais simples).

$$\min v = \sum_{ij \in L} c_{ij} n_{ij} \quad (64)$$

s.a.

$$\sum_{ji \in L} f_{ji} - \sum_{ij \in L} f_{ij} + \sum_{ji \in L} f_{ji}^0 - \sum_{ij \in L} f_{ij}^0 + g_i = d_i, \quad \forall i \in B \quad (65)$$

$$f_{ij}^0 = n_{ij}^0 \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}}, \quad \forall ij \in L \quad (66)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij}, \quad \forall ij \in L \quad (67)$$

$$|f_{ij}| \leq n_{ij} \bar{f}_{ij}, \quad \forall ij \in L \quad (68)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i, \quad \forall i \in B \quad (69)$$

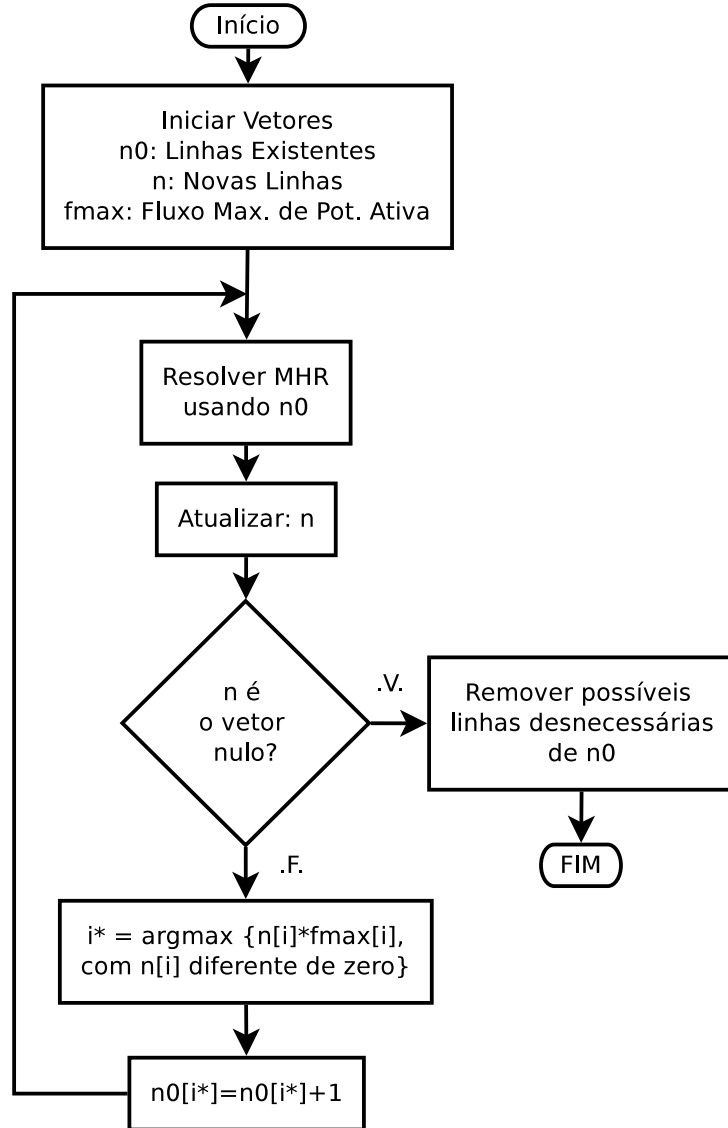
$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij}, \quad \forall ij \in L \quad (70)$$

$$n_{ij} \text{ inteiro}, \quad \forall ij \in L \quad (71)$$

O modelo híbrido, com o relaxamento da restrição de integralidade das variá-

veis n_{ij} (Equação 71), será chamado de modelo híbrido relaxado (MHR) e será utilizado para gerar os índices de sensibilidade (que guiarão a escolha de linhas a serem construídas).

Figura 4 – Fluxograma para AHC VGS.



Fonte: O autor.

Após resolver o MHR, os valores das variáveis n_{ij} serão utilizados para calcular os índices de sensibilidade. Seguindo a notação de Sousa (2009), os índices de sensibilidade de cada ramo ij são definidos da seguinte forma:

$$IS_{ij} = n_{ij} \bar{f}_{ij}, \text{ sempre que } n_{ij} \neq 0. \quad (72)$$

A linha mais promissora a ser construída será a que tiver o maior IS_{ij} , pois ela mostra onde há a maior necessidade de potência ativa.

3.2.4.3 AHC de Villasana-Garver-Salon

Tendo um índice de sensibilidade, o AHC VGS age iterativamente adicionando uma linha no conjunto de linhas existentes. Após resolver o MHR, a linha adicionada ao vetor de linhas existentes será a linha que possuir o maior índice de sensibilidade IS_{ij} , vistos na Equação 72. Repete-se o processo até acabar com a necessidade de construir novas linhas. Deste ponto, verifica-se a existência de linhas redundantes, ou seja, observa-se, linha por linha, se ao retirá-la, a solução ainda é factível. Após retirar as linhas desnecessárias, o algoritmo é finalizado com uma solução factível para o modelo CC. Na Figura 4 ilustra-se o processo descrito anteriormente, lembrando que na figura, cada ramo ij é na verdade representado por i , seguindo o padrão computacional estabelecido na Subseção 3.2.1.

3.2.4.4 Algoritmo heurístico construtivo e modelo CC híbrido para o PERTES

Para adaptar o AHC VGS para o PERTES, apresenta-se o modelo CC híbrido para o PERTES, encontrado nas Equações 74 a 88. O índice de sensibilidade é o mesmo da Equação 72 e o funcionamento do AHC será idêntico ao apresentado na Figura 4, onde o modelo híbrido relaxado (MHR) será o modelo CC híbrido para o PERTES com o relaxamento da restrição de integralidade das variáveis n_{ij} na Equação 81.

O modelo CC híbrido para o PERTES não utiliza todo o conjunto SL , onde pode haver contingência. Ele utiliza o conjunto SL^0 , que é um subconjunto de SL , onde cada ramo tenha no mínimo uma linha já construída, ou seja,

$$SL^0 = \{kl \in SL \mid n_{kl}^0 > 0\}. \quad (73)$$

Para a construção gulosa, o conjunto SL^0 é suficiente para a construção de uma solução factível, pois caso seja necessário construir mais alguma linha em um ramo onde não havia uma linha existente, na próxima iteração do AHC, o modelo irá considerar a contingência na linha que acabou de ser considerada para construção.

$$\min v = \sum_{ij \in L} c_{ij} n_{ij} \quad (74)$$

s.a.

$$\sum_{ji \in L} f_{ji} - \sum_{ij \in L} f_{ij} + \sum_{ji \in L} f_{ji}^0 - \sum_{ij \in L} f_{ij}^0 + g_i = d_i, \quad \forall i \in B \quad (75)$$

$$f_{ij}^0 = n_{ij}^0 \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}}, \quad \forall ij \in L \quad (76)$$

$$|f_{ij}^0| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij}, \quad \forall ij \in L \quad (77)$$

$$|f_{ij}| \leq n_{ij} \bar{f}_{ij}, \quad \forall ij \in L \quad (78)$$

$$0 \leq g_i \leq \bar{g}_i, \quad \forall i \in B \quad (79)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij}, \quad \forall ij \in L \quad (80)$$

$$n_{ij} \text{ inteiro}, \quad \forall ij \in L \quad (81)$$

$$\sum_{ji \in L} f_{ji}^{kl} - \sum_{ij \in L} f_{ij}^{kl} + \sum_{ji \in L} f_{ji}^{0kl} - \sum_{ij \in L} f_{ij}^{0kl} + g_i^{kl} = d_i, \quad \forall i \in B, \forall kl \in SL^0 \quad (82)$$

$$f_{kl}^{0kl} = (n_{kl}^0 - 1) \frac{(\theta_k^{kl} - \theta_l^{kl})}{x_{kl}}, \quad \forall kl \in SL^0 \quad (83)$$

$$f_{ij}^{0kl} = n_{ij}^0 \frac{(\theta_i^{kl} - \theta_j^{kl})}{x_{ij}}, \quad \forall ij \in L, ij \neq kl, \forall kl \in SL^0 \quad (84)$$

$$|f_{kl}^{0kl}| \leq (n_{kl}^0 - 1) \bar{f}_{kl}^c, \quad \forall kl \in SL^0 \quad (85)$$

$$|f_{ij}^{0kl}| \leq n_{ij}^0 \bar{f}_{ij}^c, \quad \forall ij \in L, ij \neq kl, \forall kl \in SL^0 \quad (86)$$

$$|f_{ij}^{kl}| \leq n_{ij} \bar{f}_{ij}^c, \quad \forall ij \in L, \forall kl \in SL^0 \quad (87)$$

$$0 \leq g_i^{kl} \leq \bar{g}_i^c, \quad \forall i \in B, \forall kl \in SL^0 \quad (88)$$

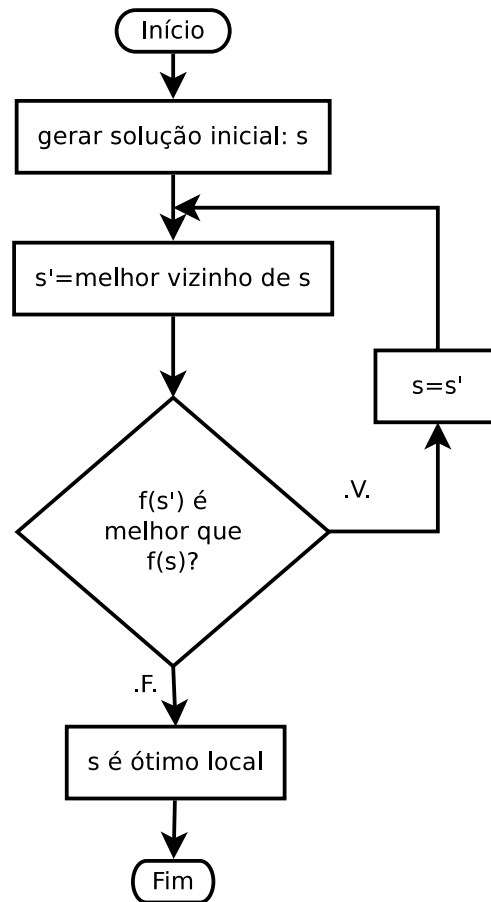
3.3 BUSCA LOCAL

A busca local é uma heurística que guarda uma solução guia e, a cada iteração, faz uma substituição por uma solução de melhor qualidade, encerrando o algoritmo quando essa troca não for mais possível.

Os requisitos para a busca local já foram abordados: representação de uma solução, solução inicial (geração), vizinhos/vizinhança e qualidade de uma solução. Na Figura 5 aborda-se a relação desses componentes.

O resultado de uma busca local depende fundamentalmente de dois fatores: solução inicial e estrutura de vizinhança. No caso da solução inicial, sua alteração pode levar a outros ótimos locais e algumas meta-heurísticas baseiam-se nessa característica, como a Busca Local Iterada (*Iterated Local Search*) e o GRASP (*Greedy Randomizes Adaptive Search Procedure*).

Figura 5 – Fluxograma de uma busca local.



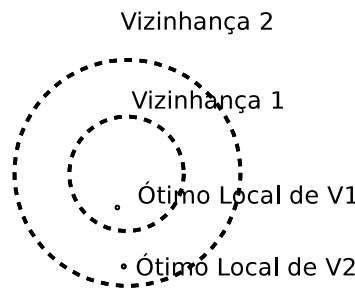
Fonte: O autor.

Por outro lado, um ótimo local em uma estrutura de vizinhança pode não ser ótimo local em outra estrutura. Por exemplo, sejam V_1 e V_2 duas vizinhanças de uma mesma solução n , onde V_1 está contida e é diferente de V_2 . Um ótimo local em V_1 pode não ser um ótimo local em V_2 , pois como V_2 possui outros elementos, o ótimo local de V_2 pode estar fora de V_1 . Esse fato está ilustrado na Figura 6. Uma meta-heurística que utiliza essa característica é a Busca em Vizinhanças Variáveis (Variable Neighborhood Search).

O critério de parada da busca local é bastante simples: encerra-se a busca quando não houver um vizinho de melhor qualidade.

A busca tabu utiliza grande parte dos conceitos da busca local, mas para evitar o encerramento da busca ao atingir um ótimo local a BT utiliza uma estrutura de vizinhança adaptativa, cuja principal característica é o uso de memória, ou seja, informações são guardadas para melhor guiar a busca, na tentativa de evitar ótimos locais e ciclos. Além disso, o GRASP e a busca local iterada utilizam uma busca local a cada iteração, após gerar uma nova solução de partida.

Figura 6 – Ótimos locais dependentes da vizinhança.



Fonte: O autor.

3.4 BUSCA TABU

A busca tabu é uma meta-heurística que altera a busca local, adicionando memória. Ela está baseada na ideia de memória adaptativa, fazendo uma exploração que responde aos fatores encontrados durante a trajetória. Isso faz o processo visitar locais inexplorados (e/ou mais promissores) e, ao mesmo tempo, evitará ficar preso em regiões com um ou vários ótimos locais.

A memória adaptativa utiliza quatro princípios: recência, frequência, qualidade e influência. A recência leva em conta fatores encontrados em um curto espaço de tempo, normalmente levado em conta na memória de curto prazo. A frequência aparece nas memórias de médio/longo prazo, indicando quando, onde e como intensificar/diversificar. O aspecto da qualidade leva em conta a função objetivo e instrumentos que possam alterá-la para ajudar na busca. A influência, ou estrutura, indica a forma que uma solução e seus componentes interagem, mantendo a ideia de que uma escolha de boa qualidade aleatória pode ser menos proveitosa do que uma escolha de pior qualidade onde obtém-se informações importantes.

A busca tabu implementada constará apenas de memória de curto prazo, pois os mecanismos de intensificação e diversificação não se encontram bem desenvolvidos no *framework* ParadisEO e implementá-los foge da proposta de utilizar o *framework* sem alterar suas funcionalidades.

3.4.1 Vizinhança adaptativa

O principal aspecto da memória de curto prazo é a vizinhança adaptativa. Essa vizinhança é normalmente composta por uma lista tabu e um critério de aspiração. Neste trabalho, além dos dois componentes mencionados, também haverá a possibilidade de utilizar uma lista de candidatos.

Como a memória de curto prazo utiliza movimentos e atributos para guiar a busca,

uma lista com atributos de movimentos recentes, chamada de lista tabu, é mantida para evitar que movimentos que foram realizados há pouco tempo sejam desfeitos. Os atributos nesta lista são ditos tabu ativos e um movimento que contém um destes atributos é dito movimento tabu (um movimento tabu não deverá ser realizado). Os atributos ficam ativos por um determinado tempo, normalmente curto, para evitar ciclos e guiar a busca além dos ótimos locais. O tempo que um atributo fica impedido é chamado de duração tabu.

Além da lista tabu, existe um complemento que faz o papel oposto ao de proibir um movimento, chamado de critério de aspiração. O critério de aspiração serve para permitir a realização de movimentos tabu que cumpram alguns critérios.

O melhor exemplo para mostrar a importância do critério de aspiração é quando um movimento tabu levar a solução atual para uma nova solução com melhor qualidade que a solução incumbente. Se esse movimento tabu leva a busca para algo melhor que tudo já visitado, então essa nova solução, gerada por um movimento tabu, nunca foi visitada e o movimento que a gera não deveria ser proibido! Assim, a lista tabu e o critério de aspiração farão um papel de equilíbrio, evitando proibições cegas e ciclos de pequeno porte.

A lista tabu, de uma certa forma, gera uma lista de candidatos, porém todos os elementos são avaliados para saber se algum deles passa pelo critério de aspiração. Porém, a lista de candidatos é mais restritiva que a lista tabu, pois nela não haverá critério de aspiração. Logo, a lista de candidatos servirá para um propósito simples: diminuir o número de avaliações de vizinhos por iteração.

3.4.1.1 Detalhes para implementação da vizinhança adaptativa

Para entender o procedimento da lista tabu e o critério de aspiração, deve-se notar que os movimentos possuem a seguinte forma: (i, u) , onde i indica o ramo que será alterado e u a nova quantidade de linhas a serem construídas nesse ramo. A lista tabu consistirá de um vetor T com a mesma dimensão de uma solução n e, em cada coordenada do vetor T , haverá um valor indicando quanto tempo (iterações) essa coordenada não poderá ser alterada em n , ou seja, quanto tempo um ramo deverá permanecer sem alterações durante a busca.

Ao considerar, por exemplo, uma duração tabu igual a dois e que os movimentos $(1,0)$ e $(5,3)$ tenham sido utilizados para gerar a solução $[0, 2, 1, 0, 3]$. Na Figura 7 ilustra-se os vizinhos/movimentos tabu das vizinhanças $V_1(n)$ e $V_2(n)$ dessa situação.

O critério de aspiração que será utilizado é o critério de melhorar a solução incumbente. Ele permite a realização de um movimento tabu cuja qualidade supere a qualidade da incumbente, evitando que uma solução de excelente qualidade deixe de ser visitada.

Figura 7 – Movimentos Tabu.

Atributos tabu ativos: ramo 1 e ramo 5
Os movimentos tabu foram marcados com *

Solução n :

0	2	1	0	3
---	---	---	---	---

 $\bar{n}$:

2	2	2	1	4
---	---	---	---	---

$V_1(n)$

1	2	1	0	3
0	1	1	0	3
0	2	2	0	3
0	2	0	0	3
0	2	1	1	3
0	2	1	0	4
0	2	1	0	2

$V_2(n)$

1	2	1	0	3
2	2	1	0	3
0	1	1	0	3
0	0	1	0	3
0	2	2	0	3
0	2	0	0	3
0	2	1	1	3
0	2	1	0	4
0	2	1	0	2
0	2	1	0	1

Fonte: O autor.

Finalmente, a lista de candidatos servirá para diminuir o número de vizinhos observados, pois um sistema com $|L|$ ramos, terá entre $|L|$ e $2|L|$ vizinhos para a vizinhança V_1 e a vizinhança V_t pode ter até $2t|L|$ vizinhos. Para determinar a qualidade de cada vizinho precisa-se calcular um problema de programação linear e isso gera um custo computacional alto. Nesse aspecto, a lista de candidatos procura, por meio de conhecimento técnico do problema, diminuir os candidatos a serem observados de duas formas: utilizando apenas o custo de construção de novas linhas, ignorando o custo do corte de carga, e a segunda forma verifica onde é necessário incluir mais linhas, utilizando-se do mesmo índice de sensibilidade do AHC da Subseção 3.2.4.1.

O custo para construção de um plano de expansão n é dado por

$$cc(n) = \sum_{i \in L} c_i n_i \quad (89)$$

e a qualidade de uma solução n será dada por

$$v(n) = cc(n) + C, \quad (90)$$

onde $C \geq 0$ depende do problema, como visto nas Equações 33, 41 e 60,

$$C = \begin{cases} \alpha \sum_{i \in B} r_i & , \text{ para PERTE,} \\ \alpha \left(\sum_{ij \in B} r_i + \sum_{kl \in L} \sum_{i \in B} r_i^{kl} \right) & , \text{ para PERTES,} \\ \alpha \left(\sum_{ij \in B} r_i + \sum_{kl \in L} v_{kl} \right) & , \text{ na forma alternativa do PERTES.} \end{cases} \quad (91)$$

Como $C \geq 0$, se um vizinho n' de n possui um custo de construção $cc(n')$ maior que a qualidade da solução atual, considerando C , esse vizinho não terá como melhorar a qualidade e tendo isso em vista, pode ser descartado.

Agora, o custo computacional para calcular $cc(n')$ sabendo-se o custo $cc(n)$ e o movimento (i, u) que gerou n' é baixo:

$$cc(i, u) = cc(n) + c_i(u - n[i]), \quad (92)$$

onde c_i indica o custo de construção de uma nova linha no ramo i e $cc(i, u) = cc(n')$.

Ao denotar a qualidade da solução n por $v(n)$, tem-se que a lista de candidatos, utilizando apenas o custo de construção, será:

$$LC_1(n) = \{(i, u) \in V_t(n) \mid cc(i, u) < v(n)\}. \quad (93)$$

Porém, utilizar somente essa lista de candidatos gera um problema: a maior parte dos vizinhos será obtida reduzindo o número de linhas. Assim, entra em cena a outra parte dos candidatos, aqueles gerados utilizando o modelo híbrido relaxado (MHR), que pode ser encontrado na Subseção 3.2.4.1.

Sendo n_i , com $i \in L$, o valor das variáveis relaxadas no MHR para construção de novas linhas, obtemos a outra lista de candidatos:

$$LC_2(n) = \{(i, u) \in V_t(n) \mid n_i > 0 \text{ e } u > n[i]\}. \quad (94)$$

Finalmente a lista de candidatos final, denotada LC , será a união de LC_1 com LC_2 :

$$LC = LC_1 \cup LC_2 = \{(i, u) \in V_t(n) \mid cc(i, u) < v(n) \text{ ou } n_i > 0 \text{ e } u > n[i]\}. \quad (95)$$

O funcionamento desses componentes concluem a discussão sobre o algoritmo de busca tabu para o PERT, seguindo para os algoritmos busca local iterada e GRASP.

3.5 BUSCA LOCAL ITERADA E GRASP

A busca local iterada (BLI) e o GRASP são meta-heurísticas que utilizam a heurística de busca local, sem modificá-la. Nos dois casos, o processo cria ou modifica

uma solução repetidamente, sempre utilizando uma busca local para guiar essa solução recém criada (ou modificada) para um ótimo local.

Normalmente essas duas meta-heurísticas são vistas como procedimentos distintos, mas em essência são bem parecidas. Na BLI, gera-se uma solução inicial, aplica-se uma busca local e então inicia-se o ciclo: perturba-se a solução encontrada pela busca local, faz-se uma nova busca local e retorna-se para o início do ciclo até o critério de parada ser satisfeito. Este procedimento foi ilustrado na Figura 8(a).

No GRASP, Figura 8(b), o procedimento difere ligeiramente, pois o início já é o próprio ciclo: gera-se uma solução com um procedimento que fica entre o guloso e o aleatório, aplica-se a busca local e reinicia-se o ciclo, caso o critério de parada não seja satisfeito. Porém o algoritmo GRASP pode ser visto como uma variação da BLI. Para isso, basta tornar os procedimentos de iniciar e perturbar uma solução na BLI pela geração de soluções do GRASP, como ilustrou-se na Figura 8(c).

A perturbação para o BLI será feita utilizando um parâmetro α , $0 \leq \alpha \leq 1$, que indicará a proporção da solução que será aleatoriamente modificada. Por exemplo, se $\alpha = 0,3$ então, até 30% dos ramos na solução terão seus valores alterados aleatoriamente, recebendo um valor entre zero e o máximo de linhas permitido para os ramos escolhidos. Observa-se que no mínimo um ramo será alterado, mesmo que α assumo o valor 0 (zero), para garantir que sempre haverá perturbação.

Já para o GRASP, a perturbação será, na verdade, uma nova inicialização feita com o AHC VGS, mas com um fator aleatório incluído.

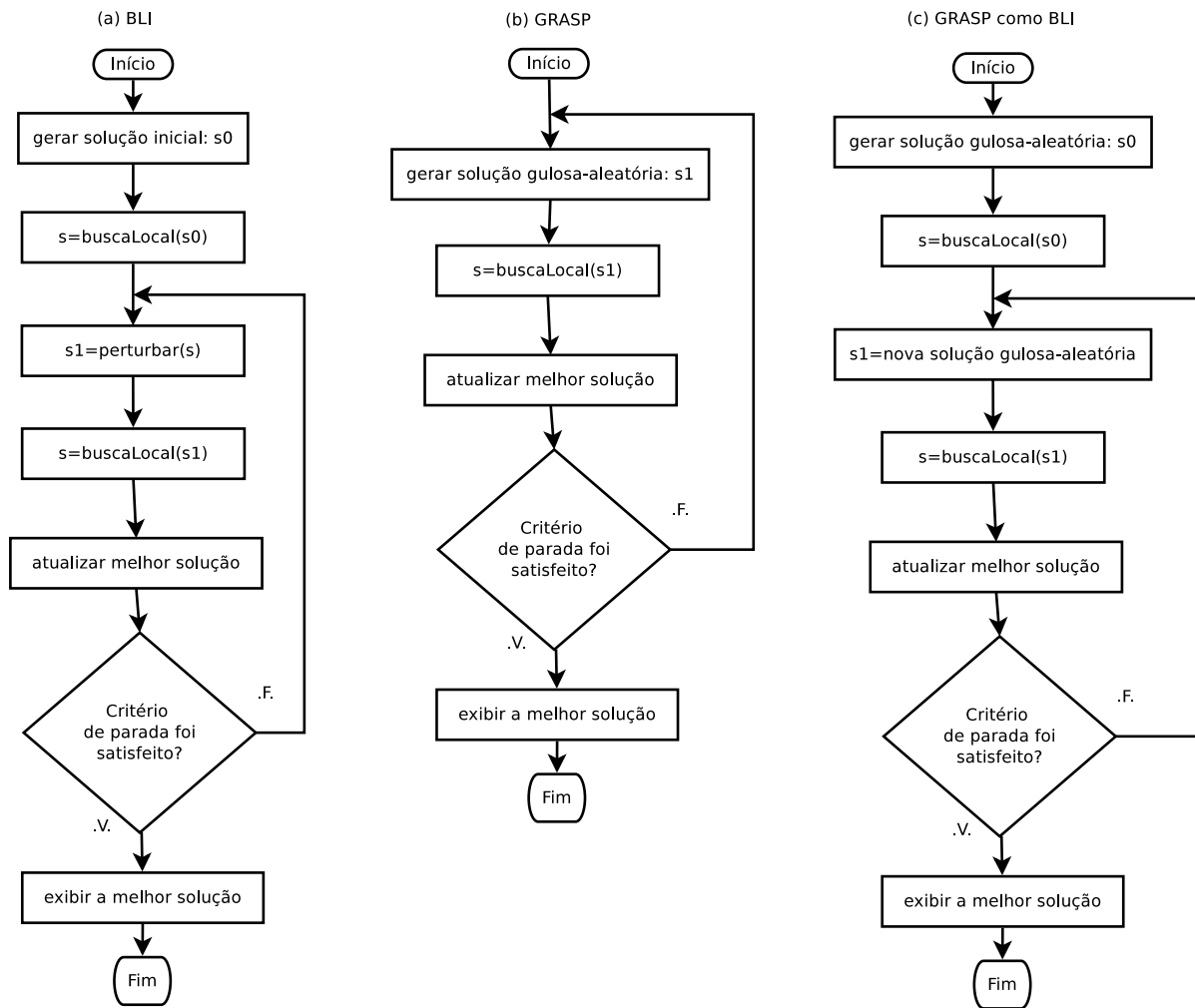
A busca local que compõe a BLI e o GRASP pode ser substituída qualquer meta-heurística de solução única e, neste trabalho, haverá duas variantes: BLI/GRASP com busca local e BLI/GRASP com busca tabu.

O critério de parada para os algoritmos BLI/GRASP será o tempo de execução e a busca local interna deverá respeitar esse tempo máximo dos algoritmos, ou seja, se durante o processo de busca local o tempo máximo do algoritmo é esgotado, então a busca local deve ser interrompida para que o algoritmo seja interrompido. A busca tabu também deverá satisfazer esse critério, mas também precisa de alguma outra forma de ser interrompida, pois ela não possui um critério de parada preestabelecido, como ocorre na busca local. O critério escolhido foi: permanecer sem melhorias por um determinado número de iterações.

3.6 FRAMEWORK PARADISEO

ParadisEO é um *framework* de código aberto desenvolvido e mantido por uma equipe do INRIA (Instituto Nacional de Pesquisa em Informática e Automação, na

Figura 8 – Fluxogramas para busca local iterada e GRASP



Fonte: O autor.

França). O principal objetivo é a reutilização de *design* e código de meta-heurísticas, focando na implementação de particularidades de cada problema e utilizando todas as partes já implementadas.

Segundo Talbi (2009), o uso de um *framework*, como o ParadisEO, deveria ser a primeira opção para implementações de meta-heurísticas pois pode-se aproveitar tanto o código quanto o *design*, mas atualmente, a programação de todo o código, sem nenhuma reutilização, é a forma mais utilizada. Talbi (2009) também explica que isso se deve, principalmente, pela relativa facilidade de se implementar os algoritmos das meta-heurísticas.

O principal fator que levou a escolha do ParadisEO foi o uso da linguagem C++ em sua implementação e, de acordo com Parejo et al. (2012), é o *framework* em C++ com maior abrangência em técnicas de otimização.

O *framework* ParadisEO possui quatro módulos principais: EO (Evolving Objects), MO (Moving Objects), MOEO (MultiObjective Evolving Objects) e PEO (Parallel Evolving Objects). O módulo EO lida com os algoritmos populacionais evolutivos como Algoritmo Genético e PSO. As meta-heurísticas baseadas no movimento de uma única solução são abordadas no módulo MO e engloba, por exemplo, os algoritmos BL, BT, BLI, Simulated Annealing e GRASP. Os módulos MOEO e PEO servem, respectivamente, para lidar com problemas multi-objetivo e computação paralela/distribuída.

Este trabalho aborda apenas algoritmos no módulo MO e os componentes dos algoritmos são implementados em forma de classes, que serão derivadas de classes abstratas ou outras já implementadas. Por exemplo, existe uma classe para implementação de uma busca local, porém essa classe utiliza alguns componentes que são dependentes do problema e podem necessitar implementação, como a função objetivo, a codificação de uma solução e as estruturas de vizinhos/vizinhança.

Mais detalhes, tutoriais e exemplos são encontrados em Talbi (2009) e ParadisEO (2015a). Na sequência, foram comentados apenas os componentes principais para a implementação dos algoritmos utilizados no trabalho: busca local, busca tabu, busca local iterada e GRASP.

3.6.1 Busca local utilizando ParadisEO

As instruções para implementar uma busca local encontram-se em ParadisEO (2015b) e mostram que seis componentes são necessárias: representação da solução, representação de vizinho, cálculo do valor da função objetivo de uma solução, cálculo do valor da função objetivo de um vizinho, inicialização de uma solução e, finalmente, a vizinhança.

Para a representação de uma solução, será utilizada uma classe já implementada, a classe `eoInt<FitT>`, que representa uma solução do tipo vetor de números inteiros com um tipo de função objetivo `FitT`. O tipo de função parametrizado indicará se o procedimento é de maximização ou minimização, no caso o tipo utilizado em todo o trabalho será `eoMinimizingFitness`, que indicará minimização da função objetivo e também já vem implementado no ParadisEO.

A representação de vizinho será feita por uma classe não implementada no ParadisEO, `moTepNeighbor<EOT,FitT>`, onde `EOT` indica um tipo de representação de solução, no caso `eoInt<FitT>`. Essa classe será derivada da classe abstrata existente `moNeighbor<EOT,FitT>`. Os vizinhos possuem duas informações que os definem: índice e valor. O índice representará um ramo no vetor de inteiros e o valor representa a quantidade de linhas no ramo indicado pelo índice.

O cálculo do valor da função objetivo vem da nova classe `eoTepEvalFunc<EOT>`

que deriva da classe abstrata existente `eoEvalFunc<EOT>`, que possui uma classe auxiliar, `Evaluator`. Essa classe utiliza as bibliotecas do solver proprietário GUROBI, mantém os dados do sistema teste e o tipo de problema a ser resolvido (PERTE ou PERTES). O construtor da classe exigirá o nome do arquivo com as informações do sistema teste, o modificador de fluxo (caso haja contingência no sistema), um modificador de custo para a função objetivo, que representará o custo pelo corte de carga de 1 MW e o tipo de problema a ser resolvido. O modificador de custo é o α que aparece nos modelos da Seção 2.4. Dessa forma, a classe `eoTepEvalFunc<EOT>` fará uso de quatro parâmetros: `fileName`, `flowMod`, `costMod` e `tepType`.

Além disso, precisa-se de uma forma para calcular o valor da função objetivo de um vizinho, que será feito pela classe `moFullEvalByCopy<Neighbor>`, onde `Neighbor` indica uma classe do tipo `moTepNeighbor<EOT,FitT>`. Essa classe irá calcular o valor da função objetivo de um vizinho e já vem implementada no `ParadisEO`. Basicamente ela utilizará `eoTepEvalFunc<EOT>` para fazer o cálculo da função objetivo de um vizinho.

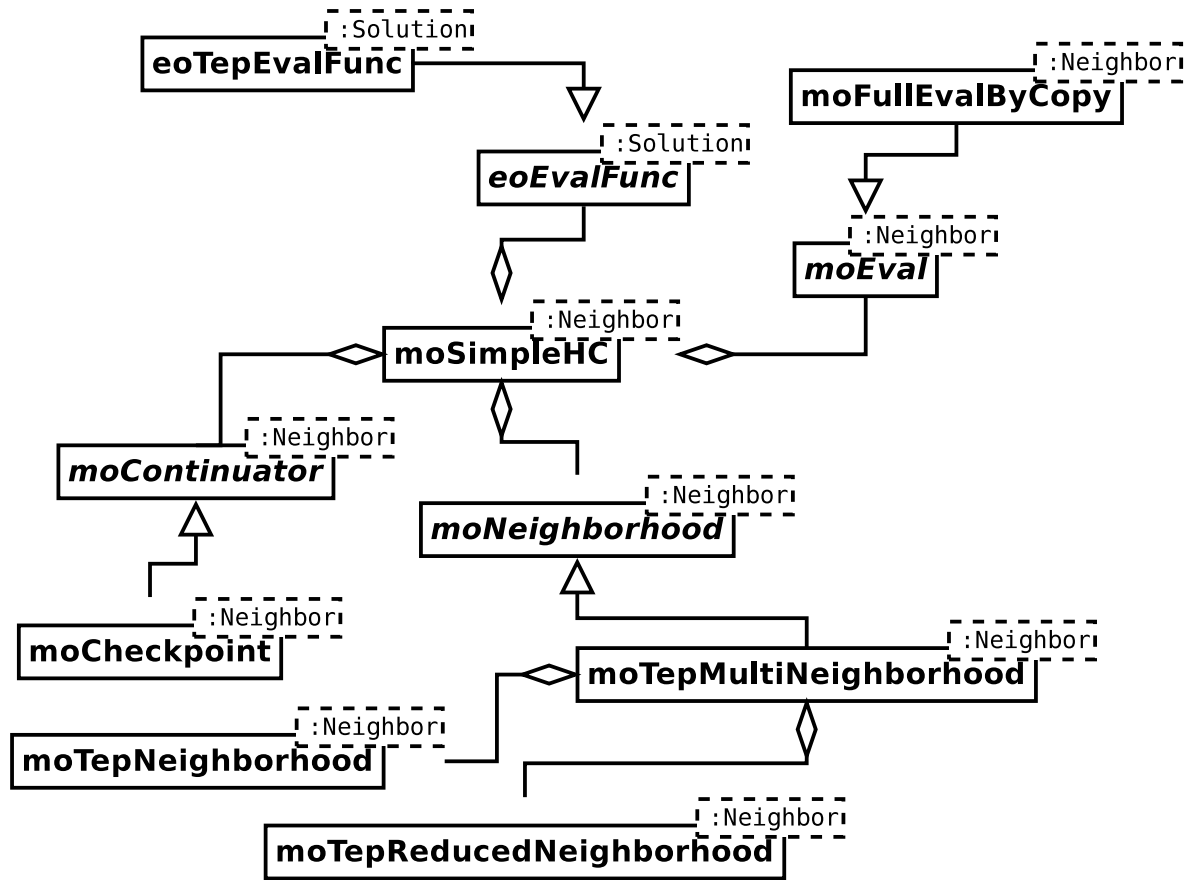
A inicialização de uma solução será feita por alguma classe que deriva da existente e abstrata `eoInit<EOT>`. No caso, será utilizada a classe implementada `eoTepGreedyRandInit<EOT>`, que possui um algoritmo heurístico construtivo do tipo VNS, apresentado na Subseção 3.2.4.1. Essa classe também faz uso das mesmas informações que `eoTepEvalFunc<EOT>`, necessitando dos quatro parâmetros: `fileName`, `flowMod`, `costMod` e `tepType`.

A vizinhança é uma classe derivada da abstrata `moNeighborhood<Neighbor>` e para a busca local, foram implementadas duas classes: `moTepNeighborhood<Neighbor>` e `moTepReducedNeighborhood<Neighbor>`. A classe `moTepNeighborhood<Neighbor>` implementa os conceitos da Subseção 3.2.2, sendo necessário informar a dimensão da vizinhança na construção de um objeto dessa classe. Por outro lado, a classe `moTepReducedNeighborhood<Neighbor>` implementa os conceitos da lista de candidatos, *LC*, na Equação 95. Tendo em vista a possibilidade dessas duas vizinhanças, foi implementada uma terceira vizinhança `moTepMultiNeighborhood<Neighbor>` que age como uma das duas vizinhanças implementadas, dependendo de um parâmetro informado na construção do objeto. O parâmetro definirá o tipo de vizinhança que será utilizada, sendo denotado por `nhType`.

O algoritmo de busca local é um objeto da classe `moSimpleHC<Neighbor>`. Para instanciar esse objeto, utilizou-se o construtor com quatro parâmetros:

- `moTepMultiNeighborhood<Neighbor>;`
- `eoTepEvalFunc<EOT>;`
- `moFullEvalByCopy<Neighbor>;`

Figura 9 – Diagrama UML para Busca Local.



Fonte: O autor.

- `moCheckpoint<Neighbor>`.

Apesar de não ser necessário um critério de parada para a busca local, pois já existe um critério de parada padrão, a classe `moCheckpoint<Neighbor>` ficará em seu lugar, pois além de servir como critério de parada, também serve para salvar estatísticas da execução do programa. O diagrama UML para a classe `moSimpleHC` pode ser visto na Figura 9.

Assim, para executar uma busca local, basta criar um objeto do tipo `eoInt<FitT>` para a solução, iniciá-lo com o objeto do tipo `eoTepGreedyRandInit< eoInt<FitT>>` e passar essa solução iniciada para o operador `()` do objeto do tipo `moSimpleHC<Neighbor>`, que alterará essa solução para o mínimo local encontrado pela busca.

3.6.2 Busca tabu utilizando ParadisEO

A busca tabu também possui instruções básicas de implementação em ParadisEO (2015b) e aproveita vários elementos da busca local. Todos os seis componentes da busca

local são aproveitados na busca tabu: representação da solução, representação de vizinho, cálculo do valor da função objetivo de uma solução, cálculo do valor da função objetivo de um vizinho, inicialização de uma solução e vizinhança. Isso explicita o conceito de reaproveitamento e reforça a importância da reutilização de código.

Além disso, serão necessários mais três componentes: lista tabu, critério de aspiração e critério de parada.

O funcionamento da lista é apresentado na Subseção 3.4.1 e será implementado pela classe `moTepDinamicTabuList<Neighbor>`, que deriva da classe abstrata `moTabuList<Neighbor>`.

O critério de aspiração já vem implementado pelo ParadisEO e pode ser utilizado com a classe `moBestImprAspiration<Neighbor>`. Este critério de aspiração é ativado quando um movimento tabu possui um valor na função objetivo melhor que o valor da função objetivo da incumbente.

Apesar da busca local não precisar da implementação de um critério de parada, ela utilizou a classe `moCheckpoint<Neighbor>` que faz o papel de um critério de parada e também ajuda na obtenção de estatísticas durante a execução do algoritmo. A busca tabu também fará uso da classe `moCheckpoint<Neighbor>` que terá, internamente, um critério de parada por tempo, já implementado pelo ParadisEO: `moTimeContinuator<Neighbor>`. O critério de parada necessita de um parâmetro, indicado por `timeMax`, que marcará o tempo máximo de execução, em segundos.

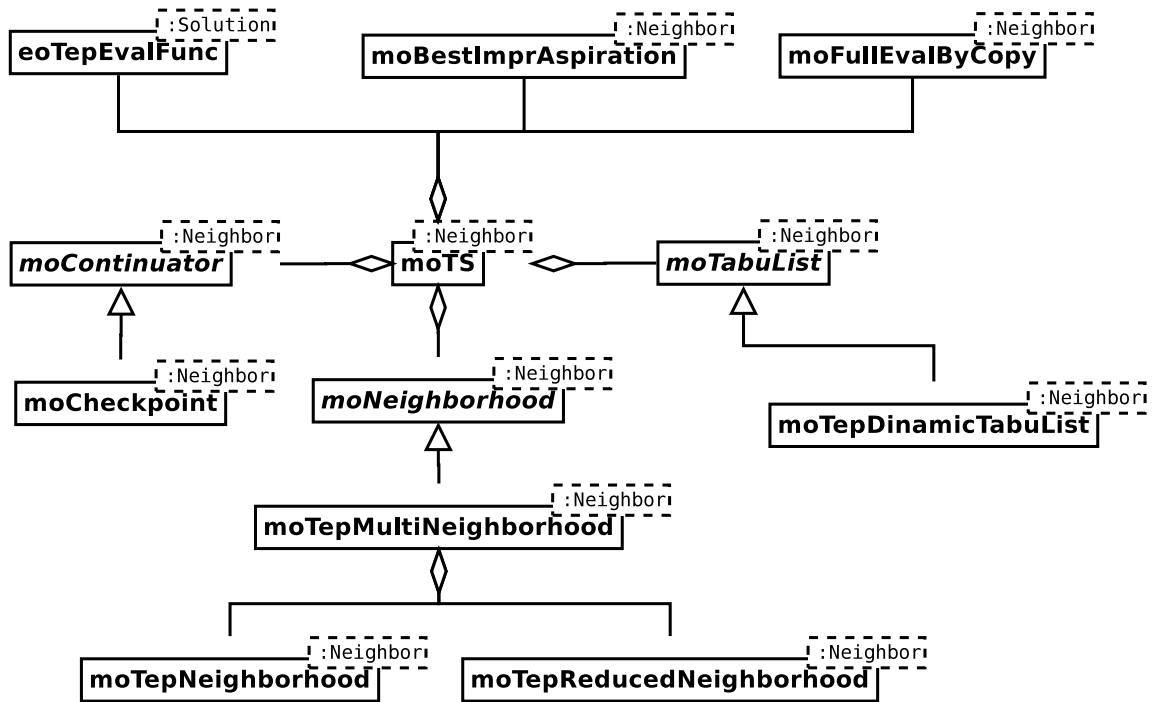
A classe que implementa a busca tabu é `moTS<Neighbor>` e o diagrama UML pode ser visto na Figura 10.

3.6.3 Busca local iterada e GRASP utilizando o ParadisEO

A implementação da BLI utiliza a classe `moILS<Neighbor>` (PARADISEO, 2015b), necessitando de apenas quatro componentes para seu funcionamento: uma busca local (ou meta-heurística de solução única), uma forma de calcular o valor da função objetivo de uma solução, um mecanismo de modificação (perturbação) de uma solução e um critério de parada. Além disso, é necessário inicializar a solução antes de utilizar o algoritmo BLI, assim uma quinta componente será utilizada: inicialização de uma solução. Desses cinco componentes, apenas a forma de perturbar uma solução ainda não foi discutida, o critério de parada para a BLI precisa de um ajuste e o critério de parada da busca local precisará ser modificado.

A perturbação será uma classe derivada da classe abstrata `eoMut<EOT>`, que serve como mutação nos algoritmos populacionais do módulo EO. A classe que implementará a perturbação será `eoTepILSMutation<EOT>` e terá um parâmetro α , indicando a porcentagem máxima de linhas que serão alteradas aleatoriamente, como visto na

Figura 10 – Diagrama UML para Busca Tabu.



Fonte: O autor.

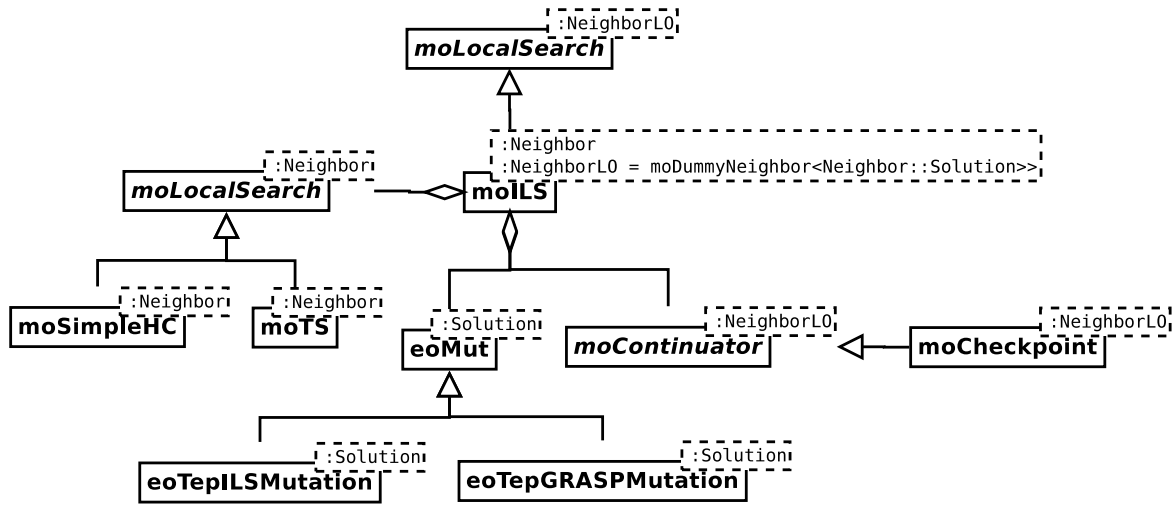
Subseção 3.5.

O critério de parada para a BLI será o tempo máximo de execução, porém não será implementado pela classe `moCheckpoint<Neighbor>`. Ele será implementado na classe `moCheckpoint<moDummyNeighbor<EOT>>`, onde a classe existente `moDummyNeighbor<EOT>` representa uma vizinhança falsa. Essa adequação faz-se necessária, pois os vizinhos serão manipulados pela busca local e não pelo algoritmo BLI, sendo a forma de reaproveitar todo o código de uma busca local para a BLI.

Como o algoritmo BLI terá um tempo para ser executado, pode ocorrer de uma busca local ser iniciada quase no final do tempo de execução do algoritmo BLI. Isso pode comprometer o tempo máximo da BLI, caso a busca local demore muito tempo para finalizar. Dessa forma, um `moTimeContinuator<Neighbor>` será criado para a busca local, mas terá como tempo máximo de execução uma informação externa, obtida do critério de parada `moCheckpoint<moDummyNeighbor<EOT>>` da BLI. Assim, caso o tempo para execução da BLI acabe durante a execução da busca local, ela será interrompida e, na sequência, a BLI também será encerrada.

Finalmente, para a BLI utilizando a busca tabu (substituindo a busca local), o critério de parada será implementado pela classe `moCombinedContinuator<Neighbor>` que combina vários critérios de parada, pois além de utilizar a informação externa de

Figura 11 – Diagrama UML para busca local iterada e GRASP.



Fonte: O autor.

tempo, também precisará de uma informação para finalizar cada chamada da busca tabu, pois diferente da busca local, a busca tabu não possui uma forma natural para ser interrompida. O critério escolhido para isso foi a não melhoria da incumbente por um determinado número de iterações, que será um parâmetro para o algoritmo.

Isso conclui a implementação da BLI e permite a implementação do GRASP de uma forma bastante fácil, bastando alterar a forma de perturbar uma solução, que na verdade, será uma reconstrução da solução. Para o GRASP, a reconstrução de uma solução será feita pela classe `eoTepGRASPMutation<EOT>`, que também deriva da classe `eoMut<EOT>`. Ela agregará um objeto do tipo `eoTepGreedyRandInit<EOT>`, visto na Subseção 3.6.1, que será utilizado para gerar uma nova solução gulosa-aleatória a cada iteração do GRASP. Os demais detalhes serão idênticos aos implementados na BLI.

Na Figura 11 ilustra-se o diagrama UML da classe para a classe `moILS<Neighbor>`.

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O capítulo aborda as componentes necessárias para implementação de três meta-heurísticas aplicadas ao PERT. A implementação utilizou o *framework* ParadisEO para reaproveitamento de código.

Na Seção 3.6 observa-se que muito do trabalho realizado na criação da BL foi reaproveitado na BT e após a implementação da BLI, praticamente obteve-se o GRASP.

Além disso, apresentam-se duas contribuições inéditas para o PERT. Primeiramente, um AHC para geração de soluções iniciais gulosas para o PERTES, que é uma

generalização do conhecido AHC VGS para PERTE e, finalmente, a lista de candidatos implementada na estrutura de vizinhança, que serve para reduzir a quantidade de vizinhos e permitir buscas mais eficientes.

4 TESTES E RESULTADOS

4.1 O PROBLEMA PERTE

Nesta seção são apresentados os resultados dos experimentos utilizando os cinco algoritmos implementados, testados para o problema PERTE. Busca-se mostrar a viabilidade de implementar os algoritmos com o *framework* ParadisEO, para então utilizar o mais promissor no caso PERTES. As siglas de cada um dos algoritmos estão disponíveis no Quadro 2.

Foram utilizados 42 sistemas teste, derivados de 6 grupos: Garver 6 barras, IEEE 24 barras, Sul Brasileiro 46 barras, Sudeste Brasileiro 79 barras, Nordeste Brasileiro 87 barras e Colombiano 93 barras. Os detalhes e características dos sistemas teste encontram-se no Apêndice A.

A programação foi feita em C++, juntamente com as bibliotecas e códigos do ParadisEO e a biblioteca para C++ do *solver* GUROBI 6.0.0 (linux64). O código está disponível em <http://tep.robinson.mat.br/src.tar.gz>. O treinamento dos algoritmos e ajuste de parâmetros utilizaram o *software* ParamILS. Os testes computacionais foram executados em um computador Dell Inspiron com 8 GB de memória, um processador Intel Core i5-3210M e sistema operacional GNU-Linux UBUNTU 14.04 LTS 64bits.

Quadro 2 – Algoritmos implementados.

Nome do algoritmo	Sigla
Busca tabu	BT
GRASP com busca local	graspBL
GRASP com busca tabu	graspBT
Busca Local Iterada com BL	bliBL
Busca Local Iterada com BT	bliBT

Fonte: O autor.

Na sequência exibe-se uma explicação sobre o procedimento de ajuste de parâmetros e sua importância. Para finalizar o capítulo, os ajustes, testes e resultados dos algoritmos para o PERTE e PERTES são apresentados.

4.1.1 Ajuste de parâmetros, treinamento, teste e resultados para o PERTE

Os parâmetros de uma meta-heurística influenciam significativamente a eficiência do método de busca e não há uma forma óbvia de definir os valores de um conjunto de parâmetros (TALBI, 2009).

O principal objetivo do ajuste de parâmetros é encontrar uma configuração de parâmetros que obtenha bons resultados do algoritmo, independentemente do sistema teste utilizado. Isso serve para assegurar a usabilidade do algoritmo fora dos laboratórios computacionais, sem a necessidade de mais ajustes.

O ajuste dos parâmetros será feito *offline*, utilizando o software ParamILS 2.3 (HUTTER et al., 2009), e o procedimento utilizado para cada uma das cinco meta-heurísticas foi o seguinte:

- a) Escolha dos sistemas teste para realização do treinamento;
- b) Determinar as possibilidades de valores para cada um dos parâmetros da meta-heurística;
- c) Escolher o tempo de execução da meta-heurística;
- d) Configurar o software ParamILS;
 - Determinar como será mensurada a qualidade de uma configuração de parâmetros;
 - Determinar o tempo de execução do ParamILS;
 - Determinar a quantidade de repetições para cada um dos sistemas treino.
- e) Executar o treinamento com o ParamILS para escolher a melhor configuração de parâmetros;
- f) Executar testes para obter informações.

4.1.1.1 Preparativos para o treinamento

Para decidir o tempo de execução dos algoritmos para cada um dos grupos de sistemas teste, observou-se o tempo que a busca local levou para executar dez repetições em cada sistema teste, utilizando soluções iniciais geradas pelo AHC VGS, variando o parâmetro de aleatoriedade entre 0 (totalmente guloso) e 0,9 (praticamente aleatório). A média do tempo de execução da busca local para cada um dos grupos de instâncias encontram-se na Tabela 1. Também são informados o pior e melhor tempo. A última coluna faz referência ao tempo que as meta-heurísticas terão para execução durante o treinamento. O tempo foi determinado em aproximadamente dez vezes o tempo médio utilizado pela busca local, a não ser os sistemas do grupo Garver 6 barras, onde o tempo mínimo de um segundo foi utilizado.

Além disso, foram escolhidos seis (aproximadamente 15%) dos 42 sistemas teste para o treinamento, em de cada um dos 6 grupos: 06-15-WRNN-01, 24-41-NRWN-04, 46-79-NRWN-01, 79-143-NRWN-01, 87-183-NRWN-01 e 93-155-NRWN-02. Esses sistemas teste serão chamados de sistemas treino e foram escolhidos entre os sistemas com soluções conhecidas (veja Tabela 2) e, havendo mais de uma possibilidade, aleatoriamente.

Os possíveis valores para cada um dos parâmetros encontram-se no Quadro 3 e, no Quadro 4, exibe-se quais parâmetros são utilizados por meta-heurística e o total de configurações possíveis para os parâmetros. Finalmente, no Quadro 5, descreve-se cada um dos parâmetros.

Tabela 1 – Tempo médio, melhor tempo e pior tempo de execução da busca local.

Grupo de sistemas	Tempo médio (s)	Melhor tempo (s)	Pior tempo (s)	Tempo para meta-heurísticas (s)
Garver 6 barras	0,006	0,004	0,014	1
IEEE 24 barras	0,517	0,134	1,362	5
Sul brasileiro 46 barras	0,972	0,394	1,705	10
Sudeste brasileiro 79 barras	7,388	1,525	31,999	74
Nordeste brasileiro 87 barras	7,624	1,922	23,834	76
Colombiano 93 barras	5,611	1,639	23,895	56

Fonte: O autor.

Quadro 3 – Valores possíveis para os parâmetros.

Parâmetro	Valores	Possibilidades
nhType	0 - 1	2
nhSize	1 - 2 - 3 - 4	4
nhAlpha	0,0 - 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8 - 0,9 - 1	11
initAlpha	0,0 - 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8 - 0,9 - 1	11
tenureMin	0,025 - 0,05 - 0,075 - 0,1 - 0,15 - 0,2 - 0,25 - 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6	11
tenureRange	0,0 - 0,025 - 0,05 - 0,1 - 0,15 - 0,2 - 0,25 - 0,3	8
tsIterMaxNoChange	10 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50	7
perturbRate	0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8 - 0,9	9

Fonte: O autor.

Tabela 2 – Valores de referência para os sistemas treino: PERTE.

Sistema teste	Valor utilizado como referência ($10^3 \times \text{US\$}$)	Fonte
06-15-WRNN-01	190	(ROMERO et al., 2002)
24-41-NRWN-04	342.000	(RESENDE, 2014)
46-79-NRWN-01	154.420	(ROMERO et al., 2002)
79-143-NRWN-01	382.920	(MENDONÇA, 2012)
87-183-NRWN-01	1.356.272	(ROMERO et al., 2002)
93-155-NRWN-02	443.494	(RESENDE, 2014)

Fonte: O autor.

Nota: Os valores estão em $\text{US\$} \times 10^3$.

Quadro 4 – Parâmetros utilizados em cada algoritmo.

Algoritmo	Parâmetros utilizados	Total de configurações
BT	nhType, nhSize, nhAlpha, initAlpha, tenureMin, tenureRange	85.184
graspBL	nhType, nhSize, nhAlpha, initAlpha	968
graspBT	nhType, nhSize, nhAlpha, initAlpha, tenureMin, tenureRange, tsIterMaxNoChange	596.288
bliBL	nhType, nhSize, nhAlpha, initAlpha, perturbRate	8.712
bliBT	nhType, nhSize, nhAlpha, initAlpha, tenureMin, tenureRange, tsIterMaxNoChange, perturbRate	5.366.592

Fonte: O autor.

4.1.1.2 Definições e configurações para o ParamILS

Para entender o funcionamento do ParamILS, alguns símbolos são definidos: sejam A o algoritmo em treinamento, θ uma configuração de parâmetros para A , St o conjunto de sistemas treino, Sd o conjunto com as sementes para números aleatórios e $A'(\theta, st, sd)$ o valor do plano de expansão resultante do algoritmo A utilizando a configuração θ , o sistema treino st e a semente sd . Utilizando C' para denotar a função objetivo a ser otimizada pelo ParamILS, simplificando o exposto por Hutter et al. (2009), tem-se:

$$C'(\theta) = \frac{\sum_{st \in St} \sum_{sd \in Sd} A'(\theta, st, sd)}{|St||Sd|}. \quad (96)$$

Quadro 5 – Descrição dos parâmetros.

Parâmetro	Descrição
nhType	Tipo de vizinhança, pode ser reduzida (utilizando a lista de candidatos) ou a completa.
nhSize	Dimensão da vizinhança. O valor indicado em nhSize indica a variação máxima de uma posição no vetor solução, por exemplo, se nhSize = 3, a variação em um posição pode ser de 1, -1, 2, -2, 3 ou -3.
nhAlpha	Quantidade de ramos congestionados que serão considerados na vizinhança reduzida.
initAlpha	Indica o fator aleatório inserido no AHC VGS para geração da solução inicial, onde $0 \leq \text{initAlpha} \leq 1$.
tenureMin	O tempo mínimo para duração tabu é dado por $\text{tenureMin} \times L $, onde $ L $ indica o total de ramos.
tenureRange	O tempo máximo para duração tabu é dado por $(\text{tenureMin} + \text{tenureRange}) \times L $.
tsIterMaxNoChange	Tempo máximo de iterações sem repetições para a busca tabu da bliBT e graspBT ser interrompida.
perturbRate	Taxa de perturbação para a bli.

Fonte: O autor.

Tendo em vista a Equação 96 e a variação do valor da construção dos planos de expansão nos sistemas teste, será interessante mudar a forma de mensurar a qualidade de uma configuração θ . Por exemplo, as soluções nos sistemas do tipo Garver 6 barras possuem custos de construção variado em valores menores que $\text{US\$}1.000 \times 10^3$, enquanto outros sistemas teste possuem as melhores soluções com valores acima de $\text{US\$}1.000.000 \times 10^3$.

Na Tabela 2 exibe-se valores de referência para cada um dos sistemas teste, que servirão para transformar valores absolutos em valores relativos, comparados com os respectivos valores de referência. Sendo VR_{st} o valor de referência para o sistema treino st , os algoritmos irão retornar os valores $A''(\theta, st, sd)$, onde

$$A''(\theta, st, sd) = \frac{A'(\theta, st, sd)}{VR_{st}}. \quad (97)$$

Deste modo, a qualidade de uma configuração para uso no ParamILS será dada por $C(\theta)$, com

$$C(\theta) = \frac{\sum_{st \in St} \sum_{sd \in Sd} A''(\theta, st, sd)}{|St||Sd|}. \quad (98)$$

4.1.1.3 Treinamento e testes

Sabendo como será o funcionamento do software ParamILS, que seis sistemas treino foram escolhidos e que as possíveis configurações já foram dadas (Quadro 3), falta definir a dimensão do conjunto de sementes e o critério de parada do software ParamILS.

Para o conjunto de sementes Sd , escolheu-se a dimensão três, ou seja, serão realizadas três repetições para cada um dos sistemas treino para determinar a qualidade de θ , totalizando dezoito repetições para cada θ .

Além disso, as melhores configurações foram apresentadas no Quadro 6. Para obter essas configurações de parâmetros, o software ParamILS teve como critério de parada 500 execuções do algoritmo em treinamento, levando entre 4 e 6 horas por treinamento.

Quadro 6 – Melhores parâmetros encontrados.

Algoritmo	Melhor configuração de parâmetros
BT	nhType=1, nhSize=1, nhAlpha=0,5, initAlpha=0,6, tenureMin=0,05, tenureRange=0,3
graspBL	nhType=1, nhSize=2, nhAlpha=0,1, initAlpha=0,8
graspBT	nhType=1, nhSize=2, nhAlpha=0,2, initAlpha=0,8, tenureMin=0,5, tenureRange=0,0, tsIterMaxNoChange=40
bliBL	nhType=1, nhSize=2, nhAlpha=0,1, initAlpha=0,8, perturbRate=0,2
bliBT	nhType=1, nhSize=1, nhAlpha=0,6, initAlpha=0,5, tenureMin=0,025, tenureRange=0,0, tsIterMaxNoChange=30, perturbRate=0,9

Fonte: O autor.

Após a conclusão dos treinamentos, foram realizados dois testes com o objetivo de escolher o melhor algoritmo para se utilizar no caso PERTES.

No primeiro teste todos os 42 sistemas foram utilizados, incluindo os sistemas do treinamento. Além disso, foram considerados quatro custos para o corte de carga de 1 MW: US\$ 1.000.000,00, US\$ 2.000.000,00, US\$ 4.000.000,00 e US\$ 10.000.000,00. Para os algoritmos bliBT e graspBT, o custo de US\$ 10.000.000,00 para o corte de carga de 1 MW foi substituído por US\$ 25.000.000,00 para encontrar soluções factíveis no sistema 24-41-NRWN-04.

Neste teste, a execução de cada algoritmo foi repetida cinco vezes por sistema teste e esse procedimento foi repetido para cada um dos quatro custos de corte de carga. Dessa forma, cada algoritmo foi executado $5 \times 42 \times 4 = 840$ vezes durante os testes, num total de 4.200 execuções para os cinco algoritmos. Estima-se mais de 46 horas de computação

para os testes.

O objetivo do primeiro teste, foi encontrar os algoritmos mais promissores. Para isso foram escolhidos três critérios: quantidades de vezes que o algoritmos obteve o melhor resultado entre os cinco, quantidade de vezes que o algoritmo obteve o melhor resultado sozinho entre os cinco e, finalmente, a somatória das pontuações anteriores.

Tabela 3 – Pontuação dos algoritmos para o PERTE no primeiro teste

Algoritmo	Número de vezes que obteve o melhor resultado	Número de vezes que somente o algoritmo obteve o melhor resultado	Pontuação Final
BT	22	6	28
graspBL	17	7	24
graspBT	19	7	26
bliBL	10	1	11
bliBT	16	4	20

Fonte: O autor.

Com base na pontuação final, os algoritmos BT, graspBL e graspBT foram escolhidos para realização do segundo teste. Esse novo teste será a execução de cada um dos algoritmos em um intervalo de tempo maior, buscando encontrar os melhores valores conhecidos.

Dos 42 sistemas teste, os 19 possuindo melhores valores conhecidos foram utilizados e os melhores valores para alvo são encontrados na Tabela 4. Cada algoritmo executou o sistema teste por uma hora e o tempo que levou para atingir o valor alvo também estão disponíveis na Tabela 4.

Além disso, a Tabela 5 mostra, em **negrito**, qual algoritmo obteve o melhor resultado no segundo teste e também a quantidade total de sistemas teste que o algoritmo atingiu o melhor valor. Ressalta-se que nem sempre o melhor valor obtido pelos algoritmos foi igual ao melhor resultado conhecido.

Com as informações do primeiro e segundo testes, o algoritmo de busca tabu (BT) foi escolhido para os testes com o PERTES, vistos na próxima seção.

Observa-se que a qualidade das soluções, para as instância com 46, 79, 87 e 93 barras, na Tabela 5 não conseguiram alcançar a qualidade das melhores soluções conhecidas. Isso se deve principalmente a dois fatores: ajuste de parâmetros e estrutura de vizinhança. Um ajuste de parâmetros mais geral, como foi realizado, permite que as meta-heurísticas consigam resultados razoáveis em instâncias de qualquer porte, porém isso comprometerá a qualidade em sistemas específicos. Um ajuste de parâmetros individualizado pode obter

Tabela 4 – Tempo até o alvo para cada algoritmos no segundo teste no PERTE.

Sistema teste	BT (s)	graspBL (s)	graspBT (s)	Valor alvo (US\$ $\times 10^3$)
06-15-NRNN-01	1,715	0,049	10,25	291 (ROMERO et al., 2002)
06-15-NRWN-01	0,231	0,005	7,005	200 (ROMERO et al., 2002)
06-15-WRNN-01	0,084	0,007	28,518	190 (ROMERO et al., 2002)
06-15-WRWN-01	0,818	0,04	0,462	110 (ROMERO et al., 2002)
24-41-NRWN-01	0,086	0,115	0,094	390.000 (RESENDE, 2014)
24-41-NRWN-02	1,952	-	57,871	392.000 (RESENDE, 2014)
24-41-NRWN-03	436,386	0,186	269,571	218.000 (RESENDE, 2014)
24-41-NRWN-04	0,372	-	-	342.000 (RESENDE, 2014)
24-41-WRWN-01	51,637	0,012	235,61	152.000 (RESENDE, 2014)
46-79-NRWN-01	-	-	-	154.420 (ROMERO et al., 2002)
46-79-WRNN-01	-	-	-	402.748 (ROMERO et al., 2002)
46-79-WRWN-01	-	-	-	70.289 (SOUSA, 2009)
79-143-NRWN-01	-	-	-	382.920 (MENDONÇA, 2012)
87-183-NRWN-01	-	-	-	1.356.272 (ROMERO et al., 2002)
87-183-NRWN-02	-	-	-	2.474.750 (ROMERO et al., 2002)
87-183-WRWN-01	-	-	-	737.147 (ROMERO et al., 2002)
93-155-NRWN-01	-	-	-	296.454 (RESENDE, 2014)
93-155-NRWN-02	-	0,085	3,006	443.494 (RESENDE, 2014)
93-155-NRWN-03	-	-	-	563.399 (RESENDE, 2014)
Total de sucessos	9	8	9	-

Fonte: O autor.

melhores resultados. Como o foco do trabalho foi as meta-heurísticas e não os sistemas testes, escolheu-se o ajuste mais geral, pois a quantidade de sistemas testes impossibilita um ajuste individualizado.

Outro ponto importante é a estrutura de vizinhança, pois sabe-se que ela é um fator fundamental nas buscas e somente uma classe de estrutura, que altera uma coordenada por vez, foi aplicada. Talvez utilizar estruturas diferentes, como as que alteram mais de uma posição do vetor de solução por vez, possam melhorar os resultados. Novamente, o tempo foi o fator limitante para utilização apenas da estrutura mais convencional.

Tabela 5 – Melhores resultados dos algoritmos no segundo teste para o PERTE.

Sistema teste	BT (US\$×10 ³)	graspBL (US\$×10 ³)	graspBT (US\$×10 ³)	Valor alvo (US\$×10 ³)
06-15-NRNN-01	291	291	291	291 (ROMERO et al., 2002)
06-15-NRWN-01	200	200	200	200 (ROMERO et al., 2002)
06-15-WRNN-01	190	190	190	190 (ROMERO et al., 2002)
06-15-WRWN-01	110	110	110	110 (ROMERO et al., 2002)
24-41-NRWN-01	390.000	390.000	390.000	390.000 (RESENDE, 2014)
24-41-NRWN-02	392.000	440.000 (+12,24%)	392.000	392.000 (RESENDE, 2014)
24-41-NRWN-03	218.000	218.000	218.000	218.000 (RESENDE, 2014)
24-41-NRWN-04	342.000	376.000 (+9,94%)	354.000 (+3,51%)	342.000 (RESENDE, 2014)
24-41-WRWN-01	152.000	152.000	152.000	152.000 (RESENDE, 2014)
46-79-NRWN-01	163.171 (+5,67%)	163.769 (+6,05%)	163.171 (+5,67%)	154.420 (ROMERO et al., 2002)
46-79-WRNN-01	439.138 (+9,04%)	414.042 (+2,80%)	423.132 (+5,06%)	402.748 (ROMERO et al., 2002)
46-79-WRWN-01	74.733 (+6,32%)	74.733 (+6,32%)	90.748 (+29,11%)	70.289 (SOUSA, 2009)
79-143-NRWN-01	469.300 (+22,56%)	454.100 (+18,59%)	470.500 (+22,87%)	382.920 (MENDONÇA, 2012)
87-183-NRWN-01	1.738.877 (+28,21%)	1.511.668 (+11,46%)	1.582.100 (+16,65%)	1.356.272 (ROMERO et al., 2002)
87-183-NRWN-02	2.882.232 (+16,47%)	2.752.782 (+11,23%)	2.829.582 (+14,34%)	2.474.750 (ROMERO et al., 2002)
87-183-WRWN-01	757.968 (+2,82%)	786.936 (+6,75%)	824.986 (+11,92%)	737.147 (ROMERO et al., 2002)
93-155-NRWN-01	322.950 (+8,94%)	316.440 (+6,74%)	296.852 (+0,13%)	296.454 (RESENDE, 2014)
93-155-NRWN-02	483.808 (+9,09%)	443.494	443.494	443.494 (RESENDE, 2014)
93-155-NRWN-03	571.632 (+1,46%)	616.44 (+9,41%)	577.934 (+2,58%)	563.399 (RESENDE, 2014)
Melhor desempenho	13 vezes	13 vezes	11 vezes	-

Fonte: O autor.

4.2 O PROBLEMA PERTES

Esta seção apresenta os resultados obtidos com o PERTES, utilizando o algoritmo BT, escolhido por mostrar ligeira vantagem nos testes da Seção 4.1.

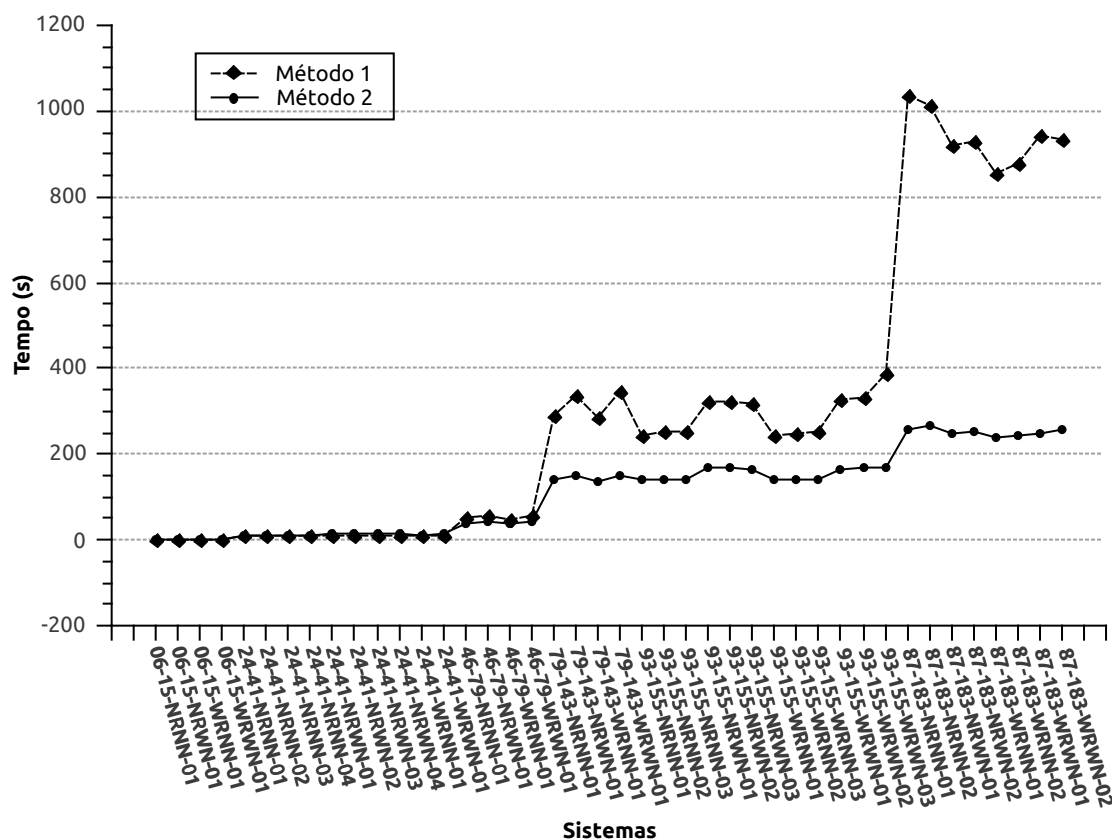
O treinamento e o teste para o PERTES não foram realizados da mesma forma que no PERTE, pois o tempo consumido no cálculo da função objetivo inviabilizou a mesma metodologia. Nada garante que a BT seja também superior para o problema PERTES, se os mesmos testes forem executados.

Antes de iniciar o treinamento da BT para o caso PERTES, uma discussão sobre a forma de calcular a qualidade de uma solução é realizada. O objetivo é escolher a forma mais rápida para o cálculo.

4.2.1 Testes iniciais da função objetivo para o PERTES

Como apresentado no Capítulo 2, pode-se calcular a qualidade de uma solução para o PERTES de duas formas: utilizando o modelo completo (adaptado para uso em

Figura 12 – Tempo gasto em 200 execuções para cada métodos de cálculo da função objetivo no PERTES.



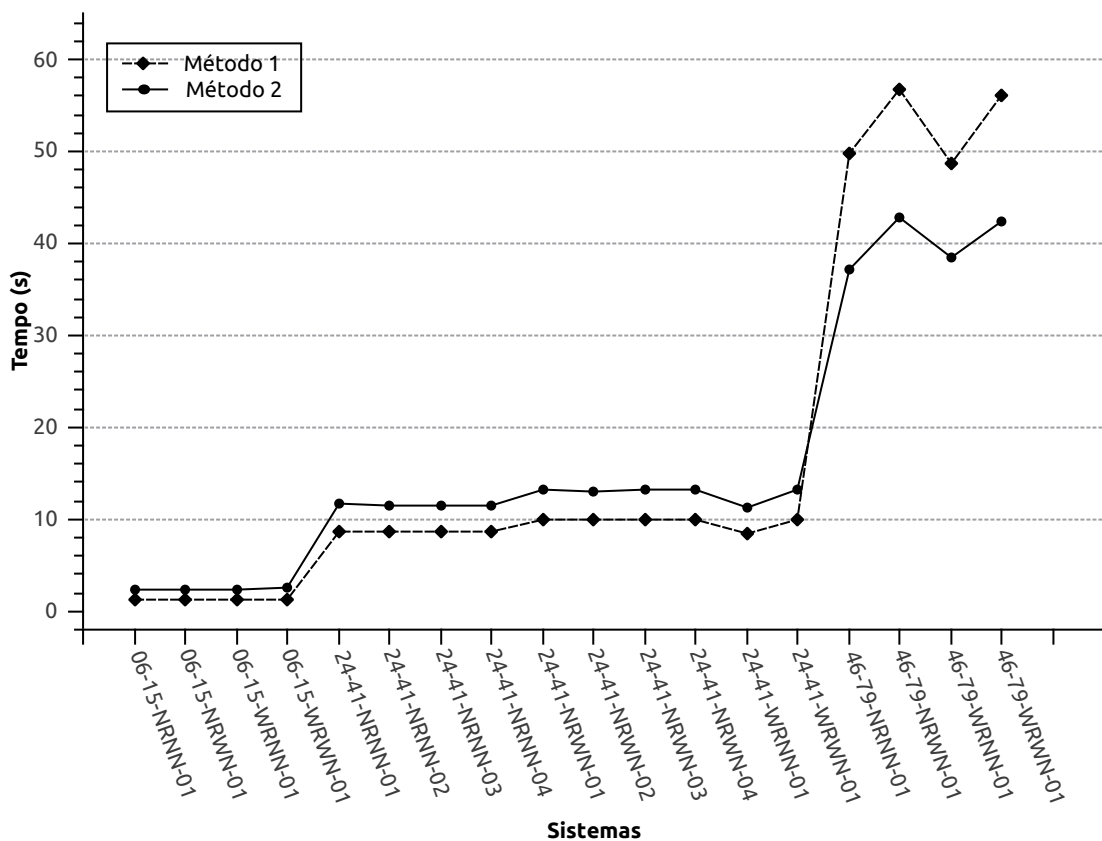
meta-heurísticas) ou utilizando várias vezes o modelo do PERTE. Esses métodos são nomeados para facilitar a discussão:

- Método 1: utiliza apenas o modelo completo e pode ser visto nas Equações 41 a 51.
- Método 2: emprega o modelo dado nas Equações 52 a 59, juntamente com a Equação 60. Neste método, o processo é repetido com uma solução para o PERTE, modificando essa solução de entrada, removendo uma linha em cada ramo, quando possível, para efetuar o cálculo.

Cada método foi executado 200 vezes em cada um dos 42 sistemas teste, num total de 8.400 execuções (os métodos utilizaram as mesmas soluções para efetuar todos os cálculos). Os resultados do tempo gasto em cada sistema teste pode ser visto na Figura 12 e observa-se que o método 2 foi mais eficiente para os sistemas teste de 79, 87 e 93 barras.

Na Figura 13, observa-se comportamento diferente, onde o método 1 é mais rápido nos sistemas de 6 e 24 barras, porém o método 2 continua mais eficiente nos sistemas de 46 barras.

Figura 13 – Tempo gasto em 200 execuções para cada métodos de cálculo da função objetivo no PERTES: sistemas de 6, 24 e 46 barras.



Como o método 1 só foi eficiente nos sistemas teste de pequeno porte, onde o tempo necessário foi bastante reduzido, o método 2 foi escolhido para calcular a qualidade de uma solução para o PERTES neste trabalho.

4.2.2 Treinamento do algoritmo BT para o PERTES

Observando os resultados dos treinamentos para o PERTE, o parâmetro nhType, que controla o tipo de vizinhança, foi fixado para utilizar sempre a vizinhança utilizando a lista de candidatos. Além disso, alguns valores disponíveis para os parâmetros, indicados no Quadro 3, foram removidos e restaram as possibilidades exibidas no Quadro 7. Essas alterações diminuíam de 85.184 (configurações disponível para a BT no caso PERTES) para 12.936 configurações de parâmetros possíveis no caso PERTES.

Quadro 7 – Valores possíveis para os parâmetros no treinamento do algoritmo BT para PERTES.

Parâmetro	Tipo	Valores	Possibilidades
nhSize	inteiro	1 - 2 - 3	3
nhAlpha	ponto flutuante	0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8	7
initAlpha	ponto flutuante	0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8 - 0,9	7
tenureMin	ponto flutuante	0,025 - 0,05 - 0,075 - 0,1 - 0,15 - 0,2 0,25 - 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6	11
tenureRange	ponto flutuante	0,0 - 0,025 - 0,05 - 0,1 - 0,15 - 0,2 0,25 - 0,3	8

Fonte: O autor.

Como o tempo para calcular a qualidade de uma solução aumentou, o treinamento do PERTES considerou apenas três sistemas: 06-15-WRNN-01, 24-41-NRWN-04 e 46-79-NRWN-01. Cada um deles teve um valor no modificador de custo para o corte de carga de 1 MW diferente. Para o sistema 06-15-WRNN-01, o modificador de custo foi US\$ 1.000.000,00 e o tempo máximo para execução do algoritmo foi 10 segundos. No sistemas 24-41-NRWN-04 o modificador foi de US\$ 25.000.000,00 e tempo máximo de 90 segundos. Finalmente o sistema 46-79-NRWN-01 teve um modificador de US\$ 10.000.000,00 e um tempo máximo de execução de 90 segundos.

Cada sistema foi executado três vezes para determinar a qualidade de uma configuração e o encerramento do treinamento ocorreu após 500 execuções do algoritmo BT pelo *software* ParamILS. A configuração de parâmetros obtida durante o treinamento foi nhSize=1 , nhAlpha=0,5 , initAlpha=0,3 , tenureMin=0,2 e tenureRange=0,25.

4.2.3 Testes do algoritmo BT para o PERTES

Após o treinamento, o algoritmo BT foi executado três vezes para cada sistema teste e as melhores soluções, juntamente com o valor do plano de expansão encontram-se na Tabela 9 do Apêndice A. Cada execução utilizou um valor para o custo do corte de carga de 1 MW, a saber, US\$ 1.000.000,00, US\$ 10.000.000,00 e US\$ 25.000.000,00. Além disso, o tempo de execução dos sistemas teste de cada um dos grupos está disponível na Tabela 6.

Assim como ocorreu no caso do problema PERTE, o ajuste de parâmetros foi geral e ajustes individualizado certamente melhorariam a qualidade das soluções encontradas.

Tabela 6 – Tempo de execução da busca tabu por grupo de sistemas teste para o PERTES

Grupo de sistemas	Tempo para BT (segundos)
Garver 6 barras	10
IEEE 24 barras	100
Sul brasileiro 46 barras	200
Sudeste brasileiro 79 barras	1600
Nordeste brasileiro 87 barras	1600
Colombiano 93 barras	1200

Fonte: O autor.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Na primeira parte do capítulo, os resultados dos testes dos algoritmos para o PERTE são exibidos. O principal objetivo foi escolher apenas um algoritmo para proceder com os testes para o PERTES, que é um problema mais complexo e consome mais tempo para execução.

Após o primeiro teste para o PERTE, os algoritmos BT, graspBL e graspBT foram escolhidos pois tiveram maior destaque obtendo os melhores resultados e maior pontuação, se considerar o desempenho geral dos algoritmos na Tabela 3.

O segundo teste não evidenciou um melhor algoritmo, dessa forma a escolha da BT para a realização dos testes com PERTES deve-se aos melhores resultados da BT no primeiro teste.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Pode-se apontar cinco principais contribuições do trabalho: uso do *framework* ParadisEO para implementar as meta-heurísticas, uso do programa ParamILS para automatizar o ajuste de parâmetros, um algoritmo heurístico construtivo para o problema PERTES, a lista de candidatos utilizada na estrutura de vizinhança e a criação de um banco de dados com informações de sistemas teste e respectivas soluções.

Durante a realização deste trabalho, não foram encontradas referências utilizando o *framework* ParadisEO para resolver o problema PERT. O trabalho não pretendeu tornar-se um tutorial para seu uso, pois o tempo disponível não possibilitaria essa tarefa. Desejou-se exibir seu uso e oportunizar novos trabalhos utilizando esse tipo de ferramenta.

Além disso, o programa ParamILS é baseado em uma meta-heurística de busca local iterada e, desta forma, não garante a melhor configuração de parâmetros. Porém, como toda meta-heurística, é capaz de fazer um ajuste satisfatório em um tempo razoável. O trabalho apresentou um ajuste de parâmetros geral, permitindo que as meta-heurísticas implementadas possam obter resultados razoáveis independente das dimensões do problema. Esse tipo de ajuste de parâmetros não é comum em trabalhos para o problema PERT, que normalmente utiliza ajustes individualizados para cada sistema teste (estudo de caso), visando o sistema teste e a melhoria de sua solução. Como o foco principal foram as meta-heurísticas, o ajuste de parâmetros foi generalista e não individuaziado (com relação aos sistemas testes).

Com isso, acredita-se que o objetivo de apresentar uma nova perspectiva no uso de meta-heurísticas para o PERT foi atingido.

O algoritmo VGS generalizado para o problema PERTES permite a construção de soluções factíveis em um procedimento guloso. Esse procedimento pode ser alterado com um fator aleatório, fornecendo uma ferramenta importante para o uso em meta-heurísticas como o GRASP e busca local iterada.

A lista de candidatos reduz a quantidade de vizinhos observados, proporcionando melhores desempenhos nas meta-heurísticas. Após os ajustes de parâmetros para o problema PERTE evidenciou-se essa melhoria, pois o parâmetro `nhtype`, que define o tipo de vizinhança, sempre indicou a vizinhança reduzida.

A versão inicial do banco de dados conta com os dados e soluções dos 42 sistemas teste utilizados neste trabalho (para PERTE e PERTES) e está disponível no endereço eletrônico <http://tep.robinson.mat.br>. Os dados estão em arquivos de texto sem forma-

tação, facilitando a implementação de algoritmos para sua leitura. Os sistemas teste são disponibilizados em arquivos individuais (contendo apenas um sistema teste), arquivos dos grupos (contendo os dados de cada um dos 6 principais grupos) e um arquivo com todos os sistemas testes.

Essa ferramenta deve facilitar o uso dos sistemas testes e contribuições, por parte da comunidade científica, são esperadas para aprimorar a ferramenta.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Acredita-se que os principais tópicos para trabalhos futuros sejam:

- a) Aprimoramento no uso e desenvolvimento do framework ParadisEO, incluindo utilização de outros módulos e desenvolvimento de componentes para algoritmos já implementados.
- b) Estudos mais aprofundados sobre o uso do ParamILS, especialmente na criação de programas híbridos, possibilitando ajustes dinâmicos em tempo de execução, criando meta-heurísticas capazes de resolver sistemas desconhecidos, sem a necessidade de diminuir a qualidade da solução.
- c) Melhorias no banco de dados, criando uma interface automatizada para permitir a inserção de novos sistemas testes, variações de modelos e novas soluções. Essa nova interface permitirá que outros pesquisadores participem no aprimoramento da informação disponível.

REFERÊNCIAS

- ESCOBAR, A. **Planeamiento dinámico de la expansión de sistemas de transmisión usando algoritmos combinatoriales**. 2002. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidad Tecnológica de Pereira, 2002.
- GARVER, L. Transmission network estimation using linear programming. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, New York, PAS-89, n. 7, p. 1688–1697, 1970.
- GLOVER, F. W.; LAGUNA, M. **Tabu search**. Boston: Kluwer Acad., 1997.
- HEMMATI, R.; HOOSMAND, R.-A.; KHODABAKHSHIAN, A. State-of-the-art of transmission expansion planning: comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 312–319, 2013.
- HUTTER, F. et al. **ParamILS**: An automatic algorithm configuration framework. [S.l.:s.n.], 2009.
- MENDONÇA, I. M. de. **Planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica utilizando otimização por enxame de partículas**. 2012. 110 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Engenharia) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.
- MONTICELLI, A. et al. Interactive transmission network planning using a least-effort criterion. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, New York, PAS-101, n. 10, p. 3919–3925, 1982.
- PARADISEO. **ParadisEO - ParadisEO home page**. [S.l.:s.n.], 2015. Disponível em: <<http://paradiseo.gforge.inria.fr/index.php>>. Acesso em: 27 mar. 2015.
- PARADISEO. **ParadisEO - Tutorials**. [S.l.:s.n.], 2015. Disponível em: <<http://paradiseo.gforge.inria.fr/index.php?n=Doc.Tutorials>>. Acesso em: 27 mar. 2015.
- PAREJO, J. A. et al. Metaheuristic optimization frameworks: a survey and benchmarking. **Soft Computing**, Springer-Verlag, v. 16, n. 3, p. 527–561, 2012.
- PEREIRA, M. V. F.; PINTO, L. Application of sensitivity analysis of load supplying capability to interactive transmission expansion planning. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, New York, PAS-104, n. 2, p. 381–389, 1985.
- RESENDE, A. S. **Particle swarm optimization aplicada ao planejamento da expansão de sistemas de transmissão**. 2014. 163 f. Tese (Doutorado em Automação) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.
- ROMERO, R. et al. Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning. **Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings**, Stevenage, v. 149, n. 1, p. 27–36, 2002.

SILVA, E. F. da. **Planejamento estocástico da expansão da rede de transmissão de energia elétrica multiestágio considerando restrições de segurança**. 2013. 183 f. Tese (Doutorado em Automação) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

SILVA, I. D. J. et al. Transmission network expansion planning with security constraints. **Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings**, Stevenage, v. 152, n. 6, p. 828–836, 2005.

SOUSA, A. S. **Tomada de decisão fuzzy e busca tabu aplicadas ao planejamento da expansão de sistemas de transmissão**. 2009. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, 2009.

TALBI, E.-G. **Metaheuristics: from design to implementation**. Hoboken: Wiley Publishing, 2009.

VILLASANA, R.; GARVER, L.; SALON, S. Transmission network planning using linear programming. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, New York, PAS-104, n. 2, p. 349–356, 1985.

APÊNDICE A – PLANOS DE EXPANSÃO E SEUS CUSTOS

As melhores soluções encontradas neste trabalho são exibidas neste apêndice. A primeira seção apresenta os melhores resultados obtidos para o PERTE e, além disso, os resultados do primeiro teste, também para o PERTE. Na segunda seção estão os melhores resultados do PERTES. Ressalta-se que os resultados aprensetados são todos factíveis, ou seja, nenhum deles apresenta corte de carga.

A.1 MELHORES RESULTADOS PARA O PROBLEMA PERTE

Tabela 7 – Melhores soluções encontradas para o PERTE.

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
06-15-NRNN-01	291	$n_{1,5} = 1, n_{2,3} = 1, n_{2,5} = 1, n_{2,6} = 4, n_{3,5} = 2, n_{4,6} = 2$
06-15-NRWN-01	200	$n_{2,6} = 4, n_{3,5} = 1, n_{4,6} = 2$
06-15-WRNN-01	190	$n_{1,5} = 1, n_{2,3} = 2, n_{2,6} = 1, n_{3,5} = 2, n_{4,6} = 2$
06-15-WRWN-01	110	$n_{3,5} = 1, n_{4,6} = 3$
24-41-NRNN-01	1.715.000	$n_{1,2} = 1, n_{1,5} = 1, n_{3,9} = 1, n_{3,24} = 2, n_{4,9} = 2, n_{5,10} = 1, n_{7,8} = 1, n_{9,12} = 2, n_{10,11} = 1, n_{10,12} = 1, n_{11,14} = 1, n_{12,13} = 2, n_{14,16} = 2, n_{15,21} = 2, n_{15,24} = 2, n_{16,17} = 3, n_{16,19} = 2, n_{17,18} = 1, n_{17,22} = 2, n_{18,21} = 1, n_{19,20} = 1, n_{20,23} = 1, n_{2,8} = 1, n_{6,7} = 1$
24-41-NRNN-02	1.922.000	$n_{1,2} = 1, n_{1,5} = 2, n_{2,4} = 1, n_{3,9} = 1, n_{3,24} = 2, n_{4,9} = 1, n_{6,10} = 3, n_{7,8} = 2, n_{9,12} = 2, n_{10,11} = 2, n_{10,12} = 1, n_{11,13} = 1, n_{11,14} = 1, n_{12,13} = 1, n_{12,23} = 1, n_{14,16} = 2, n_{15,21} = 2, n_{15,24} = 2, n_{16,17} = 3, n_{16,19} = 2, n_{17,18} = 2, n_{17,22} = 1, n_{18,21} = 2, n_{19,20} = 1, n_{20,23} = 1, n_{21,22} = 1, n_{2,8} = 1$

(continua)

Tabela 7 – Melhores soluções encontradas para o PERTE.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
24-41-NRNN-03	1.739.000	$n_{1,2} = 1, n_{1,5} = 1, n_{3,24} = 2, n_{4,9} = 2, n_{5,10} = 1,$ $n_{7,8} = 1, n_{9,11} = 1, n_{9,12} = 1, n_{10,11} = 2, n_{11,13} = 2,$ $n_{11,14} = 1, n_{12,23} = 1, n_{15,16} = 1, n_{15,21} = 3,$ $n_{15,24} = 2, n_{16,19} = 1, n_{18,21} = 1, n_{20,23} = 1,$ $n_{21,22} = 2, n_{2,8} = 1, n_{6,7} = 1, n_{14,23} = 2, n_{19,23} = 1$
24-41-NRNN-04	1.857.000	$n_{1,2} = 2, n_{3,24} = 2, n_{4,9} = 2, n_{5,10} = 2, n_{6,10} = 1,$ $n_{7,8} = 1, n_{9,12} = 2, n_{10,11} = 1, n_{10,12} = 2, n_{11,14} = 1,$ $n_{12,13} = 2, n_{12,23} = 1, n_{14,16} = 2, n_{15,21} = 2,$ $n_{15,24} = 2, n_{16,17} = 2, n_{17,18} = 1, n_{17,22} = 1,$ $n_{18,21} = 2, n_{19,20} = 2, n_{20,23} = 2, n_{21,22} = 1,$ $n_{2,8} = 1, n_{6,7} = 1$
24-41-NRWN-01	390.000	$n_{1,5} = 1, n_{3,24} = 1, n_{6,10} = 1, n_{7,8} = 2, n_{14,16} = 1,$ $n_{15,24} = 1, n_{16,17} = 2, n_{16,19} = 1, n_{17,18} = 2$
24-41-NRWN-02	392.000	$n_{1,5} = 1, n_{3,24} = 1, n_{6,10} = 1, n_{7,8} = 1, n_{10,12} = 1,$ $n_{14,16} = 1, n_{15,24} = 1, n_{16,17} = 2, n_{17,18} = 2$
24-41-NRWN-03	218.000	$n_{6,10} = 1, n_{7,8} = 2, n_{10,12} = 1, n_{14,16} = 1, n_{16,17} = 1,$ $n_{20,23} = 1$
24-41-NRWN-04	342.000	$n_{3,24} = 1, n_{6,10} = 1, n_{7,8} = 2, n_{9,11} = 1, n_{10,12} = 1,$ $n_{14,16} = 2, n_{16,17} = 1$
24-41-WRNN-01	1.321.000	$n_{1,2} = 1, n_{1,5} = 1, n_{3,9} = 1, n_{3,24} = 2, n_{4,9} = 2,$ $n_{5,10} = 1, n_{7,8} = 1, n_{9,11} = 2, n_{10,11} = 1, n_{10,12} =$ $1, n_{11,13} = 1, n_{11,14} = 1, n_{12,13} = 1, n_{15,21} = 2,$ $n_{15,24} = 2, n_{16,19} = 1, n_{19,20} = 1, n_{20,23} = 2, n_{2,8} =$ $1, n_{6,7} = 1, n_{14,23} = 2$
24-41-WRWN-01	152.000	$n_{6,10} = 1, n_{7,8} = 2, n_{10,12} = 1, n_{14,16} = 1$
46-79-NRNN-01	491.186	$n_{5,8} = 1, n_{4,5} = 2, n_{2,5} = 2, n_{12,14} = 2, n_{13,20} = 1,$ $n_{19,21} = 1, n_{16,17} = 1, n_{17,19} = 1, n_{14,22} = 1,$ $n_{22,26} = 1, n_{23,24} = 2, n_{26,27} = 1, n_{24,33} = 1,$ $n_{33,34} = 1, n_{27,36} = 1, n_{36,37} = 1, n_{34,35} = 1,$ $n_{37,39} = 1, n_{37,40} = 2, n_{38,42} = 1, n_{32,43} = 2,$ $n_{42,44} = 1, n_{46,16} = 1, n_{20,21} = 3, n_{42,43} = 4,$ $n_{14,15} = 1, n_{46,6} = 1, n_{16,28} = 1, n_{19,25} = 1,$ $n_{31,32} = 1, n_{28,31} = 1, n_{40,45} = 1, n_{15,16} = 1,$ $n_{24,25} = 2, n_{5,6} = 2$

(continua)

Tabela 7 – Melhores soluções encontradas para o PERTE.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
46-79-NRWN-01	163.171	$n_{23,24} = 1, n_{20,21} = 1, n_{42,43} = 1, n_{46,6} = 1, n_{25,32} = 1, n_{31,32} = 1, n_{28,31} = 1, n_{31,41} = 1, n_{24,25} = 2, n_{40,41} = 1, n_{5,6} = 2$
46-79-WRNN-01	414.042	$n_{5,8} = 1, n_{4,5} = 2, n_{2,5} = 2, n_{12,14} = 2, n_{13,20} = 1, n_{19,21} = 1, n_{17,19} = 1, n_{14,22} = 1, n_{22,26} = 1, n_{23,24} = 2, n_{26,27} = 1, n_{33,34} = 1, n_{27,36} = 1, n_{34,35} = 1, n_{37,40} = 1, n_{38,42} = 1, n_{32,43} = 2, n_{42,44} = 1, n_{44,45} = 1, n_{46,16} = 1, n_{20,21} = 3, n_{42,43} = 4, n_{46,6} = 1, n_{19,25} = 1, n_{31,32} = 1, n_{28,31} = 1, n_{24,25} = 2, n_{5,6} = 2$
46-79-WRWN-01	72.870	$n_{2,5} = 1, n_{13,20} = 1, n_{20,23} = 1, n_{20,21} = 2, n_{42,43} = 1, n_{46,6} = 1, n_{5,6} = 2$
79-143-NRNN-01	2.932.400	$n_{2,11} = 1, n_{3,14} = 3, n_{5,19} = 1, n_{6,7} = 1, n_{6,8} = 1, n_{7,9} = 1, n_{14,31} = 1, n_{14,47} = 1, n_{14,73} = 1, n_{14,74} = 1, n_{15,4} = 1, n_{15,16} = 2, n_{16,18} = 1, n_{16,19} = 2, n_{17,22} = 4, n_{19,22} = 1, n_{19,24} = 2, n_{20,30} = 1, n_{21,20} = 1, n_{21,23} = 1, n_{23,26} = 1, n_{24,9} = 3, n_{24,70} = 1, n_{25,34} = 3, n_{25,60} = 1, n_{26,29} = 2, n_{28,33} = 1, n_{29,31} = 1, n_{30,29} = 2, n_{30,68} = 1, n_{30,70} = 1, n_{31,32} = 1, n_{32,35} = 1, n_{33,41} = 1, n_{34,79} = 4, n_{35,38} = 2, n_{36,40} = 1, n_{36,42} = 1, n_{38,39} = 1, n_{38,41} = 1, n_{40,41} = 2, n_{40,56} = 1, n_{40,72} = 1, n_{42,48} = 1, n_{43,49} = 1, n_{43,50} = 1, n_{43,55} = 2, n_{45,54} = 1, n_{45,57} = 1, n_{45,64} = 1, n_{45,71} = 3, n_{45,79} = 4, n_{46,48} = 2, n_{47,37} = 2, n_{48,51} = 1, n_{48,71} = 3, n_{49,52} = 1, n_{49,66} = 1, n_{50,57} = 1, n_{54,67} = 1, n_{57,66} = 1, n_{58,59} = 1, n_{59,53} = 2, n_{59,67} = 1, n_{62,61} = 2, n_{62,64} = 1, n_{63,64} = 2, n_{64,65} = 3, n_{69,72} = 1, n_{71,66} = 1, n_{73,22} = 4, n_{74,11} = 1, n_{77,78} = 1, n_{78,79} = 1$
79-143-NRWN-01	454.100	$n_{18,19} = 1, n_{21,20} = 1, n_{21,23} = 1, n_{24,9} = 2, n_{25,60} = 1, n_{30,29} = 1, n_{34,56} = 2, n_{34,64} = 1, n_{35,38} = 1, n_{38,41} = 2, n_{40,41} = 1, n_{40,56} = 2, n_{40,72} = 1, n_{48,51} = 1, n_{48,71} = 1, n_{58,59} = 1, n_{59,53} = 1, n_{59,67} = 1, n_{63,64} = 1, n_{64,65} = 1, n_{69,72} = 2$

(continua)

Tabela 7 – Melhores soluções encontradas para o PERTE.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
79-143-WRNN-01	2.872.100	$n_{2,11} = 1, n_{3,14} = 3, n_{5,19} = 1, n_{6,7} = 1, n_{6,8} = 1,$ $n_{6,9} = 1, n_{14,31} = 2, n_{14,47} = 1, n_{14,73} = 1,$ $n_{14,74} = 1, n_{15,16} = 1, n_{16,18} = 2, n_{17,22} = 2,$ $n_{17,30} = 2, n_{18,19} = 2, n_{19,22} = 1, n_{19,24} = 1,$ $n_{21,20} = 1, n_{21,23} = 1, n_{21,26} = 1, n_{22,30} = 1,$ $n_{23,26} = 1, n_{24,9} = 3, n_{24,70} = 1, n_{25,34} = 3,$ $n_{25,60} = 1, n_{26,29} = 3, n_{28,33} = 1, n_{29,31} = 2,$ $n_{30,29} = 2, n_{30,68} = 1, n_{30,70} = 2, n_{31,32} = 1,$ $n_{32,35} = 1, n_{33,41} = 1, n_{34,56} = 1, n_{34,79} = 3,$ $n_{35,38} = 2, n_{38,41} = 1, n_{38,55} = 1, n_{40,41} = 1,$ $n_{40,56} = 2, n_{40,71} = 1, n_{40,72} = 1, n_{42,47} = 1,$ $n_{43,49} = 2, n_{43,50} = 1, n_{43,55} = 3, n_{45,54} = 1,$ $n_{45,57} = 1, n_{45,64} = 1, n_{45,71} = 3, n_{45,79} = 3,$ $n_{46,48} = 2, n_{47,37} = 2, n_{48,51} = 1, n_{48,71} = 4,$ $n_{49,66} = 1, n_{52,53} = 1, n_{54,67} = 1, n_{58,59} = 1,$ $n_{59,53} = 2, n_{59,67} = 1, n_{62,61} = 2, n_{62,64} = 1,$ $n_{63,64} = 2, n_{64,65} = 2, n_{69,72} = 1, n_{71,66} = 1,$ $n_{73,22} = 2, n_{73,68} = 1, n_{73,70} = 1, n_{74,11} = 1,$ $n_{77,78} = 1, n_{78,79} = 1$
79-143-WRWN-01	335.700	$n_{21,20} = 1, n_{21,23} = 1, n_{24,9} = 2, n_{25,60} = 2,$ $n_{30,29} = 1, n_{34,56} = 2, n_{34,64} = 1, n_{35,38} = 1,$ $n_{38,41} = 2, n_{40,41} = 1, n_{40,56} = 2, n_{40,72} = 1,$ $n_{48,71} = 1, n_{59,67} = 1, n_{64,65} = 1, n_{69,72} = 2$

(continua)

Tabela 7 – Melhores soluções encontradas para o PERTE.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
87-183-NRNN-01	2.577.879	$n_{1,2} = 2, n_{2,4} = 1, n_{2,60} = 2, n_{4,5} = 1, n_{4,60} = 1,$ $n_{4,68} = 1, n_{5,56} = 1, n_{5,58} = 2, n_{5,60} = 2, n_{7,8} = 1,$ $n_{8,9} = 1, n_{8,53} = 1, n_{10,11} = 1, n_{11,15} = 2, n_{11,53} = 1,$ $n_{12,13} = 1, n_{12,15} = 1, n_{12,17} = 2, n_{12,35} = 3,$ $n_{13,14} = 1, n_{13,15} = 3, n_{13,59} = 1, n_{14,17} = 1,$ $n_{15,16} = 5, n_{15,45} = 1, n_{15,46} = 1, n_{16,44} = 8,$ $n_{16,61} = 1, n_{17,18} = 3, n_{18,50} = 11, n_{18,74} = 3,$ $n_{19,20} = 1, n_{20,56} = 1, n_{21,57} = 2, n_{22,37} = 1,$ $n_{22,58} = 1, n_{23,24} = 1, n_{24,43} = 1, n_{25,55} = 3,$ $n_{26,29} = 1, n_{26,54} = 1, n_{27,28} = 2, n_{27,53} = 1,$ $n_{30,31} = 1, n_{30,63} = 1, n_{34,41} = 1, n_{36,46} = 2,$ $n_{39,86} = 1, n_{40,45} = 2, n_{40,46} = 1, n_{41,64} = 2,$ $n_{42,44} = 2, n_{42,85} = 1, n_{43,55} = 2, n_{43,58} = 2,$ $n_{48,50} = 2, n_{48,51} = 1, n_{49,50} = 5, n_{51,52} = 3,$ $n_{52,59} = 2, n_{53,54} = 1, n_{54,63} = 1, n_{56,57} = 1,$ $n_{61,85} = 2, n_{61,86} = 1, n_{63,64} = 1, n_{67,71} = 2,$ $n_{68,69} = 1, n_{68,83} = 2, n_{71,72} = 1, n_{71,83} = 1,$ $n_{72,73} = 1, n_{73,74} = 1$
87-183-NRNN-02	3.829.067	$n_{1,2} = 3, n_{2,60} = 2, n_{4,81} = 6, n_{5,56} = 2, n_{5,58} = 2,$ $n_{5,60} = 2, n_{5,68} = 1, n_{7,8} = 1, n_{8,9} = 1, n_{8,73} = 1,$ $n_{9,10} = 1, n_{10,11} = 1, n_{11,12} = 1, n_{11,17} = 1,$ $n_{11,53} = 1, n_{12,13} = 1, n_{12,15} = 3, n_{12,17} = 1,$ $n_{12,35} = 1, n_{13,14} = 1, n_{13,15} = 4, n_{13,17} = 1,$ $n_{13,45} = 1, n_{14,59} = 1, n_{15,16} = 6, n_{15,45} = 1,$ $n_{15,46} = 2, n_{16,44} = 11, n_{16,61} = 1, n_{17,18} = 3,$ $n_{18,50} = 16, n_{18,74} = 5, n_{19,20} = 1, n_{20,56} = 1,$ $n_{21,57} = 2, n_{22,23} = 1, n_{22,37} = 1, n_{22,58} = 2,$ $n_{24,43} = 1, n_{25,55} = 4, n_{26,54} = 1, n_{27,53} = 1,$ $n_{28,35} = 2, n_{29,30} = 1, n_{30,31} = 2, n_{30,63} = 2,$ $n_{34,41} = 1, n_{35,51} = 4, n_{36,46} = 2, n_{39,86} = 1,$ $n_{40,45} = 3, n_{41,64} = 3, n_{42,44} = 3, n_{43,55} = 2,$ $n_{43,58} = 2, n_{48,49} = 1, n_{48,50} = 4, n_{49,50} = 6,$ $n_{51,52} = 3, n_{52,59} = 2, n_{53,86} = 1, n_{54,55} = 1,$ $n_{54,63} = 2, n_{54,79} = 2, n_{56,57} = 2, n_{58,78} = 1,$ $n_{61,85} = 3, n_{63,64} = 1, n_{67,71} = 2, n_{68,69} = 1,$ $n_{68,83} = 1, n_{71,72} = 1, n_{71,83} = 1, n_{72,73} = 1,$ $n_{73,74} = 2, n_{73,75} = 1, n_{75,81} = 1, n_{78,79} = 1,$ $n_{78,80} = 1, n_{80,81} = 1, n_{81,83} = 1$

(continua)

Tabela 7 – Melhores soluções encontradas para o PERTE.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
87-183-NRWN-01	1.511.668	$n_{2,4} = 1, n_{2,60} = 1, n_{4,81} = 1, n_{5,56} = 1, n_{5,58} = 2,$ $n_{5,60} = 1, n_{6,67} = 1, n_{10,11} = 1, n_{13,15} = 3,$ $n_{14,59} = 1, n_{15,16} = 2, n_{15,46} = 1, n_{16,44} = 3,$ $n_{16,61} = 1, n_{18,50} = 6, n_{18,74} = 3, n_{21,57} = 1,$ $n_{22,58} = 1, n_{24,43} = 1, n_{25,55} = 2, n_{26,54} = 1,$ $n_{30,31} = 1, n_{30,63} = 2, n_{36,46} = 2, n_{40,45} = 1,$ $n_{41,64} = 2, n_{43,55} = 1, n_{43,58} = 2, n_{48,49} = 1,$ $n_{49,50} = 2, n_{52,59} = 1, n_{53,54} = 1, n_{54,63} = 1,$ $n_{56,57} = 1, n_{61,64} = 1, n_{61,85} = 2, n_{67,68} = 1,$ $n_{68,69} = 1, n_{68,83} = 2, n_{72,73} = 1, n_{72,83} = 1,$ $n_{73,74} = 1, n_{81,83} = 1$
87-183-NRWN-02	2.752.782	$n_{1,2} = 1, n_{2,60} = 1, n_{4,68} = 3, n_{4,81} = 3, n_{5,56} = 1,$ $n_{5,58} = 1, n_{5,60} = 1, n_{6,67} = 1, n_{12,15} = 1, n_{13,14} = 1,$ $n_{13,15} = 3, n_{13,45} = 1, n_{14,59} = 1, n_{15,16} = 3,$ $n_{15,46} = 1, n_{16,44} = 6, n_{16,45} = 1, n_{16,61} = 1,$ $n_{18,50} = 11, n_{18,74} = 5, n_{21,57} = 2, n_{22,58} = 2,$ $n_{24,43} = 2, n_{25,55} = 3, n_{27,53} = 1, n_{30,31} = 1,$ $n_{30,63} = 2, n_{35,51} = 1, n_{36,46} = 2, n_{40,45} = 2,$ $n_{41,64} = 3, n_{43,55} = 1, n_{43,58} = 2, n_{48,49} = 1,$ $n_{49,50} = 4, n_{52,59} = 1, n_{54,55} = 1, n_{54,63} = 2,$ $n_{54,79} = 2, n_{56,57} = 1, n_{58,78} = 1, n_{61,85} = 3,$ $n_{63,64} = 1, n_{67,68} = 1, n_{68,69} = 1, n_{68,83} = 5,$ $n_{68,87} = 1, n_{72,73} = 1, n_{72,83} = 1, n_{73,74} = 2,$ $n_{73,75} = 1, n_{75,81} = 1, n_{78,79} = 1, n_{78,80} = 1,$ $n_{80,83} = 1$

(continua)

Tabela 7 – Melhores soluções encontradas para o PERTE.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
87-183-WRNN-01	1.845.094	$n_{1,2} = 2, n_{5,56} = 1, n_{5,58} = 2, n_{5,68} = 2, n_{7,8} = 1,$ $n_{8,9} = 1, n_{8,53} = 1, n_{10,11} = 1, n_{11,12} = 1, n_{11,17} = 2,$ $n_{11,53} = 1, n_{12,13} = 1, n_{12,15} = 1, n_{12,17} = 3,$ $n_{12,35} = 3, n_{13,15} = 4, n_{13,17} = 1, n_{13,45} = 1,$ $n_{14,59} = 1, n_{15,16} = 4, n_{15,46} = 2, n_{16,44} = 7,$ $n_{16,61} = 1, n_{17,18} = 6, n_{18,50} = 11, n_{19,20} = 1,$ $n_{20,56} = 1, n_{21,57} = 2, n_{22,23} = 1, n_{22,37} = 1,$ $n_{22,58} = 1, n_{24,43} = 1, n_{25,55} = 3, n_{26,29} = 1,$ $n_{26,54} = 1, n_{27,53} = 1, n_{28,35} = 2, n_{30,31} = 1,$ $n_{30,63} = 1, n_{34,41} = 1, n_{35,51} = 2, n_{36,39} = 2,$ $n_{36,46} = 3, n_{39,42} = 1, n_{40,45} = 2, n_{40,46} = 1,$ $n_{41,64} = 2, n_{42,44} = 1, n_{42,85} = 1, n_{43,55} = 1,$ $n_{43,58} = 1, n_{48,50} = 3, n_{49,50} = 5, n_{51,52} = 1,$ $n_{52,59} = 2, n_{53,54} = 2, n_{54,55} = 1, n_{54,63} = 1,$ $n_{56,57} = 1, n_{61,85} = 2, n_{63,64} = 1, n_{68,69} = 1$
87-183-WRNN-02	2.901.069	$n_{1,2} = 3, n_{4,5} = 3, n_{4,81} = 3, n_{5,56} = 2, n_{5,58} = 3,$ $n_{5,68} = 1, n_{7,8} = 1, n_{9,10} = 1, n_{10,11} = 2, n_{11,15} = 1,$ $n_{11,17} = 3, n_{12,15} = 2, n_{12,17} = 4, n_{12,35} = 3,$ $n_{13,14} = 1, n_{13,15} = 4, n_{13,17} = 1, n_{13,45} = 1,$ $n_{14,45} = 1, n_{14,59} = 1, n_{15,16} = 6, n_{15,46} = 1,$ $n_{16,44} = 11, n_{16,61} = 1, n_{17,18} = 8, n_{18,50} = 16,$ $n_{19,20} = 1, n_{20,21} = 1, n_{20,56} = 1, n_{21,57} = 2,$ $n_{22,23} = 1, n_{22,58} = 2, n_{24,43} = 1, n_{25,55} = 4,$ $n_{26,54} = 1, n_{27,28} = 1, n_{27,53} = 2, n_{28,35} = 1,$ $n_{29,30} = 1, n_{30,31} = 2, n_{30,63} = 2, n_{34,41} = 1,$ $n_{35,46} = 1, n_{35,51} = 3, n_{36,46} = 2, n_{39,86} = 1,$ $n_{40,45} = 3, n_{41,64} = 3, n_{42,44} = 3, n_{43,55} = 2,$ $n_{43,58} = 2, n_{48,49} = 1, n_{48,50} = 4, n_{49,50} = 6,$ $n_{52,59} = 2, n_{53,54} = 1, n_{53,86} = 1, n_{54,55} = 1,$ $n_{54,63} = 2, n_{54,79} = 3, n_{56,57} = 1, n_{61,85} = 3,$ $n_{63,64} = 1, n_{78,79} = 1, n_{78,80} = 1, n_{80,81} = 1$

(continua)

Tabela 7 – Melhores soluções encontradas para o PERTE.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
87-183-WRWN-01	757.968	$n_{5,58} = 1, n_{6,67} = 1, n_{12,17} = 2, n_{13,15} = 3,$ $n_{14,59} = 1, n_{15,16} = 2, n_{16,44} = 3, n_{16,61} = 1,$ $n_{17,18} = 2, n_{18,50} = 7, n_{20,21} = 2, n_{20,38} = 1,$ $n_{22,37} = 1, n_{24,43} = 1, n_{25,55} = 2, n_{27,53} = 1,$ $n_{29,30} = 1, n_{31,34} = 1, n_{35,51} = 1, n_{39,86} = 2,$ $n_{40,45} = 1, n_{41,64} = 2, n_{43,55} = 1, n_{43,58} = 1,$ $n_{48,49} = 1, n_{48,50} = 1, n_{49,50} = 2, n_{52,59} = 1,$ $n_{53,86} = 1, n_{61,64} = 1, n_{61,85} = 2$
87-183-WRWN-02	1.890.936	$n_{1,2} = 1, n_{4,5} = 1, n_{4,81} = 3, n_{5,56} = 1, n_{5,58} = 2,$ $n_{5,68} = 1, n_{6,67} = 1, n_{10,11} = 1, n_{11,12} = 1,$ $n_{12,17} = 3, n_{13,15} = 4, n_{13,17} = 2, n_{14,59} = 1,$ $n_{15,16} = 3, n_{15,45} = 1, n_{15,46} = 1, n_{16,44} = 6,$ $n_{17,18} = 5, n_{18,50} = 11, n_{21,57} = 2, n_{22,23} = 1,$ $n_{22,58} = 2, n_{24,43} = 1, n_{25,55} = 3, n_{26,54} = 2,$ $n_{30,31} = 1, n_{30,63} = 2, n_{35,51} = 2, n_{36,46} = 1,$ $n_{39,86} = 1, n_{40,45} = 2, n_{41,64} = 3, n_{43,55} = 1,$ $n_{43,58} = 1, n_{48,49} = 1, n_{49,50} = 4, n_{52,59} = 1,$ $n_{53,86} = 1, n_{54,55} = 1, n_{54,63} = 2, n_{54,79} = 3,$ $n_{56,57} = 1, n_{61,85} = 3, n_{61,86} = 1, n_{63,64} = 1,$ $n_{78,79} = 1, n_{78,80} = 1, n_{80,81} = 1$

(continua)

Tabela 7 – Melhores soluções encontradas para o PERTE.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
93-155-NRNN-01	1.812.960	$n_{57,81} = 2, n_{8,67} = 1, n_{25,28} = 1, n_{13,14} = 1, n_{14,60} = 1,$ $n_{2,9} = 2, n_{15,18} = 2, n_{15,17} = 1, n_{15,20} = 1,$ $n_{19,61} = 1, n_{61,68} = 1, n_{37,68} = 1, n_{35,44} = 1,$ $n_{38,68} = 1, n_{27,80} = 1, n_{45,50} = 1, n_{10,78} = 1,$ $n_{7,78} = 1, n_{30,64} = 1, n_{30,65} = 2, n_{30,72} = 3,$ $n_{55,57} = 3, n_{56,57} = 2, n_{9,77} = 1, n_{77,79} = 1,$ $n_{1,59} = 1, n_{59,67} = 1, n_{1,3} = 2, n_{3,71} = 1, n_{55,62} = 3,$ $n_{47,52} = 1, n_{51,52} = 1, n_{41,42} = 1, n_{40,42} = 1,$ $n_{46,53} = 1, n_{46,51} = 1, n_{69,70} = 1, n_{66,69} = 3,$ $n_{9,69} = 4, n_{60,69} = 3, n_{31,32} = 1, n_{32,34} = 1,$ $n_{16,23} = 1, n_{16,21} = 1, n_{31,72} = 1, n_{47,54} = 1,$ $n_{18,58} = 1, n_{18,21} = 1, n_{18,22} = 1, n_{19,22} = 1,$ $n_{4,5} = 1, n_{5,6} = 1, n_{17,76} = 1, n_{12,17} = 1, n_{1,11} = 1,$ $n_{4,36} = 1, n_{27,64} = 1, n_{27,44} = 1, n_{27,29} = 1, n_{19,66} =$ $2, n_{64,65} = 1, n_{29,64} = 1, n_{4,34} = 2, n_{34,70} = 1,$ $n_{8,71} = 2, n_{54,63} = 3, n_{67,68} = 1, n_{39,68} = 1, n_{8,9} = 2,$ $n_{41,43} = 1, n_{23,24} = 1, n_{21,22} = 1, n_{26,28} = 1,$ $n_{28,29} = 1, n_{6,10} = 1, n_{33,72} = 1, n_{39,40} = 1,$ $n_{48,54} = 1, n_{62,73} = 2, n_{49,53} = 1, n_{45,81} = 2,$ $n_{54,56} = 3, n_{72,73} = 3, n_{7,90} = 1, n_{3,90} = 1$

(continua)

Tabela 7 – Melhores soluções encontradas para o PERTE.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
93-155-NRNN-02	2.039.642	$n_{57,81} = 2, n_{39,86} = 1, n_{25,28} = 1, n_{13,14} = 1,$ $n_{13,20} = 1, n_{14,31} = 1, n_{2,4} = 2, n_{2,9} = 2, n_{15,18} = 2,$ $n_{15,17} = 1, n_{15,24} = 1, n_{37,61} = 1, n_{19,61} = 1,$ $n_{37,68} = 1, n_{40,68} = 1, n_{35,44} = 1, n_{38,39} = 1,$ $n_{27,80} = 1, n_{45,50} = 1, n_{7,78} = 1, n_{30,65} = 1,$ $n_{30,72} = 1, n_{55,57} = 3, n_{56,57} = 2, n_{9,77} = 1,$ $n_{77,79} = 1, n_{1,59} = 2, n_{59,67} = 2, n_{1,3} = 2, n_{3,71} = 1,$ $n_{55,62} = 3, n_{47,52} = 1, n_{41,42} = 1, n_{40,42} = 1,$ $n_{46,53} = 1, n_{46,51} = 1, n_{69,70} = 1, n_{66,69} = 4,$ $n_{9,69} = 6, n_{60,69} = 4, n_{32,34} = 1, n_{16,21} = 1,$ $n_{31,33} = 1, n_{47,54} = 1, n_{47,49} = 1, n_{18,58} = 1,$ $n_{18,20} = 3, n_{18,66} = 1, n_{18,22} = 1, n_{19,22} = 2,$ $n_{4,5} = 1, n_{5,6} = 1, n_{17,76} = 1, n_{1,71} = 1, n_{1,11} = 1,$ $n_{4,36} = 1, n_{27,64} = 2, n_{27,44} = 2, n_{26,27} = 1,$ $n_{19,66} = 2, n_{73,74} = 2, n_{29,64} = 1, n_{34,70} = 1,$ $n_{8,71} = 1, n_{54,63} = 3, n_{48,63} = 1, n_{67,68} = 1,$ $n_{39,68} = 1, n_{8,9} = 2, n_{41,43} = 1, n_{23,24} = 1,$ $n_{21,22} = 2, n_{28,29} = 1, n_{6,10} = 1, n_{33,72} = 1,$ $n_{12,76} = 1, n_{48,54} = 1, n_{62,73} = 2, n_{49,53} = 1,$ $n_{45,81} = 3, n_{64,74} = 2, n_{54,56} = 3, n_{60,62} = 1,$ $n_{72,73} = 2, n_{7,90} = 2, n_{3,90} = 2$

(continua)

Tabela 7 – Melhores soluções encontradas para o PERTE.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
93-155-NRNN-03	2.255.559	$n_{43,88} = 2, n_{57,81} = 2, n_{8,67} = 3, n_{25,28} = 1,$ $n_{13,20} = 1, n_{2,4} = 2, n_{2,9} = 3, n_{15,18} = 2, n_{15,17} = 1,$ $n_{15,24} = 1, n_{19,61} = 1, n_{37,68} = 1, n_{35,44} = 1,$ $n_{38,39} = 1, n_{27,80} = 1, n_{56,81} = 1, n_{45,50} = 2,$ $n_{10,78} = 1, n_{30,65} = 1, n_{30,72} = 2, n_{55,57} = 2,$ $n_{57,84} = 1, n_{55,84} = 2, n_{56,57} = 1, n_{77,79} = 1,$ $n_{1,59} = 1, n_{3,71} = 2, n_{55,62} = 3, n_{47,52} = 1,$ $n_{51,52} = 1, n_{40,42} = 1, n_{46,53} = 1, n_{46,51} = 1,$ $n_{69,70} = 1, n_{66,69} = 4, n_{9,69} = 5, n_{60,69} = 3,$ $n_{32,34} = 1, n_{16,21} = 2, n_{31,72} = 1, n_{47,54} = 1,$ $n_{18,58} = 1, n_{18,20} = 2, n_{18,21} = 1, n_{18,22} = 3,$ $n_{19,22} = 4, n_{4,5} = 2, n_{5,6} = 1, n_{17,76} = 1, n_{1,71} = 1,$ $n_{1,8} = 1, n_{1,11} = 1, n_{4,36} = 1, n_{27,64} = 3, n_{27,44} = 2,$ $n_{19,66} = 2, n_{73,74} = 2, n_{29,64} = 1, n_{34,70} = 1,$ $n_{8,71} = 2, n_{54,63} = 3, n_{48,63} = 1, n_{67,68} = 3,$ $n_{39,68} = 1, n_{8,9} = 1, n_{79,87} = 1, n_{8,87} = 1, n_{39,43} = 1,$ $n_{23,24} = 1, n_{21,22} = 1, n_{26,28} = 1, n_{28,29} = 1,$ $n_{6,10} = 1, n_{33,72} = 1, n_{39,40} = 1, n_{12,76} = 1,$ $n_{48,54} = 1, n_{62,73} = 3, n_{49,53} = 1, n_{40,41} = 1,$ $n_{45,81} = 2, n_{64,74} = 2, n_{54,56} = 2, n_{60,62} = 1,$ $n_{72,73} = 2, n_{19,86} = 1, n_{68,86} = 2, n_{7,90} = 1,$ $n_{3,90} = 1$
93-155-NRWN-01	296.454	$n_{55,57} = 1, n_{56,57} = 1, n_{55,62} = 1, n_{50,54} = 1,$ $n_{54,56} = 1, n_{82,85} = 1$
93-155-NRWN-02	443.494	$n_{57,81} = 2, n_{55,57} = 1, n_{55,62} = 1, n_{27,29} = 1,$ $n_{62,73} = 1, n_{45,81} = 1, n_{64,74} = 1, n_{19,82} = 1,$ $n_{82,85} = 1$
93-155-NRWN-03	571.632	$n_{43,88} = 2, n_{15,18} = 1, n_{45,54} = 2, n_{30,65} = 1,$ $n_{30,72} = 1, n_{57,84} = 1, n_{55,84} = 2, n_{56,57} = 1,$ $n_{55,62} = 1, n_{27,64} = 1, n_{28,29} = 1, n_{62,73} = 1,$ $n_{72,73} = 1, n_{19,82} = 2, n_{82,85} = 1, n_{68,86} = 1$

(continua)

Tabela 7 – Melhores soluções encontradas para o PERTE.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
93-155-WRNN-01	1.163.503	$n_{57,81} = 1, n_{8,67} = 2, n_{25,28} = 1, n_{13,14} = 1, n_{13,20} = 1, n_{14,31} = 1, n_{14,60} = 1, n_{2,4} = 1, n_{2,9} = 2, n_{15,18} = 1, n_{15,24} = 1, n_{37,61} = 1, n_{37,68} = 1, n_{35,44} = 1, n_{38,39} = 1, n_{27,80} = 1, n_{45,50} = 1, n_{7,78} = 1, n_{30,64} = 2, n_{30,72} = 2, n_{55,57} = 1, n_{9,77} = 1, n_{77,79} = 1, n_{1,59} = 1, n_{1,3} = 2, n_{3,71} = 1, n_{55,62} = 1, n_{47,52} = 1, n_{51,52} = 1, n_{41,42} = 1, n_{40,42} = 1, n_{69,70} = 1, n_{66,69} = 4, n_{9,69} = 5, n_{60,69} = 2, n_{31,32} = 1, n_{16,21} = 1, n_{31,33} = 1, n_{31,60} = 3, n_{31,72} = 2, n_{47,54} = 1, n_{18,58} = 1, n_{18,20} = 1, n_{19,22} = 1, n_{4,5} = 1, n_{5,6} = 1, n_{17,76} = 1, n_{12,17} = 1, n_{1,11} = 1, n_{4,36} = 1, n_{27,64} = 1, n_{27,44} = 1, n_{27,29} = 1, n_{19,66} = 3, n_{64,65} = 1, n_{34,70} = 1, n_{8,71} = 2, n_{67,68} = 1, n_{39,68} = 1, n_{8,9} = 1, n_{41,43} = 1, n_{23,24} = 1, n_{21,22} = 2, n_{26,28} = 1, n_{28,29} = 1, n_{6,10} = 1, n_{39,40} = 1, n_{48,54} = 1, n_{49,53} = 1, n_{45,81} = 2, n_{60,62} = 1, n_{7,90} = 1, n_{3,90} = 1$
93-155-WRNN-02	1.291.447	$n_{57,81} = 1, n_{8,67} = 1, n_{25,28} = 1, n_{13,14} = 1, n_{13,20} = 2, n_{14,31} = 2, n_{14,60} = 1, n_{2,4} = 2, n_{2,9} = 2, n_{15,18} = 2, n_{15,17} = 1, n_{15,24} = 1, n_{19,61} = 1, n_{40,68} = 1, n_{38,68} = 1, n_{27,80} = 1, n_{45,50} = 1, n_{7,78} = 1, n_{30,64} = 3, n_{30,65} = 1, n_{30,72} = 3, n_{55,57} = 1, n_{9,77} = 1, n_{77,79} = 1, n_{1,59} = 1, n_{59,67} = 1, n_{8,59} = 1, n_{1,3} = 2, n_{3,71} = 1, n_{47,52} = 1, n_{40,42} = 1, n_{46,53} = 1, n_{46,51} = 1, n_{69,70} = 1, n_{66,69} = 6, n_{9,69} = 5, n_{60,69} = 2, n_{32,34} = 1, n_{16,21} = 1, n_{31,60} = 3, n_{31,72} = 3, n_{47,54} = 1, n_{18,58} = 2, n_{18,20} = 2, n_{18,22} = 1, n_{19,22} = 2, n_{4,5} = 1, n_{5,6} = 1, n_{17,76} = 1, n_{12,17} = 1, n_{1,11} = 1, n_{4,36} = 1, n_{19,58} = 1, n_{27,64} = 2, n_{27,44} = 2, n_{26,27} = 1, n_{19,66} = 3, n_{29,64} = 1, n_{34,70} = 2, n_{33,34} = 1, n_{8,71} = 2, n_{67,68} = 1, n_{39,68} = 1, n_{8,9} = 1, n_{41,43} = 1, n_{23,24} = 1, n_{21,22} = 2, n_{28,29} = 1, n_{6,10} = 1, n_{48,54} = 1, n_{49,53} = 1, n_{45,81} = 1, n_{68,86} = 1, n_{7,90} = 2, n_{3,90} = 2$

(continua)

Tabela 7 – Melhores soluções encontradas para o PERTE.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
93-155-WRNN-03	1.408.963	$n_{8,67} = 2, n_{39,86} = 2, n_{25,28} = 1, n_{13,14} = 2,$ $n_{13,20} = 2, n_{14,31} = 2, n_{2,4} = 2, n_{2,9} = 3, n_{15,18} = 1,$ $n_{15,17} = 1, n_{15,24} = 1, n_{37,61} = 1, n_{37,68} = 1,$ $n_{40,68} = 1, n_{27,35} = 1, n_{38,39} = 1, n_{27,80} = 1,$ $n_{45,50} = 1, n_{7,78} = 1, n_{30,64} = 2, n_{30,65} = 2,$ $n_{30,72} = 4, n_{57,84} = 1, n_{55,84} = 1, n_{77,79} = 1,$ $n_{1,59} = 2, n_{59,67} = 2, n_{1,3} = 3, n_{3,71} = 1, n_{47,52} = 1,$ $n_{51,52} = 1, n_{41,42} = 1, n_{40,42} = 1, n_{46,53} = 1,$ $n_{46,51} = 1, n_{69,70} = 1, n_{66,69} = 4, n_{9,69} = 3,$ $n_{60,69} = 2, n_{31,32} = 1, n_{16,23} = 1, n_{16,21} = 2,$ $n_{31,60} = 4, n_{31,72} = 3, n_{47,54} = 1, n_{18,58} = 3,$ $n_{18,20} = 3, n_{18,21} = 1, n_{18,22} = 1, n_{19,22} = 2,$ $n_{4,5} = 2, n_{5,6} = 1, n_{17,76} = 1, n_{12,17} = 1, n_{1,11} = 1,$ $n_{4,36} = 1, n_{19,58} = 2, n_{27,64} = 3, n_{27,28} = 1,$ $n_{27,44} = 2, n_{26,27} = 1, n_{19,66} = 2, n_{64,65} = 1,$ $n_{34,70} = 2, n_{33,34} = 2, n_{8,71} = 1, n_{48,63} = 1,$ $n_{67,68} = 3, n_{39,68} = 1, n_{8,9} = 1, n_{79,87} = 1, n_{8,87} = 1,$ $n_{41,43} = 1, n_{21,22} = 2, n_{28,29} = 1, n_{6,10} = 1,$ $n_{33,72} = 1, n_{48,54} = 1, n_{49,53} = 1, n_{19,86} = 1,$ $n_{7,90} = 1, n_{3,90} = 1$
93-155-WRWN-01	45.171	$n_{9,69} = 2, n_{60,69} = 1$
93-155-WRWN-02	116.316	$n_{66,69} = 1, n_{9,69} = 2, n_{60,69} = 2, n_{31,60} = 1, n_{27,29} = 1,$ $n_{19,66} = 1$
93-155-WRWN-03	158.600	$n_{9,69} = 2, n_{60,69} = 2, n_{27,29} = 1, n_{62,73} = 1, n_{19,82} = 1,$ $n_{68,86} = 1$

Fonte: O autor.

Tabela 8 – Informações sobre as soluções dos testes para cada algoritmo e cada sistema teste no PERTE.

	Melhor valor (US\$×10 ³)	Média (US\$×10 ³)	Pior valor (US\$×10 ³)	Soluções factíveis	Número de PLs (média)
06-15-NRNN-01					
BT	291,00	295,00	311,00	20	880,40
graspBL	291,00	291,00	291,00	20	267,50
graspBT	291,00	296,60	319,00	20	844,15
bliBL	291,00	303,40	319,00	20	882,85
bliBT	311,00	311,00	311,00	20	841,00
06-15-NRWN-01					
BT	200,00	200,00	200,00	20	915,30
graspBL	200,00	200,00	200,00	20	253,50
graspBT	200,00	200,00	200,00	20	962,40
bliBL	200,00	200,00	200,00	20	888,45
bliBT	200,00	200,00	200,00	20	883,30
06-15-WRNN-01					
BT	190,00	190,00	190,00	20	963,70
graspBL	190,00	190,00	190,00	20	324,45
graspBT	190,00	190,00	190,00	20	1.023,80
bliBL	190,00	190,00	190,00	20	966,85
bliBT	190,00	190,00	190,00	20	965,75
06-15-WRWN-01					
BT	110,00	111,00	130,00	20	908,70
graspBL	110,00	111,00	130,00	20	264,80
graspBT	110,00	122,00	130,00	20	969,95
bliBL	130,00	136,00	140,00	20	857,95
bliBT	130,00	130,00	130,00	20	824,20

(continua)

Tabela 8 – Informações sobre as soluções dos testes para cada algoritmo e cada sistema teste no PERTE

(continuação)

	Melhor valor (US\$×10 ³)	Média (US\$×10 ³)	Pior valor (US\$×10 ³)	Soluções factíveis	Número de PLs (média)
24-41-NRNN-01					
BT	1.715.000,00	1.765.900,00	1.809.000,00	10	5.531,30
graspBL	1.719.000,00	1.759.888,89	1.800.000,00	9	2.528,78
graspBT	1.748.000,00	1.798.777,78	1.832.000,00	9	6.172,56
bliBL	1.748.000,00	1.806.000,00	1.872.000,00	10	5.539,90
bliBT	1.715.000,00	1.763.100,00	1.852.000,00	10	5.429,40
24-41-NRNN-02					
BT	1.922.000,00	1.974.625,00	2.034.000,00	8	6.584,00
graspBL	1.924.000,00	1.986.700,00	2.024.000,00	10	1.421,40
graspBT	1.997.000,00	2.025.714,29	2.074.000,00	7	7.810,86
bliBL	1.989.000,00	2.022.272,73	2.055.000,00	11	4.796,27
bliBT	1.998.000,00	2.049.666,67	2.075.000,00	12	4.478,17
24-41-NRNN-03					
BT	1.739.000,00	1.788.142,86	1.893.000,00	7	7.865,29
graspBL	1.739.000,00	1.753.000,00	1.781.000,00	13	697,23
graspBT	1.744.000,00	1.790.538,46	1.835.000,00	13	3.847,69
bliBL	1.756.000,00	1.799.642,86	1.835.000,00	14	3.948,71
bliBT	1.776.000,00	1.829.000,00	1.969.000,00	13	3.956,85
24-41-NRNN-04					
BT	1.937.000,00	1.942.000,00	1.945.000,00	4	13.582,00
graspBL	1.857.000,00	1.879.153,85	1.924.000,00	13	963,62
graspBT	1.857.000,00	1.908.461,54	1.954.000,00	13	3.811,54
bliBL	1.857.000,00	1.918.266,67	1.954.000,00	15	3.411,73

(continua)

Tabela 8 – Informações sobre as soluções dos testes para cada algoritmo e cada sistema teste no PERTE

(continuação)

	Melhor valor (US\$×10 ³)	Média (US\$×10 ³)	Pior valor (US\$×10 ³)	Soluções factíveis	Número de PLs (média)
bliBT	1.965.000,00	1.985.800,00	1.993.000,00	5	10.739,00
24-41-NRWN-01					
BT	390.000,00	390.000,00	390.000,00	10	4.754,80
graspBL	390.000,00	390.000,00	390.000,00	10	1.465,20
graspBT	390.000,00	390.000,00	390.000,00	10	4.913,10
bliBL	390.000,00	390.000,00	390.000,00	10	4.957,60
bliBT	390.000,00	390.000,00	390.000,00	10	4.694,30
24-41-NRWN-02					
BT	392.000,00	395.200,00	408.000,00	15	3.203,60
graspBL	440.000,00	483.200,00	494.000,00	10	1.615,40
graspBT	392.000,00	392.000,00	392.000,00	7	7.019,00
bliBL	471.000,00	471.000,00	471.000,00	10	4.836,50
bliBT	424.000,00	455.333,33	471.000,00	15	3.091,60
24-41-NRWN-03					
BT	218.000,00	219.785,71	243.000,00	14	3.471,93
graspBL	218.000,00	218.000,00	218.000,00	15	770,00
graspBT	218.000,00	246.636,36	330.000,00	11	4.312,73
bliBL	218.000,00	262.916,67	330.000,00	12	3.971,00
bliBT	218.000,00	262.800,00	330.000,00	15	3.146,33
24-41-NRWN-04					
BT	342.000,00	348.857,14	354.000,00	7	6.937,57
graspBL	376.000,00	376.000,00	376.000,00	5	3.508,60
graspBT	374.000,00	374.000,00	374.000,00	5	8.845,60

(continua)

Tabela 8 – Informações sobre as soluções dos testes para cada algoritmo e cada sistema teste no PERTE

(continuação)

	Melhor valor (US\$×10 ³)	Média (US\$×10 ³)	Pior valor (US\$×10 ³)	Soluções factíveis	Número de PLs (média)
bliBL	376.000,00	376.000,00	376.000,00	5	10.009,80
bliBT	342.000,00	342.000,00	342.000,00	5	9.523,00
24-41-WRNN-01					
BT	1.321.000,00	1.380.384,62	1.437.000,00	13	4.363,31
graspBL	1.325.000,00	1.368.615,38	1.412.000,00	13	1.248,92
graspBT	1.397.000,00	1.434.307,69	1.495.000,00	13	4.172,08
bliBL	1.388.000,00	1.433.307,69	1.495.000,00	13	4.433,00
bliBT	1.348.000,00	1.392.076,92	1.469.000,00	13	4.202,69
24-41-WRWN-01					
BT	152.000,00	152.000,00	152.000,00	20	2.379,70
graspBL	152.000,00	152.000,00	152.000,00	20	866,10
graspBT	152.000,00	152.000,00	152.000,00	20	2.416,45
bliBL	152.000,00	152.000,00	152.000,00	19	2.544,84
bliBT	152.000,00	152.000,00	152.000,00	20	2.354,95
46-79-NRNN-01					
BT	491.698,00	506.167,00	519.621,00	11	7.321,55
graspBL	491.186,00	508.544,55	527.138,00	11	1.656,73
graspBT	495.264,00	519.313,08	531.741,00	13	5.527,08
bliBL	494.712,00	527.055,54	544.432,00	13	5.884,15
bliBT	496.959,00	513.783,80	542.219,00	10	7.472,20
46-79-NRWN-01					
BT	163.171,00	163.171,00	163.171,00	20	3.326,65
graspBL	163.769,00	164.905,00	166.041,00	10	1.164,10

(continua)

Tabela 8 – Informações sobre as soluções dos testes para cada algoritmo e cada sistema teste no PERTE

(continuação)

	Melhor valor (US\$×10 ³)	Média (US\$×10 ³)	Pior valor (US\$×10 ³)	Soluções factíveis	Número de PLs (média)
graspBT	163.171,00	165.276,40	166.680,00	20	3.276,00
bliBL	163.171,00	165.601,70	166.680,00	20	3.274,85
bliBT	163.171,00	163.171,00	163.171,00	20	3.179,45
46-79-WRNN-01					
BT	446.840,00	461.054,68	479.300,00	19	3.913,79
graspBL	417.229,00	435.601,30	460.569,00	20	532,05
graspBT	414.042,00	448.316,40	472.223,00	20	3.810,60
bliBL	417.229,00	461.383,50	477.724,00	20	3.817,20
bliBT	417.229,00	457.031,20	482.802,00	20	3.735,05
46-79-WRWN-01					
BT	72.870,00	82.814,75	94.004,00	16	4.323,38
graspBL	94.004,00	94.004,00	94.004,00	17	654,47
graspBT	94.004,00	94.004,00	94.004,00	20	3.431,30
bliBL	94.004,00	94.004,00	94.004,00	20	3.355,75
bliBT	72.870,00	84.995,67	90.748,00	18	3.583,56
79-143-NRNN-01					
BT	2.932.400,00	3.147.069,23	3.389.900,00	13	25.713,08
graspBL	3.015.800,00	3.232.864,29	3.455.600,00	14	5.008,43
graspBT	3.024.300,00	3.234.623,08	3.565.000,00	13	18.593,77
bliBL	3.076.900,00	3.405.636,36	3.716.300,00	11	29.127,45
bliBT	3.082.100,00	3.319.435,71	3.501.700,00	14	21.235,21
79-143-NRWN-01					
BT	469.300,00	500.429,41	580.100,00	17	14.534,53

(continua)

Tabela 8 – Informações sobre as soluções dos testes para cada algoritmo e cada sistema teste no PERTE

(continuação)

	Melhor valor (US\$×10 ³)	Média (US\$×10 ³)	Pior valor (US\$×10 ³)	Soluções factíveis	Número de PLs (média)
graspBL	458.300,00	477.510,53	489.600,00	19	5.268,26
graspBT	469.300,00	502.670,00	615.300,00	10	24.560,80
bliBL	508.700,00	553.821,43	630.900,00	14	17.648,14
bliBT	466.500,00	481.678,57	502.600,00	14	16.760,57
79-143-WRNN-01					
BT	2.972.700,00	3.086.284,62	3.169.400,00	13	25.999,46
graspBL	2.903.600,00	3.043.050,00	3.351.300,00	14	6.069,71
graspBT	2.872.100,00	3.100.020,00	3.344.400,00	10	21.850,50
bliBL	2.948.000,00	3.137.560,00	3.571.200,00	10	32.135,70
bliBT	3.034.200,00	3.220.691,67	3.511.900,00	12	24.923,25
79-143-WRWN-01					
BT	339.300,00	360.540,00	390.300,00	10	24.216,40
graspBL	335.700,00	340.200,00	342.800,00	16	4.457,69
graspBT	342.800,00	373.984,62	442.700,00	13	18.814,46
bliBL	342.800,00	388.830,77	469.200,00	13	19.573,46
bliBT	336.300,00	345.520,00	364.500,00	10	24.152,70
87-183-NRNN-01					
BT	2.577.879,00	2.804.097,20	3.038.114,00	5	61.197,20
graspBL	2.680.051,00	2.706.064,67	2.722.808,00	3	17.085,67
graspBT	2.824.038,00	2.883.161,33	2.913.329,00	3	81.141,00
bliBL	2.873.363,00	2.973.188,67	3.047.468,00	6	50.104,33
bliBT	2.606.132,00	2.772.001,50	3.041.676,00	4	71.993,25
87-183-NRNN-02					

(continua)

Tabela 8 – Informações sobre as soluções dos testes para cada algoritmo e cada sistema teste no PERTE

(continuação)

	Melhor valor (US\$×10 ³)	Média (US\$×10 ³)	Pior valor (US\$×10 ³)	Soluções factíveis	Número de PLs (média)
BT	3.898.366,00	4.061.861,13	4.175.345,00	8	36.767,75
graspBL	3.867.233,00	3.960.054,80	4.041.898,00	5	5.836,00
graspBT	3.829.067,00	3.995.545,10	4.094.027,00	10	20.673,90
bliBL	3.970.626,00	4.071.303,91	4.094.027,00	11	26.022,00
bliBT	3.853.354,00	4.070.497,40	4.170.161,00	5	51.816,20
87-183-NRWN-01					
BT	1.702.105,00	1.737.727,73	1.786.992,00	15	16.984,27
graspBL	1.514.459,00	1.591.160,53	1.666.560,00	19	870,00
graspBT	1.536.734,00	1.664.851,91	1.871.615,00	11	20.457,36
bliBL	1.582.922,00	1.798.993,11	2.014.971,00	18	14.069,39
bliBT	1.534.288,00	1.729.068,00	1.856.526,00	11	22.216,00
87-183-NRWN-02					
BT	2.851.565,00	2.942.124,37	3.092.771,00	19	13.349,53
graspBL	2.849.927,00	2.891.025,22	3.023.073,00	18	982,89
graspBT	2.812.025,00	2.960.339,57	3.010.742,00	14	13.058,29
bliBL	2.959.092,00	3.059.311,50	3.129.512,00	18	12.488,11
bliBT	2.821.622,00	2.926.881,54	2.972.367,00	13	17.864,08
87-183-WRNN-01					
BT	1.889.951,00	1.920.244,00	1.942.006,00	4	81.551,75
graspBL	1.888.789,00	1.914.187,20	1.945.448,00	5	12.160,60
graspBT	1.909.653,00	1.920.654,00	1.940.543,00	4	69.957,75
bliBL	1.915.311,00	1.971.468,80	2.150.484,00	5	60.059,60
bliBT	1.845.094,00	1.916.712,40	1.966.931,00	5	57.409,60

(continua)

Tabela 8 – Informações sobre as soluções dos testes para cada algoritmo e cada sistema teste no PERTE

(continuação)

	Melhor valor (US\$×10 ³)	Média (US\$×10 ³)	Pior valor (US\$×10 ³)	Soluções factíveis	Número de PLs (média)
87-183-WRNN-02					
BT	3.126.123,00	3.208.939,00	3.276.504,00	17	18.666,12
graspBL	3.089.407,00	3.135.176,17	3.211.585,00	18	1.483,94
graspBT	3.039.761,00	3.180.856,42	3.332.884,00	19	12.157,42
bliBL	3.180.336,00	3.240.208,68	3.400.051,00	19	15.408,95
bliBT	2.901.069,00	3.147.301,35	3.397.231,00	20	13.937,55
87-183-WRWN-01					
BT	775.789,00	839.072,24	887.836,00	17	16.497,94
graspBL	792.122,00	815.016,94	836.054,00	18	1.372,83
graspBT	791.057,00	840.373,83	877.244,00	18	13.928,00
bliBL	792.122,00	854.633,20	896.334,00	20	13.132,05
bliBT	820.120,00	853.148,19	878.961,00	16	15.408,56
87-183-WRWN-02					
BT	1.924.812,00	2.131.516,00	2.302.137,00	14	18.932,79
graspBL	1.937.651,00	2.001.433,56	2.099.491,00	18	989,78
graspBT	1.958.301,00	2.110.084,20	2.216.989,00	15	13.560,13
bliBL	2.148.766,00	2.197.784,11	2.256.496,00	19	12.740,89
bliBT	1.890.936,00	2.009.544,69	2.143.139,00	13	18.273,54
93-155-NRNN-01					
BT	1.840.512,00	1.871.311,10	1.917.277,00	10	25.641,60
graspBL	1.817.142,00	1.823.244,43	1.845.745,00	14	2.014,36
graspBT	1.815.375,00	1.833.770,82	1.859.339,00	11	17.354,36
bliBL	1.812.960,00	1.850.994,93	1.910.648,00	15	16.060,67

(continua)

Tabela 8 – Informações sobre as soluções dos testes para cada algoritmo e cada sistema teste no PERTE

(continuação)

	Melhor valor (US\$×10 ³)	Média (US\$×10 ³)	Pior valor (US\$×10 ³)	Soluções factíveis	Número de PLs (média)
bliBT	1.826.979,00	1.832.089,50	1.865.150,00	10	22.204,70
93-155-NRNN-02					
BT	2.039.642,00	2.090.919,40	2.117.850,00	5	47.747,80
graspBL	2.040.753,00	2.071.201,33	2.107.095,00	3	15.952,67
graspBT	2.063.610,00	2.084.437,40	2.139.592,00	5	33.374,60
bliBL	2.069.023,00	2.106.617,00	2.146.492,00	4	58.161,50
bliBT	2.078.536,00	2.100.852,75	2.112.505,00	4	56.519,25
93-155-NRNN-03					
BT	2.278.001,00	2.313.207,30	2.364.828,00	10	23.138,10
graspBL	2.273.122,00	2.283.960,30	2.296.163,00	10	2.558,00
graspBT	2.255.559,00	2.289.689,60	2.366.199,00	10	13.165,30
bliBL	2.273.122,00	2.314.883,92	2.366.199,00	12	19.149,42
bliBT	2.308.246,00	2.349.146,56	2.365.727,00	9	24.690,33
93-155-NRWN-01					
BT	296.454,00	316.326,00	322.950,00	20	8.199,60
graspBL	316.440,00	316.440,00	316.440,00	20	570,50
graspBT	296.852,00	296.852,00	296.852,00	20	8.440,80
bliBL	316.440,00	321.648,00	322.950,00	20	8.031,40
bliBT	296.454,00	303.078,00	322.950,00	20	8.313,50
93-155-NRWN-02					
BT	443.494,00	466.403,89	493.046,00	18	9.181,72
graspBL	443.494,00	443.494,00	443.494,00	20	672,50
graspBT	443.494,00	443.494,00	443.494,00	20	8.238,05

(continua)

Tabela 8 – Informações sobre as soluções dos testes para cada algoritmo e cada sistema teste no PERTE

(continuação)

	Melhor valor (US\$×10 ³)	Média (US\$×10 ³)	Pior valor (US\$×10 ³)	Soluções factíveis	Número de PLs (média)
bliBL	443.494,00	443.494,00	443.494,00	20	8.199,55
bliBT	443.494,00	451.556,80	483.808,00	20	8.222,75
93-155-NRWN-03					
BT	653.988,00	672.438,10	691.203,00	10	16.119,00
graspBL	616.440,00	619.183,50	622.948,00	20	3.036,90
graspBT	651.532,00	672.079,55	684.603,00	11	14.235,00
bliBL	619.077,00	655.270,30	700.991,00	10	15.931,40
bliBT	668.530,00	680.515,80	691.203,00	10	15.849,10
93-155-WRNN-01					
BT	1.187.287,00	1.221.221,10	1.261.391,00	10	23.902,90
graspBL	1.163.503,00	1.175.743,64	1.194.483,00	11	3.610,73
graspBT	1.181.161,00	1.195.461,88	1.239.996,00	8	25.519,38
bliBL	1.181.161,00	1.211.097,14	1.274.018,00	14	17.192,00
bliBT	1.184.258,00	1.201.257,67	1.212.370,00	9	26.218,89
93-155-WRNN-02					
BT	1.298.813,00	1.327.360,15	1.345.843,00	13	17.890,00
graspBL	1.301.426,00	1.315.268,33	1.333.003,00	18	1.379,94
graspBT	1.291.447,00	1.318.749,06	1.405.480,00	16	11.655,06
bliBL	1.304.200,00	1.344.245,35	1.418.705,00	20	11.899,75
bliBT	1.307.505,00	1.347.076,69	1.450.527,00	16	14.222,75
93-155-WRNN-03					
BT	1.478.017,00	1.498.021,00	1.514.355,00	5	45.897,00
graspBL	1.408.963,00	1.436.681,60	1.458.014,00	5	8.575,60

(continua)

Tabela 8 – Informações sobre as soluções dos testes para cada algoritmo e cada sistema teste no PERTE

(continuação)

	Melhor valor (US\$×10 ³)	Média (US\$×10 ³)	Pior valor (US\$×10 ³)	Soluções factíveis	Número de PLs (média)
graspBT	1.411.388,00	1.449.406,80	1.481.789,00	5	33.222,80
bliBL	1.450.378,00	1.515.584,80	1.570.662,00	5	46.448,80
bliBT	1.433.430,00	1.477.935,25	1.538.304,00	4	57.436,75
93-155-WRWN-01					
BT	45.171,00	45.171,00	45.171,00	20	7.496,90
graspBL	89.898,00	89.898,00	89.898,00	20	606,70
graspBT	45.171,00	45.171,00	45.171,00	20	7.177,45
bliBL	89.898,00	89.898,00	89.898,00	20	7.941,70
bliBT	45.171,00	45.171,00	45.171,00	20	8.425,65
93-155-WRWN-02					
BT	134.202,00	135.495,75	135.927,00	20	7.856,75
graspBL	181.378,00	181.378,00	181.378,00	20	364,00
graspBT	116.316,00	121.650,00	135.927,00	20	7.621,55
bliBL	150.208,00	172.859,00	181.378,00	7	22.858,00
bliBT	134.202,00	135.064,50	135.927,00	20	8.345,25
93-155-WRWN-03					
BT	163.315,00	168.498,61	170.645,00	18	8.434,28
graspBL	161.590,00	162.659,78	166.404,00	18	554,94
graspBT	160.325,00	160.632,42	162.847,00	19	7.904,53
bliBL	168.474,00	184.425,80	189.305,00	20	7.887,00
bliBT	158.600,00	167.812,60	183.103,00	15	10.282,93

Fonte: O autor.

A.2 MELHORES RESULTADOS PARA O PROBLEMA PERTES

Tabela 9 – Melhores soluções encontradas para o PERTES.

Sistema teste	Melhor valor (US\$ $\times 10^3$)	Melhor solução
06-15-NRNN-01	409	$n_{1,5} = 2, n_{2,3} = 1, n_{2,5} = 1, n_{2,6} = 4, n_{3,5} = 3, n_{3,6} = 1, n_{4,6} = 3$
06-15-NRWN-01	250	$n_{2,6} = 4, n_{3,5} = 2, n_{4,6} = 3$
06-15-WRNN-01	240	$n_{2,6} = 3, n_{3,5} = 3, n_{4,6} = 3$
06-15-WRWN-01	160	$n_{2,6} = 1, n_{3,5} = 2, n_{4,6} = 3$
24-41-NRNN-01	2.452.000	$n_{1,2} = 1, n_{1,5} = 3, n_{2,4} = 1, n_{3,9} = 3, n_{3,24} = 3, n_{4,9} = 2, n_{5,10} = 1, n_{6,10} = 3, n_{7,8} = 3, n_{9,11} = 1, n_{9,12} = 1, n_{10,11} = 1, n_{10,12} = 2, n_{11,13} = 1, n_{12,13} = 2, n_{13,23} = 1, n_{14,16} = 2, n_{15,21} = 3, n_{15,24} = 3, n_{16,17} = 3, n_{16,19} = 3, n_{17,18} = 3, n_{17,22} = 1, n_{18,21} = 2, n_{19,20} = 1, n_{20,23} = 1, n_{21,22} = 2, n_{2,8} = 1, n_{6,7} = 1$
24-41-NRNN-02	2.531.000	$n_{1,2} = 1, n_{1,5} = 2, n_{2,4} = 1, n_{3,9} = 1, n_{3,24} = 3, n_{4,9} = 2, n_{5,10} = 1, n_{6,10} = 3, n_{7,8} = 3, n_{9,11} = 2, n_{9,12} = 1, n_{10,11} = 3, n_{11,13} = 2, n_{11,14} = 2, n_{12,13} = 1, n_{13,23} = 1, n_{14,16} = 3, n_{15,16} = 1, n_{15,21} = 3, n_{15,24} = 2, n_{16,17} = 3, n_{16,19} = 1, n_{17,18} = 2, n_{17,22} = 2, n_{18,21} = 1, n_{20,23} = 2, n_{21,22} = 1, n_{2,8} = 1, n_{6,7} = 1, n_{19,23} = 1$
24-41-NRNN-03	2.460.000	$n_{1,2} = 2, n_{1,5} = 3, n_{2,4} = 1, n_{2,6} = 1, n_{3,9} = 1, n_{3,24} = 2, n_{4,9} = 2, n_{6,10} = 2, n_{7,8} = 3, n_{9,11} = 3, n_{10,11} = 2, n_{10,12} = 1, n_{11,13} = 2, n_{11,14} = 1, n_{12,23} = 1, n_{14,16} = 1, n_{15,16} = 1, n_{15,21} = 3, n_{15,24} = 2, n_{16,17} = 1, n_{16,19} = 1, n_{17,18} = 1, n_{18,21} = 2, n_{19,20} = 1, n_{20,23} = 3, n_{21,22} = 3, n_{2,8} = 1, n_{6,7} = 1, n_{13,14} = 1, n_{14,23} = 3$
24-41-NRNN-04	2.464.000	$n_{1,2} = 1, n_{1,5} = 2, n_{2,4} = 1, n_{3,9} = 1, n_{3,24} = 3, n_{4,9} = 2, n_{5,10} = 1, n_{6,10} = 3, n_{7,8} = 3, n_{9,12} = 2, n_{10,11} = 3, n_{11,13} = 2, n_{11,14} = 1, n_{12,13} = 1, n_{12,23} = 1, n_{14,16} = 1, n_{15,16} = 1, n_{15,21} = 3, n_{15,24} = 2, n_{16,17} = 2, n_{16,19} = 2, n_{17,18} = 1, n_{17,22} = 1, n_{18,21} = 2, n_{19,20} = 1, n_{20,23} = 1, n_{21,22} = 2, n_{2,8} = 1, n_{6,7} = 1, n_{13,14} = 1, n_{14,23} = 2$

(continua)

Tabela 9 – Melhores soluções encontradas para o PERTES.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$ $\times 10^3$)	Melhor solução
24-41-NRWN-01	900.000	$n_{1,5} = 1, n_{2,4} = 1, n_{3,9} = 1, n_{3,24} = 2, n_{6,10} = 1, n_{7,8} = 3, n_{10,11} = 1, n_{14,16} = 1, n_{15,16} = 1, n_{15,21} = 1, n_{15,24} = 1, n_{16,17} = 2, n_{16,19} = 2, n_{17,18} = 2, n_{21,22} = 1, n_{6,7} = 1, n_{13,14} = 1$
24-41-NRWN-02	853.000	$n_{1,5} = 1, n_{2,4} = 1, n_{3,24} = 2, n_{6,10} = 2, n_{7,8} = 2, n_{10,11} = 1, n_{11,14} = 1, n_{14,16} = 2, n_{15,21} = 1, n_{15,24} = 2, n_{16,17} = 2, n_{17,18} = 2, n_{21,22} = 1$
24-41-NRWN-03	689.000	$n_{1,5} = 1, n_{3,24} = 1, n_{4,9} = 1, n_{6,10} = 2, n_{7,8} = 3, n_{10,12} = 1, n_{12,23} = 1, n_{15,21} = 1, n_{15,24} = 1, n_{20,23} = 1, n_{21,22} = 1, n_{13,14} = 1$
24-41-NRWN-04	761.000	$n_{1,5} = 1, n_{3,24} = 2, n_{4,9} = 1, n_{6,10} = 2, n_{7,8} = 3, n_{10,12} = 1, n_{12,13} = 1, n_{14,16} = 1, n_{15,21} = 1, n_{15,24} = 1, n_{16,17} = 1, n_{20,23} = 1, n_{21,22} = 1, n_{13,14} = 1$
24-41-WRNN-01	1.664.000	$n_{1,5} = 2, n_{2,4} = 1, n_{3,9} = 1, n_{3,24} = 2, n_{4,9} = 2, n_{5,10} = 1, n_{6,10} = 3, n_{7,8} = 2, n_{9,11} = 2, n_{10,11} = 2, n_{10,12} = 1, n_{11,13} = 1, n_{11,14} = 2, n_{12,13} = 1, n_{14,16} = 1, n_{15,16} = 1, n_{15,21} = 2, n_{15,24} = 2, n_{16,17} = 1, n_{16,19} = 1, n_{17,18} = 1, n_{19,20} = 1, n_{20,23} = 2, n_{1,8} = 1, n_{2,8} = 1, n_{14,23} = 2$
24-41-WRWN-01	341.000	$n_{2,4} = 1, n_{3,9} = 1, n_{5,10} = 1, n_{6,10} = 2, n_{7,8} = 1, n_{10,12} = 1, n_{12,13} = 1, n_{14,16} = 1, n_{16,17} = 1$
46-79-NRNN-01	747.188	$n_{5,8} = 1, n_{4,5} = 2, n_{2,5} = 3, n_{8,13} = 1, n_{12,14} = 3, n_{13,20} = 1, n_{19,21} = 2, n_{16,17} = 1, n_{17,19} = 2, n_{14,22} = 2, n_{22,26} = 2, n_{20,23} = 1, n_{23,24} = 2, n_{26,27} = 1, n_{24,33} = 1, n_{33,34} = 1, n_{27,36} = 1, n_{36,37} = 1, n_{34,35} = 1, n_{35,38} = 1, n_{37,39} = 1, n_{37,40} = 2, n_{39,42} = 1, n_{38,42} = 2, n_{32,43} = 3, n_{42,44} = 1, n_{44,45} = 1, n_{19,32} = 1, n_{46,16} = 2, n_{20,21} = 3, n_{42,43} = 4, n_{14,15} = 1, n_{46,6} = 2, n_{16,28} = 1, n_{19,25} = 1, n_{21,25} = 1, n_{31,32} = 1, n_{28,31} = 1, n_{40,45} = 1, n_{15,16} = 1, n_{24,25} = 3, n_{5,6} = 3$

(continua)

Tabela 9 – Melhores soluções encontradas para o PERTES.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
46-79-NRWN-01	299.853	$n_{2,5} = 1, n_{12,14} = 1, n_{19,21} = 1, n_{17,19} = 1, n_{14,26} = 1, n_{20,23} = 1, n_{35,38} = 1, n_{20,21} = 2, n_{42,43} = 2, n_{46,6} = 2, n_{21,25} = 1, n_{31,32} = 1, n_{28,31} = 2, n_{31,41} = 1, n_{41,43} = 1, n_{40,45} = 1, n_{24,25} = 2, n_{40,41} = 1, n_{5,6} = 3$
46-79-WRNN-01	619.742	$n_{5,8} = 1, n_{4,5} = 2, n_{2,5} = 3, n_{8,13} = 1, n_{12,14} = 3, n_{13,20} = 1, n_{19,21} = 2, n_{17,19} = 2, n_{14,22} = 1, n_{22,26} = 1, n_{20,23} = 1, n_{23,24} = 2, n_{26,27} = 1, n_{24,33} = 1, n_{33,34} = 1, n_{27,36} = 1, n_{36,37} = 1, n_{34,35} = 2, n_{37,39} = 1, n_{37,40} = 2, n_{40,42} = 1, n_{38,42} = 2, n_{32,43} = 2, n_{42,44} = 1, n_{44,45} = 1, n_{46,16} = 2, n_{20,21} = 3, n_{42,43} = 4, n_{46,6} = 2, n_{19,25} = 1, n_{21,25} = 1, n_{31,32} = 2, n_{28,31} = 2, n_{40,45} = 1, n_{24,25} = 2, n_{5,6} = 3$
46-79-WRWN-01	228.158	$n_{12,14} = 1, n_{19,21} = 1, n_{20,21} = 2, n_{42,43} = 2, n_{46,6} = 1, n_{46,3} = 1, n_{21,25} = 1, n_{28,31} = 1, n_{31,41} = 1, n_{41,43} = 1, n_{40,45} = 1, n_{24,25} = 1, n_{2,3} = 1, n_{5,6} = 1$

(continua)

Tabela 9 – Melhores soluções encontradas para o PERTES.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
79-143-NRNN-01	3.927.700	$n_{1,2} = 1, n_{1,3} = 1, n_{2,11} = 2, n_{3,14} = 2, n_{5,8} = 2,$ $n_{5,19} = 2, n_{6,7} = 2, n_{6,8} = 2, n_{14,31} = 2, n_{14,47} = 1,$ $n_{14,73} = 2, n_{14,74} = 2, n_{15,4} = 2, n_{15,16} = 2,$ $n_{16,18} = 1, n_{16,19} = 2, n_{17,20} = 1, n_{17,22} = 3,$ $n_{17,30} = 1, n_{18,19} = 1, n_{19,22} = 2, n_{19,24} = 1,$ $n_{20,30} = 1, n_{21,20} = 2, n_{21,23} = 1, n_{22,30} = 1,$ $n_{23,25} = 1, n_{23,26} = 1, n_{24,9} = 4, n_{24,70} = 1,$ $n_{25,34} = 3, n_{25,60} = 2, n_{25,62} = 1, n_{26,27} = 1,$ $n_{26,29} = 3, n_{27,28} = 1, n_{28,33} = 1, n_{29,31} = 2,$ $n_{30,29} = 1, n_{30,68} = 1, n_{30,70} = 2, n_{31,32} = 1,$ $n_{32,35} = 1, n_{33,41} = 1, n_{34,56} = 1, n_{34,79} = 4,$ $n_{35,38} = 1, n_{35,55} = 1, n_{38,39} = 1, n_{38,41} = 1,$ $n_{38,55} = 1, n_{39,55} = 1, n_{40,41} = 2, n_{40,56} = 1,$ $n_{40,72} = 1, n_{42,47} = 2, n_{43,49} = 3, n_{43,50} = 1,$ $n_{43,55} = 4, n_{45,54} = 1, n_{45,57} = 1, n_{45,64} = 1,$ $n_{45,71} = 4, n_{45,79} = 4, n_{46,48} = 3, n_{47,37} = 1,$ $n_{48,51} = 2, n_{48,71} = 4, n_{49,66} = 1, n_{50,57} = 1,$ $n_{52,53} = 2, n_{54,67} = 2, n_{54,71} = 1, n_{57,77} = 1,$ $n_{58,59} = 2, n_{59,53} = 3, n_{59,67} = 2, n_{62,61} = 3,$ $n_{62,64} = 2, n_{63,64} = 3, n_{64,65} = 3, n_{69,70} = 1,$ $n_{69,72} = 2, n_{71,66} = 2, n_{73,22} = 3, n_{73,37} = 1,$ $n_{73,68} = 1, n_{73,70} = 1, n_{74,11} = 2, n_{77,78} = 1,$ $n_{78,79} = 1$
79-143-NRWN-01	849.200	$n_{5,19} = 1, n_{14,73} = 1, n_{14,74} = 1, n_{15,4} = 1,$ $n_{16,18} = 1, n_{18,19} = 1, n_{21,20} = 2, n_{21,23} = 1,$ $n_{24,9} = 3, n_{25,26} = 1, n_{25,60} = 1, n_{26,29} = 1,$ $n_{30,29} = 2, n_{34,56} = 2, n_{34,64} = 1, n_{35,38} = 1,$ $n_{38,41} = 2, n_{40,41} = 1, n_{40,56} = 2, n_{48,51} = 2,$ $n_{48,71} = 3, n_{49,51} = 1, n_{49,66} = 1, n_{54,58} = 1,$ $n_{54,67} = 1, n_{57,66} = 1, n_{58,59} = 1, n_{59,53} = 2,$ $n_{59,67} = 1, n_{62,61} = 2, n_{62,64} = 1, n_{64,65} = 1$

(continua)

Tabela 9 – Melhores soluções encontradas para o PERTES.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
79-143-WRNN-01	3.808.200	$n_{2,11} = 2, n_{3,14} = 3, n_{5,8} = 1, n_{5,19} = 1, n_{6,7} = 1,$ $n_{6,8} = 1, n_{7,9} = 1, n_{11,12} = 1, n_{12,13} = 1, n_{14,31} = 4,$ $n_{14,42} = 1, n_{14,47} = 2, n_{14,73} = 2, n_{14,74} = 1,$ $n_{15,4} = 1, n_{15,16} = 2, n_{16,17} = 1, n_{16,18} = 1,$ $n_{16,19} = 2, n_{17,20} = 1, n_{17,22} = 2, n_{17,30} = 2,$ $n_{18,19} = 1, n_{19,22} = 1, n_{19,24} = 2, n_{21,20} = 1,$ $n_{21,23} = 2, n_{21,26} = 2, n_{22,30} = 1, n_{23,25} = 1,$ $n_{23,26} = 1, n_{24,9} = 3, n_{24,13} = 2, n_{24,70} = 2,$ $n_{25,34} = 2, n_{25,60} = 2, n_{25,62} = 1, n_{26,29} = 4,$ $n_{28,33} = 1, n_{29,31} = 4, n_{30,68} = 1, n_{30,70} = 1,$ $n_{31,32} = 1, n_{32,35} = 2, n_{33,41} = 1, n_{34,79} = 3,$ $n_{35,38} = 2, n_{35,55} = 1, n_{38,41} = 1, n_{40,41} = 1,$ $n_{40,56} = 2, n_{40,72} = 1, n_{41,43} = 1, n_{42,46} = 2,$ $n_{42,47} = 2, n_{42,48} = 1, n_{43,49} = 2, n_{43,50} = 1,$ $n_{43,55} = 1, n_{45,54} = 1, n_{45,57} = 1, n_{45,64} = 1,$ $n_{45,71} = 3, n_{45,79} = 3, n_{46,48} = 3, n_{47,37} = 1,$ $n_{48,51} = 1, n_{48,71} = 12, n_{49,52} = 1, n_{50,57} = 1,$ $n_{52,53} = 1, n_{54,67} = 1, n_{54,71} = 1, n_{58,59} = 1,$ $n_{59,53} = 3, n_{59,67} = 1, n_{62,61} = 3, n_{62,64} = 1,$ $n_{63,64} = 3, n_{64,65} = 3, n_{69,70} = 1, n_{69,72} = 2,$ $n_{71,66} = 3, n_{73,22} = 2, n_{73,37} = 1, n_{73,68} = 1,$ $n_{73,70} = 1, n_{74,11} = 1, n_{77,78} = 2, n_{78,79} = 2$
79-143-WRWN-01	678.500	$n_{14,73} = 1, n_{14,74} = 1, n_{16,19} = 1, n_{21,20} = 1,$ $n_{24,9} = 3, n_{25,26} = 2, n_{26,29} = 1, n_{29,31} = 1,$ $n_{30,29} = 1, n_{34,56} = 1, n_{35,36} = 1, n_{40,56} = 1,$ $n_{48,71} = 8, n_{49,66} = 1, n_{57,66} = 1, n_{58,59} = 1,$ $n_{59,53} = 1, n_{59,67} = 1, n_{62,61} = 3, n_{62,64} = 1,$ $n_{63,64} = 1, n_{64,65} = 1$

(continua)

Tabela 9 – Melhores soluções encontradas para o PERTES.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$ $\times 10^3$)	Melhor solução
87-183-NRNN-01	3.762.319	$n_{1,2} = 3, n_{2,60} = 2, n_{2,87} = 1, n_{4,60} = 2, n_{4,81} = 1,$ $n_{4,87} = 1, n_{5,6} = 1, n_{5,56} = 2, n_{5,58} = 2, n_{5,60} = 3,$ $n_{6,7} = 1, n_{6,37} = 1, n_{7,8} = 1, n_{8,53} = 1, n_{9,10} = 2,$ $n_{10,11} = 2, n_{11,12} = 1, n_{11,17} = 2, n_{11,53} = 1,$ $n_{12,13} = 2, n_{12,15} = 2, n_{12,17} = 1, n_{12,35} = 3,$ $n_{13,14} = 2, n_{13,15} = 2, n_{13,17} = 1, n_{13,45} = 2,$ $n_{14,59} = 2, n_{15,16} = 3, n_{15,45} = 1, n_{15,46} = 2,$ $n_{16,44} = 8, n_{16,45} = 1, n_{16,61} = 1, n_{16,77} = 2,$ $n_{17,18} = 4, n_{18,50} = 11, n_{18,59} = 1, n_{18,74} = 3,$ $n_{19,20} = 2, n_{20,21} = 1, n_{20,56} = 1, n_{21,57} = 2,$ $n_{22,23} = 2, n_{22,37} = 1, n_{22,58} = 2, n_{24,43} = 2,$ $n_{25,55} = 4, n_{26,29} = 2, n_{26,54} = 1, n_{27,28} = 2,$ $n_{27,53} = 2, n_{29,30} = 2, n_{30,31} = 2, n_{30,63} = 2,$ $n_{34,39} = 1, n_{34,41} = 1, n_{35,51} = 2, n_{36,39} = 2,$ $n_{36,46} = 4, n_{40,45} = 3, n_{41,64} = 3, n_{42,44} = 4,$ $n_{42,85} = 2, n_{43,55} = 2, n_{43,58} = 2, n_{48,49} = 1,$ $n_{48,50} = 4, n_{49,50} = 4, n_{51,52} = 2, n_{52,59} = 2,$ $n_{53,54} = 1, n_{54,55} = 1, n_{54,63} = 1, n_{54,79} = 1,$ $n_{56,57} = 2, n_{58,78} = 1, n_{61,64} = 1, n_{61,85} = 3,$ $n_{63,64} = 1, n_{67,69} = 1, n_{67,71} = 3, n_{68,69} = 1,$ $n_{68,83} = 2, n_{69,87} = 1, n_{71,72} = 1, n_{71,83} = 1,$ $n_{72,73} = 1, n_{73,74} = 1, n_{77,79} = 1, n_{78,79} = 1,$ $n_{78,80} = 1, n_{80,81} = 1, n_{81,83} = 2$

(continua)

Tabela 9 – Melhores soluções encontradas para o PERTES.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
87-183-NRNN-02	5.154.873	$n_{1,2} = 4, n_{2,4} = 1, n_{2,60} = 2, n_{4,5} = 1, n_{4,60} = 1,$ $n_{4,68} = 1, n_{4,69} = 1, n_{4,81} = 5, n_{5,56} = 3, n_{5,58} = 2,$ $n_{5,60} = 3, n_{5,80} = 1, n_{6,37} = 2, n_{6,75} = 2, n_{7,8} = 2,$ $n_{8,9} = 1, n_{8,53} = 1, n_{9,10} = 1, n_{10,11} = 1, n_{11,12} = 1,$ $n_{11,15} = 1, n_{11,17} = 1, n_{11,53} = 1, n_{12,13} = 3,$ $n_{12,15} = 2, n_{12,17} = 3, n_{12,35} = 2, n_{13,14} = 1,$ $n_{13,15} = 2, n_{13,45} = 2, n_{13,59} = 1, n_{14,45} = 1,$ $n_{14,59} = 1, n_{15,16} = 4, n_{15,45} = 1, n_{15,46} = 2,$ $n_{16,44} = 11, n_{16,45} = 1, n_{16,61} = 2, n_{16,77} = 3,$ $n_{17,18} = 4, n_{18,50} = 16, n_{18,59} = 1, n_{18,74} = 4,$ $n_{19,20} = 2, n_{20,21} = 1, n_{20,56} = 1, n_{21,57} = 3,$ $n_{22,23} = 1, n_{22,58} = 3, n_{23,24} = 1, n_{24,43} = 2,$ $n_{25,26} = 1, n_{25,55} = 5, n_{26,29} = 1, n_{26,54} = 1,$ $n_{27,28} = 1, n_{27,53} = 2, n_{28,35} = 2, n_{29,30} = 1,$ $n_{30,31} = 3, n_{30,63} = 3, n_{31,34} = 2, n_{34,39} = 1,$ $n_{34,41} = 1, n_{35,51} = 4, n_{36,46} = 3, n_{39,42} = 1,$ $n_{39,86} = 1, n_{40,45} = 4, n_{41,64} = 3, n_{42,44} = 2,$ $n_{42,85} = 2, n_{43,55} = 1, n_{43,58} = 2, n_{48,49} = 1,$ $n_{48,50} = 4, n_{49,50} = 6, n_{51,52} = 2, n_{52,59} = 3,$ $n_{53,54} = 1, n_{54,55} = 2, n_{54,63} = 2, n_{54,79} = 3,$ $n_{56,57} = 2, n_{58,78} = 1, n_{61,64} = 1, n_{61,85} = 4,$ $n_{61,86} = 1, n_{63,64} = 1, n_{67,69} = 1, n_{67,71} = 3,$ $n_{68,83} = 1, n_{71,75} = 1, n_{71,83} = 1, n_{72,73} = 1,$ $n_{72,83} = 1, n_{73,74} = 2, n_{73,75} = 1, n_{77,79} = 1,$ $n_{78,79} = 2, n_{78,80} = 3, n_{80,81} = 1, n_{80,83} = 1,$ $n_{81,83} = 2$

(continua)

Tabela 9 – Melhores soluções encontradas para o PERTES.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$ $\times 10^3$)	Melhor solução
87-183-NRWN-01	2.494.013	$n_{1,2} = 1, n_{2,60} = 2, n_{4,60} = 1, n_{5,56} = 1, n_{5,58} = 2,$ $n_{5,60} = 3, n_{8,73} = 2, n_{9,10} = 1, n_{10,11} = 1, n_{11,12} = 1,$ $n_{12,17} = 1, n_{13,14} = 1, n_{13,15} = 3, n_{13,17} = 1,$ $n_{14,59} = 1, n_{15,16} = 1, n_{15,45} = 1, n_{16,44} = 3,$ $n_{16,45} = 1, n_{16,61} = 1, n_{17,18} = 2, n_{18,50} = 6,$ $n_{18,74} = 3, n_{19,20} = 1, n_{20,21} = 1, n_{20,38} = 1,$ $n_{21,57} = 1, n_{24,43} = 1, n_{25,55} = 3, n_{26,54} = 2,$ $n_{30,31} = 1, n_{30,63} = 2, n_{31,34} = 1, n_{36,46} = 1,$ $n_{39,86} = 2, n_{40,45} = 2, n_{41,64} = 3, n_{42,85} = 1,$ $n_{43,55} = 2, n_{43,58} = 2, n_{49,50} = 3, n_{52,59} = 1,$ $n_{53,86} = 1, n_{54,63} = 2, n_{54,79} = 3, n_{56,57} = 1,$ $n_{61,64} = 1, n_{61,85} = 3, n_{61,86} = 1, n_{63,64} = 1,$ $n_{67,68} = 1, n_{67,69} = 1, n_{67,71} = 1, n_{68,69} = 2,$ $n_{68,83} = 3, n_{69,87} = 1, n_{71,83} = 1, n_{72,73} = 1,$ $n_{72,83} = 1, n_{73,74} = 1, n_{78,79} = 1, n_{78,80} = 1,$ $n_{80,83} = 1$
87-183-NRWN-02	3.951.174	$n_{1,2} = 2, n_{2,60} = 1, n_{2,87} = 1, n_{3,83} = 1, n_{3,87} = 2,$ $n_{4,68} = 1, n_{4,69} = 1, n_{4,81} = 5, n_{5,56} = 2, n_{5,58} = 1,$ $n_{5,60} = 1, n_{5,80} = 1, n_{11,12} = 1, n_{12,13} = 1,$ $n_{12,15} = 1, n_{13,14} = 1, n_{13,15} = 4, n_{13,59} = 1,$ $n_{14,17} = 1, n_{15,16} = 4, n_{15,45} = 1, n_{15,46} = 1,$ $n_{16,44} = 6, n_{16,61} = 2, n_{17,18} = 1, n_{18,50} = 11,$ $n_{18,74} = 5, n_{21,57} = 3, n_{22,23} = 1, n_{22,58} = 3,$ $n_{23,24} = 1, n_{24,43} = 1, n_{25,55} = 4, n_{26,54} = 1,$ $n_{30,31} = 2, n_{30,63} = 3, n_{35,47} = 1, n_{36,46} = 2,$ $n_{40,45} = 2, n_{40,46} = 1, n_{41,64} = 4, n_{43,55} = 2,$ $n_{43,58} = 2, n_{48,49} = 1, n_{49,50} = 4, n_{52,59} = 2,$ $n_{53,54} = 1, n_{54,55} = 1, n_{54,63} = 3, n_{54,79} = 3,$ $n_{56,57} = 2, n_{58,78} = 2, n_{61,85} = 4, n_{63,64} = 2,$ $n_{67,69} = 1, n_{67,71} = 3, n_{68,83} = 1, n_{71,72} = 1,$ $n_{71,83} = 1, n_{72,73} = 1, n_{73,74} = 3, n_{73,75} = 2,$ $n_{75,81} = 1, n_{75,83} = 1, n_{78,79} = 1, n_{78,80} = 2,$ $n_{80,81} = 1, n_{80,83} = 1, n_{81,83} = 2$

(continua)

Tabela 9 – Melhores soluções encontradas para o PERTES.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
87-183-WRNN-01	2.348.511	$n_{1,2} = 3, n_{4,5} = 1, n_{4,69} = 1, n_{5,56} = 2, n_{5,58} = 3,$ $n_{5,68} = 2, n_{7,8} = 2, n_{8,53} = 1, n_{9,10} = 1, n_{10,11} = 2,$ $n_{11,12} = 2, n_{11,17} = 1, n_{11,53} = 1, n_{12,13} = 2,$ $n_{12,15} = 1, n_{12,17} = 3, n_{12,35} = 3, n_{13,14} = 2,$ $n_{13,15} = 4, n_{13,17} = 1, n_{14,45} = 1, n_{14,59} = 2,$ $n_{15,16} = 4, n_{15,45} = 1, n_{15,46} = 2, n_{16,44} = 8,$ $n_{16,45} = 1, n_{16,61} = 2, n_{17,18} = 5, n_{18,50} = 11,$ $n_{18,59} = 1, n_{19,20} = 2, n_{20,21} = 2, n_{20,56} = 1,$ $n_{21,57} = 2, n_{22,23} = 2, n_{22,58} = 2, n_{24,43} = 2,$ $n_{25,55} = 4, n_{26,54} = 2, n_{27,28} = 2, n_{27,53} = 2,$ $n_{29,30} = 2, n_{30,31} = 2, n_{30,63} = 2, n_{34,41} = 2,$ $n_{35,51} = 3, n_{36,46} = 3, n_{39,42} = 1, n_{39,86} = 1,$ $n_{40,45} = 3, n_{40,46} = 1, n_{41,64} = 3, n_{42,44} = 2,$ $n_{42,85} = 1, n_{43,55} = 2, n_{43,58} = 2, n_{48,49} = 1,$ $n_{48,50} = 4, n_{49,50} = 4, n_{51,52} = 2, n_{52,59} = 2,$ $n_{53,54} = 1, n_{54,55} = 1, n_{54,63} = 1, n_{56,57} = 2,$ $n_{61,64} = 1, n_{61,85} = 3, n_{61,86} = 1, n_{63,64} = 1,$ $n_{68,69} = 1$
87-183-WRNN-02	3.752.581	$n_{1,2} = 4, n_{4,5} = 3, n_{4,81} = 3, n_{5,56} = 3, n_{5,58} = 3,$ $n_{5,68} = 1, n_{7,8} = 2, n_{9,10} = 1, n_{10,11} = 1, n_{11,15} = 1,$ $n_{11,17} = 2, n_{11,53} = 1, n_{12,15} = 1, n_{12,17} = 5,$ $n_{12,35} = 2, n_{13,14} = 2, n_{13,15} = 3, n_{13,45} = 2,$ $n_{14,59} = 2, n_{15,16} = 4, n_{15,46} = 2, n_{16,44} = 11,$ $n_{16,45} = 1, n_{16,61} = 2, n_{16,77} = 2, n_{17,18} = 8,$ $n_{17,59} = 1, n_{18,50} = 16, n_{19,20} = 2, n_{20,21} = 1,$ $n_{20,56} = 1, n_{21,57} = 3, n_{22,23} = 1, n_{22,58} = 3,$ $n_{23,24} = 1, n_{24,43} = 2, n_{25,55} = 5, n_{26,29} = 2,$ $n_{26,54} = 1, n_{27,28} = 2, n_{27,53} = 2, n_{28,35} = 1,$ $n_{29,30} = 1, n_{30,31} = 3, n_{30,63} = 2, n_{34,39} = 1,$ $n_{34,41} = 1, n_{35,51} = 2, n_{36,46} = 3, n_{39,42} = 1,$ $n_{39,86} = 1, n_{40,45} = 4, n_{41,64} = 4, n_{42,44} = 2,$ $n_{42,85} = 2, n_{43,55} = 2, n_{43,58} = 2, n_{48,49} = 1,$ $n_{48,50} = 4, n_{49,50} = 6, n_{51,52} = 2, n_{52,59} = 3,$ $n_{53,54} = 1, n_{53,76} = 1, n_{54,55} = 2, n_{54,63} = 2,$ $n_{54,79} = 3, n_{56,57} = 2, n_{61,64} = 1, n_{61,85} = 4,$ $n_{61,86} = 1, n_{63,64} = 2, n_{67,69} = 1, n_{67,71} = 2,$ $n_{71,75} = 1, n_{75,76} = 1, n_{76,77} = 1, n_{78,79} = 1,$ $n_{78,80} = 1, n_{80,81} = 1$

(continua)

Tabela 9 – Melhores soluções encontradas para o PERTES.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$ $\times 10^3$)	Melhor solução
87-183-WRWN-01	1.172.772	$n_{1,2} = 1, n_{4,5} = 1, n_{4,69} = 1, n_{5,56} = 2, n_{5,58} = 2,$ $n_{5,68} = 1, n_{12,17} = 1, n_{13,15} = 3, n_{13,17} = 2,$ $n_{14,59} = 1, n_{15,16} = 2, n_{15,45} = 1, n_{16,44} = 3,$ $n_{16,61} = 1, n_{17,18} = 3, n_{18,50} = 6, n_{21,57} = 2,$ $n_{24,43} = 1, n_{25,55} = 3, n_{26,29} = 2, n_{29,30} = 1,$ $n_{35,51} = 1, n_{36,46} = 1, n_{39,86} = 2, n_{40,45} = 2,$ $n_{41,64} = 2, n_{43,55} = 2, n_{43,58} = 2, n_{48,49} = 1,$ $n_{48,51} = 1, n_{49,50} = 3, n_{52,59} = 1, n_{53,86} = 1,$ $n_{56,57} = 2, n_{61,64} = 2, n_{61,85} = 3, n_{61,86} = 1$
87-183-WRWN-02	2.723.362	$n_{1,2} = 2, n_{4,81} = 4, n_{5,56} = 2, n_{5,68} = 1, n_{8,73} = 1,$ $n_{12,17} = 4, n_{13,14} = 1, n_{13,15} = 4, n_{13,45} = 1,$ $n_{14,59} = 1, n_{15,16} = 3, n_{15,45} = 1, n_{16,44} = 6,$ $n_{16,61} = 1, n_{17,18} = 4, n_{18,50} = 11, n_{18,74} = 2,$ $n_{21,57} = 3, n_{22,58} = 2, n_{24,43} = 1, n_{25,55} = 4,$ $n_{26,54} = 1, n_{30,31} = 2, n_{30,63} = 3, n_{36,46} = 1,$ $n_{39,86} = 2, n_{40,45} = 3, n_{41,64} = 3, n_{43,55} = 1,$ $n_{43,58} = 1, n_{48,49} = 1, n_{49,50} = 4, n_{52,59} = 2,$ $n_{53,86} = 1, n_{54,55} = 2, n_{54,63} = 2, n_{54,79} = 3,$ $n_{56,57} = 2, n_{58,78} = 1, n_{61,64} = 1, n_{61,85} = 4,$ $n_{61,86} = 1, n_{63,64} = 1, n_{67,71} = 1, n_{71,72} = 1,$ $n_{72,73} = 1, n_{73,74} = 1, n_{78,79} = 2, n_{78,80} = 2,$ $n_{80,81} = 1, n_{80,83} = 1, n_{81,83} = 1$

(continua)

Tabela 9 – Melhores soluções encontradas para o PERTES.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
93-155-NRNN-01	2.434.764	$n_{57,81} = 2, n_{8,67} = 1, n_{25,28} = 2, n_{13,14} = 1,$ $n_{13,20} = 1, n_{13,23} = 1, n_{14,31} = 1, n_{2,4} = 1, n_{2,9} = 2,$ $n_{15,18} = 2, n_{15,17} = 1, n_{15,76} = 1, n_{15,24} = 1,$ $n_{37,61} = 1, n_{19,61} = 1, n_{37,68} = 1, n_{35,36} = 1,$ $n_{35,44} = 1, n_{38,68} = 1, n_{38,39} = 1, n_{27,80} = 2,$ $n_{56,81} = 1, n_{45,50} = 1, n_{10,78} = 1, n_{7,78} = 1,$ $n_{30,65} = 1, n_{30,72} = 1, n_{55,57} = 4, n_{56,57} = 2,$ $n_{9,77} = 2, n_{77,79} = 2, n_{1,59} = 1, n_{59,67} = 1, n_{8,59} = 1,$ $n_{1,3} = 2, n_{3,71} = 1, n_{55,62} = 3, n_{47,52} = 1, n_{51,52} = 1,$ $n_{41,42} = 1, n_{40,42} = 1, n_{46,53} = 1, n_{46,51} = 1,$ $n_{69,70} = 1, n_{66,69} = 2, n_{9,69} = 5, n_{60,69} = 4,$ $n_{31,32} = 1, n_{32,34} = 1, n_{16,23} = 1, n_{16,21} = 1,$ $n_{31,33} = 1, n_{31,72} = 2, n_{47,54} = 2, n_{47,49} = 1,$ $n_{18,58} = 2, n_{18,20} = 1, n_{18,66} = 1, n_{18,21} = 1,$ $n_{18,22} = 1, n_{4,5} = 2, n_{5,6} = 1, n_{12,17} = 1, n_{1,11} = 2,$ $n_{4,36} = 1, n_{19,58} = 1, n_{27,64} = 2, n_{27,28} = 1,$ $n_{27,44} = 2, n_{27,29} = 1, n_{19,66} = 2, n_{73,74} = 2,$ $n_{64,65} = 1, n_{29,64} = 1, n_{4,34} = 1, n_{34,70} = 1,$ $n_{8,71} = 3, n_{54,63} = 3, n_{48,63} = 1, n_{67,68} = 1,$ $n_{39,68} = 1, n_{8,9} = 3, n_{39,43} = 2, n_{23,24} = 1, n_{21,22} =$ $1, n_{26,28} = 2, n_{28,29} = 1, n_{6,10} = 1, n_{33,72} = 1,$ $n_{39,40} = 2, n_{12,76} = 1, n_{48,54} = 1, n_{50,54} = 1,$ $n_{62,73} = 3, n_{49,53} = 2, n_{40,41} = 1, n_{45,81} = 3,$ $n_{64,74} = 2, n_{54,56} = 3, n_{60,62} = 1, n_{72,73} = 3,$ $n_{19,82} = 1, n_{62,82} = 1, n_{7,90} = 1, n_{3,90} = 1$

(continua)

Tabela 9 – Melhores soluções encontradas para o PERTES.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$ $\times 10^3$)	Melhor solução
93-155-NRNN-02	2.738.227	$n_{57,81} = 3, n_{8,67} = 1, n_{39,86} = 2, n_{25,28} = 1,$ $n_{25,29} = 1, n_{13,20} = 2, n_{13,23} = 1, n_{2,4} = 2, n_{2,9} = 3,$ $n_{15,18} = 2, n_{15,17} = 1, n_{15,76} = 1, n_{15,24} = 1,$ $n_{37,61} = 1, n_{19,61} = 1, n_{37,68} = 1, n_{40,68} = 1,$ $n_{35,36} = 1, n_{35,44} = 1, n_{38,68} = 1, n_{38,39} = 1,$ $n_{27,80} = 1, n_{44,80} = 1, n_{56,81} = 1, n_{45,50} = 1,$ $n_{10,78} = 1, n_{7,78} = 1, n_{30,65} = 1, n_{30,72} = 1,$ $n_{55,57} = 4, n_{56,57} = 2, n_{9,77} = 2, n_{77,79} = 2,$ $n_{1,59} = 2, n_{59,67} = 2, n_{1,3} = 1, n_{3,71} = 3, n_{55,62} = 3,$ $n_{47,52} = 1, n_{51,52} = 1, n_{41,42} = 1, n_{40,42} = 1,$ $n_{46,53} = 1, n_{46,51} = 1, n_{69,70} = 1, n_{66,69} = 3,$ $n_{9,69} = 6, n_{60,69} = 4, n_{31,32} = 1, n_{32,34} = 1,$ $n_{16,23} = 1, n_{16,21} = 1, n_{31,33} = 1, n_{31,72} = 2,$ $n_{47,54} = 2, n_{47,49} = 1, n_{18,58} = 3, n_{18,20} = 2,$ $n_{18,66} = 1, n_{18,21} = 1, n_{19,22} = 1, n_{4,5} = 1, n_{5,6} = 1,$ $n_{17,76} = 1, n_{12,17} = 2, n_{1,8} = 2, n_{1,11} = 2, n_{4,36} = 1,$ $n_{19,58} = 2, n_{27,64} = 2, n_{27,28} = 1, n_{27,44} = 2,$ $n_{27,29} = 2, n_{19,66} = 2, n_{73,74} = 3, n_{64,65} = 1,$ $n_{29,64} = 2, n_{34,70} = 1, n_{8,71} = 3, n_{54,63} = 4,$ $n_{48,63} = 1, n_{67,68} = 1, n_{8,9} = 3, n_{39,43} = 1,$ $n_{41,43} = 1, n_{23,24} = 1, n_{21,22} = 2, n_{26,28} = 2,$ $n_{6,10} = 1, n_{33,72} = 1, n_{48,54} = 1, n_{50,54} = 1,$ $n_{62,73} = 3, n_{49,53} = 2, n_{45,81} = 3, n_{64,74} = 3,$ $n_{54,56} = 3, n_{72,73} = 3, n_{19,82} = 1, n_{55,82} = 1,$ $n_{62,82} = 1, n_{7,90} = 2, n_{3,90} = 2$

(continua)

Tabela 9 – Melhores soluções encontradas para o PERTES.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$ $\times 10^3$)	Melhor solução
93-155-NRNN-03	2.899.900	$n_{52,88} = 1, n_{43,88} = 1, n_{57,81} = 3, n_{39,86} = 2,$ $n_{25,28} = 1, n_{25,29} = 1, n_{13,20} = 1, n_{13,23} = 1,$ $n_{2,4} = 2, n_{2,9} = 3, n_{15,18} = 3, n_{15,17} = 2, n_{15,24} = 1,$ $n_{37,61} = 1, n_{19,61} = 1, n_{37,68} = 1, n_{40,68} = 1,$ $n_{35,36} = 1, n_{35,44} = 1, n_{38,68} = 1, n_{38,39} = 1,$ $n_{27,80} = 1, n_{44,80} = 1, n_{56,81} = 2, n_{45,50} = 2,$ $n_{10,78} = 1, n_{7,78} = 2, n_{30,72} = 2, n_{55,57} = 2, n_{57,84} =$ $2, n_{55,84} = 3, n_{56,57} = 1, n_{9,77} = 1, n_{77,79} = 1,$ $n_{1,59} = 2, n_{59,67} = 3, n_{8,59} = 1, n_{1,3} = 1, n_{3,71} = 3,$ $n_{55,62} = 4, n_{47,52} = 1, n_{51,52} = 2, n_{41,42} = 1,$ $n_{40,42} = 1, n_{46,53} = 1, n_{46,51} = 1, n_{69,70} = 1,$ $n_{66,69} = 4, n_{9,69} = 6, n_{60,69} = 4, n_{31,32} = 1,$ $n_{32,34} = 1, n_{16,23} = 1, n_{16,21} = 2, n_{31,72} = 1,$ $n_{47,54} = 1, n_{47,49} = 1, n_{18,58} = 3, n_{18,20} = 2,$ $n_{18,21} = 1, n_{18,22} = 2, n_{19,22} = 3, n_{4,5} = 1, n_{5,6} = 1,$ $n_{17,76} = 1, n_{12,17} = 1, n_{1,8} = 1, n_{1,11} = 1, n_{4,36} = 1,$ $n_{19,58} = 1, n_{27,64} = 3, n_{27,44} = 2, n_{26,27} = 1,$ $n_{19,66} = 3, n_{73,74} = 3, n_{64,65} = 2, n_{29,64} = 1,$ $n_{34,70} = 2, n_{8,71} = 3, n_{54,63} = 3, n_{48,63} = 1,$ $n_{67,68} = 2, n_{8,9} = 2, n_{79,87} = 1, n_{8,87} = 1, n_{39,43} = 1,$ $n_{41,43} = 1, n_{23,24} = 1, n_{21,22} = 2, n_{26,28} = 1,$ $n_{28,29} = 1, n_{6,10} = 1, n_{33,72} = 2, n_{12,76} = 1,$ $n_{48,54} = 1, n_{62,73} = 3, n_{49,53} = 2, n_{45,81} = 3,$ $n_{64,74} = 3, n_{54,56} = 3, n_{72,73} = 2, n_{19,86} = 3,$ $n_{7,90} = 2, n_{3,90} = 2, n_{90,91} = 1, n_{11,92} = 1,$ $n_{91,92} = 1$
93-155-NRWN-01	552.795	$n_{2,83} = 1, n_{55,57} = 2, n_{56,57} = 2, n_{55,62} = 1, n_{27,64} =$ $1, n_{50,54} = 1, n_{54,56} = 1, n_{62,82} = 1, n_{83,85} = 1,$ $n_{82,85} = 2$
93-155-NRWN-02	778569	$n_{57,81} = 3, n_{9,83} = 1, n_{55,57} = 2, n_{55,62} = 2, n_{31,60} =$ $1, n_{27,64} = 1, n_{34,70} = 1, n_{62,73} = 1, n_{45,81} = 2,$ $n_{19,82} = 2, n_{83,85} = 1, n_{82,85} = 2$

(continua)

Tabela 9 – Melhores soluções encontradas para o PERTES.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$ $\times 10^3$)	Melhor solução
93-155-NRWN-03	1.097.346	$n_{52,88} = 1, n_{43,88} = 1, n_{13,14} = 1, n_{2,83} = 1,$ $n_{15,24} = 1, n_{27,80} = 1, n_{56,81} = 2, n_{30,72} = 1,$ $n_{55,57} = 1, n_{57,84} = 1, n_{55,84} = 2, n_{56,57} = 2,$ $n_{59,67} = 1, n_{3,71} = 1, n_{55,62} = 2, n_{27,64} = 1,$ $n_{27,29} = 1, n_{73,74} = 1, n_{29,64} = 2, n_{62,73} = 2,$ $n_{45,81} = 2, n_{64,74} = 2, n_{19,82} = 2, n_{83,85} = 1,$ $n_{82,85} = 2, n_{68,86} = 2$
93-155-WRNN-01	1.622.634	$n_{57,81} = 2, n_{8,67} = 1, n_{25,28} = 1, n_{13,14} = 1,$ $n_{13,20} = 1, n_{13,23} = 1, n_{14,31} = 2, n_{14,60} = 1,$ $n_{2,4} = 1, n_{2,9} = 2, n_{15,18} = 1, n_{15,20} = 1, n_{15,24} = 1,$ $n_{19,61} = 1, n_{61,68} = 1, n_{37,68} = 1, n_{35,44} = 1,$ $n_{38,68} = 1, n_{38,39} = 1, n_{27,80} = 2, n_{45,50} = 2,$ $n_{10,78} = 1, n_{7,78} = 1, n_{30,64} = 2, n_{30,65} = 1,$ $n_{30,72} = 3, n_{55,57} = 2, n_{9,77} = 2, n_{77,79} = 2,$ $n_{1,59} = 1, n_{1,3} = 1, n_{3,71} = 2, n_{55,62} = 2, n_{47,52} = 1,$ $n_{51,52} = 1, n_{41,42} = 1, n_{40,42} = 1, n_{46,53} = 1,$ $n_{46,51} = 1, n_{69,70} = 1, n_{66,69} = 4, n_{9,69} = 5,$ $n_{60,69} = 3, n_{31,32} = 1, n_{32,34} = 1, n_{16,18} = 1,$ $n_{16,23} = 1, n_{16,21} = 1, n_{31,33} = 1, n_{31,60} = 2,$ $n_{31,72} = 3, n_{47,49} = 1, n_{18,58} = 2, n_{18,20} = 2,$ $n_{19,22} = 1, n_{4,5} = 1, n_{5,6} = 1, n_{17,76} = 1, n_{12,17} = 1,$ $n_{1,71} = 1, n_{1,11} = 2, n_{4,36} = 2, n_{19,58} = 1, n_{27,64} = 2,$ $n_{27,28} = 1, n_{27,44} = 2, n_{19,66} = 2, n_{64,65} = 1,$ $n_{29,64} = 1, n_{4,34} = 1, n_{34,70} = 1, n_{8,71} = 3, n_{39,68} =$ $1, n_{8,9} = 3, n_{41,43} = 2, n_{21,22} = 1, n_{26,28} = 1,$ $n_{28,29} = 1, n_{6,10} = 1, n_{33,72} = 1, n_{39,40} = 1,$ $n_{12,76} = 1, n_{48,54} = 2, n_{49,53} = 2, n_{40,41} = 1,$ $n_{45,81} = 2, n_{60,62} = 2, n_{7,90} = 2, n_{3,90} = 2$

(continua)

Tabela 9 – Melhores soluções encontradas para o PERTES.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$×10 ³)	Melhor solução
93-155-WRNN-02	1.748.121	$n_{57,81} = 2, n_{8,67} = 1, n_{39,86} = 1, n_{25,28} = 1,$ $n_{13,14} = 1, n_{13,20} = 2, n_{13,23} = 1, n_{14,31} = 2,$ $n_{14,60} = 1, n_{2,4} = 3, n_{2,9} = 3, n_{15,18} = 2, n_{15,17} = 1,$ $n_{15,76} = 1, n_{15,24} = 1, n_{19,61} = 1, n_{40,68} = 1,$ $n_{35,36} = 1, n_{35,44} = 1, n_{38,39} = 2, n_{27,80} = 2,$ $n_{45,50} = 2, n_{10,78} = 1, n_{7,78} = 1, n_{30,64} = 2,$ $n_{30,65} = 2, n_{30,72} = 4, n_{55,57} = 2, n_{9,77} = 2,$ $n_{77,79} = 2, n_{1,59} = 1, n_{59,67} = 1, n_{8,59} = 2, n_{1,3} = 1,$ $n_{3,71} = 2, n_{55,62} = 1, n_{47,52} = 2, n_{40,42} = 2,$ $n_{46,53} = 2, n_{46,51} = 2, n_{69,70} = 1, n_{66,69} = 5,$ $n_{9,69} = 5, n_{60,69} = 3, n_{31,32} = 1, n_{32,34} = 1,$ $n_{16,21} = 2, n_{31,33} = 1, n_{31,60} = 3, n_{31,72} = 3,$ $n_{47,54} = 2, n_{18,58} = 1, n_{18,20} = 2, n_{18,66} = 1,$ $n_{18,21} = 1, n_{18,22} = 1, n_{19,22} = 2, n_{4,5} = 1, n_{5,6} = 1,$ $n_{17,76} = 1, n_{1,11} = 2, n_{4,36} = 2, n_{27,64} = 2, n_{27,28} =$ $1, n_{27,44} = 1, n_{19,66} = 3, n_{64,65} = 1, n_{29,64} = 2,$ $n_{34,70} = 1, n_{8,71} = 3, n_{67,68} = 1, n_{39,68} = 1, n_{8,9} = 2,$ $n_{41,43} = 2, n_{23,24} = 1, n_{21,22} = 2, n_{26,28} = 1,$ $n_{28,29} = 1, n_{6,10} = 1, n_{33,72} = 1, n_{12,76} = 1,$ $n_{48,54} = 2, n_{49,53} = 2, n_{45,81} = 2, n_{60,62} = 1,$ $n_{7,90} = 2, n_{3,90} = 2$

(continua)

Tabela 9 – Melhores soluções encontradas para o PERTES.

(continuação)

Sistema teste	Melhor valor (US\$ $\times 10^3$)	Melhor solução
93-155-WRNN-03	1.790.332	$n_{39,86} = 1, n_{25,28} = 1, n_{13,14} = 2, n_{13,20} = 3,$ $n_{14,31} = 2, n_{2,4} = 2, n_{2,9} = 3, n_{15,18} = 2, n_{15,17} = 2,$ $n_{15,24} = 1, n_{37,61} = 1, n_{19,61} = 1, n_{37,68} = 1,$ $n_{35,36} = 1, n_{35,44} = 1, n_{38,68} = 1, n_{38,39} = 1,$ $n_{27,80} = 2, n_{45,50} = 2, n_{10,78} = 1, n_{7,78} = 1,$ $n_{30,64} = 3, n_{30,65} = 2, n_{30,72} = 4, n_{55,57} = 1,$ $n_{57,84} = 1, n_{55,84} = 1, n_{9,77} = 1, n_{77,79} = 1,$ $n_{1,59} = 3, n_{59,67} = 3, n_{8,59} = 1, n_{1,3} = 2, n_{3,71} = 2,$ $n_{47,52} = 1, n_{51,52} = 1, n_{41,42} = 1, n_{40,42} = 1,$ $n_{46,53} = 1, n_{46,51} = 1, n_{69,70} = 2, n_{66,69} = 5,$ $n_{9,69} = 4, n_{60,69} = 3, n_{31,32} = 2, n_{32,34} = 2,$ $n_{16,23} = 2, n_{16,21} = 2, n_{31,33} = 1, n_{31,60} = 3,$ $n_{31,72} = 4, n_{47,54} = 2, n_{47,49} = 1, n_{18,58} = 2,$ $n_{18,20} = 3, n_{18,21} = 2, n_{18,22} = 4, n_{19,22} = 4,$ $n_{4,5} = 1, n_{5,6} = 1, n_{17,76} = 1, n_{12,17} = 1, n_{1,8} = 1,$ $n_{1,11} = 1, n_{4,36} = 1, n_{27,64} = 2, n_{27,28} = 1,$ $n_{27,44} = 2, n_{27,29} = 2, n_{19,66} = 3, n_{29,64} = 2,$ $n_{34,70} = 3, n_{8,71} = 2, n_{48,63} = 2, n_{67,68} = 3,$ $n_{8,9} = 1, n_{79,87} = 1, n_{8,87} = 1, n_{39,43} = 1, n_{41,43} = 1,$ $n_{23,24} = 1, n_{21,22} = 1, n_{26,28} = 1, n_{28,29} = 1,$ $n_{6,10} = 1, n_{33,72} = 1, n_{39,40} = 1, n_{48,54} = 2,$ $n_{49,53} = 1, n_{19,86} = 3, n_{68,86} = 2, n_{7,90} = 2,$ $n_{3,90} = 2, n_{90,91} = 1, n_{11,92} = 1, n_{91,92} = 1$
93-155-WRWN-01	57.928	$n_{66,69} = 1, n_{9,69} = 2, n_{19,66} = 1$
93-155-WRWN-02	146.721	$n_{14,31} = 1, n_{69,70} = 1, n_{60,69} = 1, n_{27,29} = 1,$ $n_{19,82} = 1, n_{82,85} = 1$
93-155-WRWN-03	165.599	$n_{9,69} = 2, n_{60,69} = 1, n_{18,20} = 1, n_{27,64} = 1, n_{27,29} =$ $1, n_{29,64} = 1, n_{62,73} = 1, n_{19,82} = 1, n_{68,86} = 1$

Fonte: O autor.

ANEXO A – SISTEMAS TESTE

A.1 CARACTERÍSTICAS DOS ARQUIVOS

Quadro 8 – Características dos sistemas teste: Garver 6 barras.

Arquivo	Com redespacho	Considera rede inicial	Número máximo de novas linhas, por ramo
06-15-NRNN-01.tep	Não	Não	10
06-15-NRWN-01.tep	Não	Sim	10
06-15-WRNN-01.tep	Sim	Não	10
06-15-WRWN-01.tep	Sim	Sim	10

Fonte: O autor.

Quadro 9 – Características dos sistemas teste: IEEE 24 barras.

Arquivo	Com redespacho	Considera rede inicial	Número máximo de novas linhas, por ramo
24-41-NRNN-01.tep	Não	Não	8
24-41-NRNN-02.tep	Não	Não	8
24-41-NRNN-03.tep	Não	Não	8
24-41-NRNN-04.tep	Não	Não	8
24-41-NRWN-01.tep	Não	Sim	8
24-41-NRWN-02.tep	Não	Sim	8
24-41-NRWN-03.tep	Não	Sim	8
24-41-NRWN-04.tep	Não	Sim	8
24-41-WRNN-01.tep	Sim	Não	8
24-41-WRWN-01.tep	Sim	Sim	8

Fonte: O autor.

Quadro 10 – Características dos sistemas teste: Sul Brasileiro 46 barras.

Arquivo	Com redespacho	Considera rede inicial	Número máximo de novas linhas, por ramo
46-79-NRNN-01.tep	Não	Não	10
46-79-NRWN-01.tep	Não	Sim	10
46-79-WRNN-01.tep	Sim	Não	10
46-79-WRWN-01.tep	Sim	Sim	10

Fonte: O autor.

Quadro 11 – Características dos sistemas teste: Sudeste Brasileiro 79 barras.

Arquivo	Com redespacho	Considera rede inicial	Número máximo de novas linhas, por ramo
79-143-NRNN-01.tep	Não	Não	15
79-143-NRWN-01.tep	Não	Sim	15
79-143-WRNN-01.tep	Sim	Não	15
79-143-WRWN-01.tep	Sim	Sim	15

Fonte: O autor.

Quadro 12 – Características dos sistemas teste: Nordeste Brasileiro 87 barras.

Arquivo	Com redespacho	Considera rede inicial	Número máximo de novas linhas, por ramo
87-183-NRNN-01.tep	Não	Não	20
87-183-NRNN-02.tep	Não	Não	20
87-183-NRWN-01.tep	Não	Sim	20
87-183-NRWN-02.tep	Não	Sim	20
87-183-WRNN-01.tep	Sim	Não	20
87-183-WRNN-02.tep	Sim	Não	20
87-183-WRWN-01.tep	Sim	Sim	20
87-183-WRWN-02.tep	Sim	Sim	20

Fonte: O autor.

Quadro 13 – Características dos sistemas teste: Colombiano 93 barras.

Arquivo	Com redespacho	Considera rede inicial	Número máximo de novas linhas, por ramo
93-155-NRNN-01.tep	Não	Não	10
93-155-NRNN-02.tep	Não	Não	10
93-155-NRNN-03.tep	Não	Não	10
93-155-NRWN-01.tep	Não	Sim	10
93-155-NRWN-02.tep	Não	Sim	10
93-155-NRWN-03.tep	Não	Sim	10
93-155-WRNN-01.tep	Sim	Não	10
93-155-WRNN-02.tep	Sim	Não	10
93-155-WRNN-03.tep	Sim	Não	10
93-155-WRWN-01.tep	Sim	Sim	10
93-155-WRWN-02.tep	Sim	Sim	10
93-155-WRWN-03.tep	Sim	Sim	10

Fonte: O autor.

A.2 DADOS DOS SISTEMAS TESTE

A.2.1 Garver 6 barras

Tabela 10 – Dados das barras: Garver com redespacho.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	80	150	3	40	360	5	240	0
2	240	0	4	160	0	6	0	600

Fonte: Adaptado de Romero et al. (2002).

Tabela 11 – Dados das barras: Garver sem redespacho.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	80	50	3	40	165	5	240	0
2	240	0	4	160	0	6	0	545

Fonte: Adaptado de Romero et al. (2002).

Tabela 12 – Dados dos ramos: Garver.

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
1	2	100	0,4	40	1
1	3	100	0,38	38	0
1	4	80	0,6	60	1
1	5	100	0,2	20	1
1	6	70	0,68	68	0

(continua)

Tabela 12 – Dados dos ramos: Garver.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
2	3	100	0,2	20	1
2	4	100	0,4	40	1
2	5	100	0,31	31	0
2	6	100	0,3	30	0
3	4	82	0,59	59	0
3	5	100	0,2	20	1
3	6	100	0,48	48	0
4	5	75	0,63	63	0
4	6	100	0,3	30	0
5	6	78	0,61	61	0

Fonte: Adaptado de Romero et al. (2002).

A.2.2 IEEE24 24 barras

Tabela 13 – Dados das barras: IEEE24 sem redespacho - Plano 1.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	324	576	9	525	0	17	0	0
2	291	576	10	585	0	18	999	1.200
3	540	0	11	0	0	19	543	0
4	222	0	12	0	0	20	384	0
5	213	0	13	795	1.773	21	0	1.200
6	408	0	14	582	0	22	0	900
7	375	900	15	951	645	23	0	315

(continua)

Tabela 13 – Dados das barras: IEEE24 sem redespacho - Plano 1.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
8	513	0	16	300	465	24	0	0

Fonte: Adaptado de Resende (2014).

Tabela 14 – Dados das barras: IEEE24 sem redespacho - Plano 2.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	324	465	9	525	0	17	0	0
2	291	576	10	585	0	18	999	1.200
3	540	0	11	0	0	19	543	0
4	222	0	12	0	0	20	384	0
5	213	0	13	795	1.424	21	0	1.200
6	408	0	14	582	0	22	0	900
7	375	722	15	951	645	23	0	953
8	513	0	16	300	465	24	0	0

Fonte: Adaptado de Resende (2014).

Tabela 15 – Dados das barras: IEEE24 sem redespacho - Plano 3.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	324	576	9	525	0	17	0	0
2	291	576	10	585	0	18	999	603
3	540	0	11	0	0	19	543	0

(continua)

Tabela 15 – Dados das barras: IEEE24 sem redespacho - Plano 3.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
4	222	0	12	0	0	20	384	0
5	213	0	13	795	1.457	21	0	951
6	408	0	14	582	0	22	0	900
7	375	900	15	951	325	23	0	1.980
8	513	0	16	300	282	24	0	0

Fonte: Adaptado de Resende (2014).

Tabela 16 – Dados das barras: IEEE24 sem redespacho - Plano 4.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	324	520	9	525	0	17	0	0
2	291	520	10	585	0	18	999	718
3	540	0	11	0	0	19	543	0
4	222	0	12	0	0	20	384	0
5	213	0	13	795	1.599	21	0	1.077
6	408	0	14	582	0	22	0	900
7	375	812	15	951	581	23	0	1.404
8	513	0	16	300	419	24	0	0

Fonte: Adaptado de Resende (2014).

Tabela 17 – Dados das barras: IEEE24 com redespacho.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	324	576	9	525	0	17	0	0
2	291	576	10	585	0	18	999	1.200
3	540	0	11	0	0	19	543	0
4	222	0	12	0	0	20	384	0
5	213	0	13	795	1.773	21	0	1.200
6	408	0	14	582	0	22	0	900
7	375	900	15	951	645	23	0	1.980
8	513	0	16	300	465	24	0	0

Fonte: Adaptado de Resende (2014).

Tabela 18 – Dados dos ramos: IEEE24.

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
1	2	175	0,0139	3.000	1
1	3	175	0,2112	55.000	1
1	5	175	0,0845	22.000	1
2	4	175	0,1267	33.000	1
2	6	175	0,192	50.000	1
3	9	175	0,119	31.000	1
3	24	400	0,0839	50.000	1
4	9	175	0,1037	27.000	1
5	10	175	0,0883	23.000	1
6	10	175	0,0605	16.000	1
7	8	175	0,0614	16.000	1

(continua)

Tabela 18 – Dados dos ramos: IEEE24.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
8	9	175	0,1651	43.000	1
8	10	175	0,1651	43.000	1
9	11	400	0,0839	50.000	1
9	12	400	0,0839	50.000	1
10	11	400	0,0839	50.000	1
10	12	400	0,0839	50.000	1
11	13	500	0,0476	66.000	1
11	14	500	0,0418	58.000	1
12	13	500	0,0476	66.000	1
12	23	500	0,0966	134.000	1
13	23	500	0,0865	120.000	1
14	16	500	0,0389	54.000	1
15	16	500	0,0173	24.000	1
15	21	500	0,049	68.000	2
15	24	500	0,0519	72.000	1
16	17	500	0,0259	36.000	1
16	19	500	0,0231	32.000	1
17	18	500	0,0144	20.000	1
17	22	500	0,1053	146.000	1
18	21	500	0,0259	36.000	2
19	20	500	0,0396	55.000	2
20	23	500	0,0216	30.000	2
21	22	500	0,0678	94.000	1
1	8	500	0,1344	35.000	0
2	8	500	0,1267	33.000	0

(continua)

Tabela 18 – Dados dos ramos: IEEE24.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
6	7	500	0,192	50.000	0
13	14	500	0,0447	62.000	0
14	23	500	0,062	86.000	0
16	23	500	0,0822	114.000	0
19	23	500	0,0606	84.000	0

Fonte: Adaptado de Resende (2014).

A.2.3 Sul brasileiro 46 barras

Tabela 19 – Dados das barras: Sul-BR sem redespacho.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	0	0	17	0	1.000	33	229,1	0
2	443,1	0	18	0	0	34	0	221
3	0	0	19	0	773	35	216	0
4	300,7	0	20	1.091,2	0	36	90,1	0
5	238	0	21	0	0	37	0	212
6	0	0	22	81,9	0	38	216	0
7	0	0	23	458,1	0	39	0	221
8	72,2	0	24	478,2	0	40	262,1	0
9	0	0	25	0	0	41	0	0
10	0	0	26	231,9	0	42	1.607,9	0
11	0	0	27	0	54	43	0	0
12	511,9	0	28	0	730	44	79,1	0

(continua)

Tabela 19 – Dados das barras: Sul-BR sem redespacho.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
13	185,8	0	29	0	0	45	86,7	0
14	0	944	30	0	0	46	0	599
15	0	0	31	0	310			
16	0	1.366	32	0	450			

Fonte: Adaptado de Resende (2014).

Tabela 20 – Dados das barras: Sul-BR com redespacho.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	0	0	17	0	1.050	33	229,1	0
2	443,1	0	18	0	0	34	0	748
3	0	0	19	0	1.670	35	216	0
4	300,7	0	20	1.091,2	0	36	90,1	0
5	238	0	21	0	0	37	0	300
6	0	0	22	81,9	0	38	216	0
7	0	0	23	458,1	0	39	0	600
8	72,2	0	24	478,2	0	40	262,1	0
9	0	0	25	0	0	41	0	0
10	0	0	26	231,9	0	42	1.607,9	0
11	0	0	27	0	220	43	0	0
12	511,9	0	28	0	800	44	79,1	0
13	185,8	0	29	0	0	45	86,7	0
14	0	1.257	30	0	0	46	0	700
15	0	0	31	0	700			

(continua)

Tabela 20 – Dados das barras: Sul-BR com redespacho.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
16	0	2.000	32	0	500			

Fonte: Adaptado de Resende (2014).

Tabela 21 – Dados dos ramos: Sul-BR.

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
1	7	270	0,06160	4.349	1
1	2	270	0,10650	7.076	2
4	9	270	0,09240	6.217	1
5	9	270	0,11730	7.732	1
5	8	270	0,11320	7.48	1
7	8	270	0,10230	6.823	1
4	5	270	0,05660	4.046	2
2	5	270	0,03240	2.581	2
8	13	240	0,13480	8.793	1
9	14	220	0,17560	11.267	2
12	14	270	0,07400	5.106	2
14	18	240	0,15140	9.803	2
13	18	220	0,18050	11.57	1
13	20	270	0,10730	7.126	1
18	20	200	0,19970	12.732	1
19	21	1500	0,02780	32.632	1
16	17	2000	0,00780	10.505	1

(continua)

Tabela 21 – Dados dos ramos: Sul-BR.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
17	19	2000	0,00610	8.715	1
14	26	220	0,16140	10.409	1
14	22	270	0,08400	5.712	1
22	26	270	0,07900	5.409	1
20	23	270	0,09320	6.268	2
23	24	270	0,07740	5.308	2
26	27	270	0,08320	5.662	2
24	34	220	0,16470	10.611	1
24	33	240	0,14480	9.399	1
33	34	270	0,12650	8.288	1
27	36	270	0,09150	6.167	1
27	38	200	0,20800	13.237	2
36	37	270	0,10570	7.025	1
34	35	270	0,04910	3.591	2
35	38	200	0,19800	12.631	1
37	39	270	0,02830	2.329	1
37	40	270	0,12810	8.389	1
37	42	200	0,21050	13.388	1
39	42	200	0,20300	12.934	3
40	42	270	0,09320	6.268	1
38	42	270	0,09070	6.116	3
32	43	1400	0,03090	35.957	1
42	44	270	0,12060	7.934	1
44	45	200	0,18640	11.924	1
19	32	1800	0,01950	23.423	1

(continua)

Tabela 21 – Dados dos ramos: Sul-BR.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
46	19	1800	0,02220	26.365	1
46	16	1800	0,02030	24.319	1
18	19	600	0,01250	8.178	1
20	21	600	0,01250	8.178	1
42	43	600	0,01250	8.178	1
2	4	270	0,08820	5.965	0
14	15	270	0,03740	2.884	0
46	10	2000	0,00810	10.889	0
4	11	240	0,22460	14.247	0
5	11	270	0,09150	6.167	0
46	6	2000	0,01280	16.005	0
46	3	1800	0,02030	24.319	0
16	28	1800	0,02220	26.365	0
16	32	1400	0,03110	36.213	0
17	32	1700	0,02320	27.516	0
19	25	1400	0,03250	37.748	0
21	25	2000	0,01740	21.121	0
25	32	1400	0,03190	37.109	0
31	32	2000	0,00460	7.052	0
28	31	2000	0,00530	7.819	0
28	30	2000	0,00580	8.331	0
27	29	270	0,09980	6.672	0
26	29	270	0,05410	3.894	0
28	41	1300	0,03390	39.283	0
28	43	1200	0,04060	46.701	0

(continua)

Tabela 21 – Dados dos ramos: Sul-BR.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
31	41	1500	0,02780	32.632	0
32	41	1400	0,03090	35.957	0
41	43	2000	0,01390	17.284	0
40	45	180	0,22050	13.994	0
15	16	600	0,01250	8.178	0
46	11	600	0,01250	8.178	0
24	25	600	0,01250	8.178	0
29	30	600	0,01250	8.178	0
40	41	600	0,01250	8.178	0
2	3	600	0,01250	8.178	0
5	6	600	0,01250	8.178	0
9	10	600	0,01250	8.178	0

Fonte: Adaptado de Resende (2014).

A.2.4 Sudeste brasileiro 79 barras

Tabela 22 – Dados das barras: Sudeste-BR sem redespacho.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	0	0	28	216	279	55	0	1.116
2	0	1.740	29	0	0	56	0	766
3	958	3.690	30	828	0	57	0	97
4	0	272	31	0	0	58	0	317
5	62	0	32	669	0	59	0	0

(continua)

Tabela 22 – Dados das barras: Sudeste-BR sem redespatcho.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
6	95	352	33	0	323	60	882	549
7	203	185	34	372	1.937	61	807	0
8	178	60	35	542	0	62	0	0
9	633	120	36	0	0	63	994	118
10	0	0	37	1.007	0	64	0	0
11	0	0	38	0	939	65	0	2.798
12	0	0	39	401	407	66	633	0
13	0	0	40	0	0	67	0	499
14	9.580	936	41	398	531	68	647	0
15	499	1.531	42	8	0	69	848	188
16	45	425	43	151	0	70	1.712	0
17	718	4.682	44	0	0	71	0	0
18	147	544	45	470	0	72	0	0
19	134	0	46	67	2.182	73	0	0
20	592	1.174	47	0	0	74	0	0
21	0	0	48	7.423	1.257	75	0	0
22	391	234	49	1.107	278	76	0	0
23	0	1.429	50	151	0	77	1.159	954
24	0	0	51	0	231	78	0	0
25	0	2.953	52	287	409	79	0	0
26	0	1.266	53	1.156	143	0	0	0
27	0	0	54	829	88	0	0	0

Fonte: Adaptado de Mendonça (2012).

Tabela 23 – Dados das barras: Sudeste-BR com redespacho.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	0	0	28	216	279	55	0	1.116
2	0	1.740	29	0	0	56	0	766
3	958	3.890	30	828	0	57	0	97
4	0	272	31	0	0	58	0	317
5	62	0	32	669	0	59	0	0
6	95	352	33	0	323	60	882	549
7	203	185	34	372	1.937	61	807	0
8	178	60	35	542	0	62	0	0
9	633	120	36	0	0	63	994	118
10	0	0	37	1.007	0	64	0	0
11	0	0	38	0	939	65	0	2.798
12	0	0	39	401	407	66	633	0
13	0	0	40	0	0	67	0	499
14	9.580	936	41	398	531	68	647	0
15	499	1.531	42	8	0	69	848	188
16	45	425	43	151	0	70	1.712	0
17	718	4.982	44	0	0	71	0	0
18	147	544	45	470	0	72	0	0
19	134	0	46	67	2.182	73	0	0
20	592	1.174	47	0	0	74	0	0
21	0	0	48	7.423	1.257	75	0	0
22	391	234	49	1.107	278	76	0	0
23	0	1.429	50	151	0	77	1.159	954
24	0	0	51	0	231	78	0	0
25	0	2.953	52	287	409	79	0	0
26	0	1.266	53	1.156	143	0	0	0

(continua)

Tabela 23 – Dados das barras: Sudeste-BR com redespacho.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
27	0	0	54	829	88	0	0	0

Fonte: Adaptado de Mendonça (2012).

Tabela 24 – Dados dos ramos: Sudeste-BR.

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
1	2	2.200	0,00910	85.900	3
1	3	1.650	0,00340	11.700	4
2	11	2.200	0,00780	73.700	3
3	14	1.200	0,04370	67.600	0
5	8	200	0,04920	4.100	2
5	19	150	0,06670	3.600	2
6	7	200	0,05300	4.400	2
6	8	200	0,03370	2.800	1
6	9	200	0,13200	11.000	1
7	9	200	0,08480	7.000	1
11	12	1.650	0,00340	11.700	0
12	13	1.200	0,00720	25.800	0
14	13	1.200	0,01100	39.500	0
14	31	1.200	0,01470	17.600	1
14	42	1.200	0,02470	29.600	1
14	47	1.200	0,01410	16.800	1
14	73	9.999	0,00020	51.000	1

(continua)

Tabela 24 – Dados dos ramos: Sudeste-BR.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
14	74	9.999	0,00020	51.000	1
14	75	9.999	0,00020	51.000	1
14	76	9.999	0,00020	51.000	1
15	4	1.100	0,00340	3.600	1
15	10	750	0,01330	6.100	0
15	16	1.100	0,01850	19.600	2
15	17	1.100	0,05340	56.800	0
16	17	1.100	0,03700	39.300	1
16	18	1.100	0,01340	14.300	1
16	19	1.100	0,03070	32.700	1
17	20	1.100	0,02450	26.100	1
17	22	1.100	0,05120	54.500	3
17	30	1.100	0,06210	66.100	2
18	19	1.100	0,01780	18.900	1
19	22	1.100	0,02300	24.500	1
19	24	1.100	0,03530	37.500	2
20	30	1.100	0,05460	58.100	1
20	69	1.100	0,05320	56.600	1
21	20	750	0,01330	6.100	1
21	23	1.200	0,01470	17.600	1
21	26	1.200	0,02100	25.100	1
22	30	1.100	0,01750	18.600	1
23	25	1.200	0,02470	29.600	1
23	26	1.200	0,03150	37.600	0
23	40	1.200	0,05210	62.300	1

(continua)

Tabela 24 – Dados dos ramos: Sudeste-BR.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
24	9	150	0,06670	3.600	0
24	13	750	0,01330	6.100	0
24	70	1.100	0,01710	18.200	2
25	26	1.200	0,03220	38.500	0
25	34	1.200	0,02160	25.800	1
25	60	560	0,02140	5.000	1
25	62	1.200	0,02760	33.000	0
25	64	1.200	0,04790	57.300	0
26	27	560	0,02140	5.000	1
26	29	1.200	0,03100	37.100	2
26	40	1.200	0,02700	32.200	0
27	28	600	0,02450	9.700	1
28	33	600	0,01380	5.500	1
28	60	600	0,06270	24.900	1
29	31	1.200	0,02580	30.800	1
29	36	1.200	0,02640	31.500	1
29	40	1.200	0,03300	39.400	0
30	29	750	0,01330	6.100	0
30	68	1.100	0,02690	28.600	1
30	69	1.100	0,02690	28.600	0
30	70	1.100	0,02420	25.700	1
31	32	560	0,02140	5.000	1
31	36	1.200	0,02250	26.900	0
31	42	1.200	0,03270	39.000	1
32	35	600	0,03950	15.700	1

(continua)

Tabela 24 – Dados dos ramos: Sudeste-BR.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
33	38	600	0,03510	14.000	1
33	41	600	0,02760	11.000	1
34	56	1.200	0,01320	17.400	1
34	64	1.200	0,04490	53.700	0
34	79	1.200	0,02980	39.400	1
35	36	560	0,02140	5.000	1
35	38	600	0,06180	24.600	2
35	55	600	0,04230	16.800	2
36	40	1.200	0,03750	44.800	0
36	42	1.200	0,02860	34.200	1
38	39	600	0,01030	4.100	1
38	41	600	0,00750	3.000	1
38	55	600	0,04140	16.400	1
39	55	600	0,03290	13.100	1
40	41	400	0,02250	4.600	3
40	45	1.200	0,04780	64.400	1
40	56	1.200	0,01470	19.400	1
40	71	1.200	0,06260	82.900	1
40	72	1.200	0,02250	26.800	0
41	43	600	0,05700	22.700	2
42	46	1.200	0,01510	18.100	1
42	47	1.200	0,01210	14.500	1
42	48	1.350	0,02550	30.400	2
43	49	600	0,07240	28.800	1
43	50	600	0,03290	13.100	1

(continua)

Tabela 24 – Dados dos ramos: Sudeste-BR.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
43	55	600	0,02000	8.000	1
43	57	600	0,06740	26.800	1
44	51	600	0,06210	24.700	2
44	55	600	0,06240	24.800	2
45	54	1.200	0,02520	33.300	1
45	57	400	0,02250	4.600	3
45	64	1.200	0,09360	111.900	0
45	71	1.200	0,01680	22.200	0
45	79	1.200	0,03030	40.100	1
46	48	1.200	0,01720	20.600	3
47	37	900	0,01110	6.400	1
48	51	560	0,02140	5.000	2
48	71	1.200	0,70180	12.600	0
49	51	600	0,03620	12.900	0
49	52	600	0,06740	24.100	0
49	66	600	0,02170	7.700	1
50	57	600	0,03800	15.100	1
51	52	600	0,08650	30.900	2
52	53	600	0,07430	26.500	2
54	58	1.200	0,07490	89.500	0
54	59	1.200	0,03750	44.800	0
54	67	1.200	0,02450	32.400	0
54	71	1.200	0,02240	29.600	1
56	79	1.200	0,02690	41.600	1
57	66	600	0,03950	14.100	1

(continua)

Tabela 24 – Dados dos ramos: Sudeste-BR.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
57	77	600	0,06810	27.100	1
58	59	1.200	0,07490	89.500	0
59	53	560	0,02140	5.000	1
59	67	1.200	0,01500	17.900	0
60	61	600	0,06050	21.600	2
60	63	600	0,10520	37.500	0
61	63	600	0,05620	20.100	2
62	61	560	0,02140	5.000	0
62	64	1.200	0,01870	22.400	0
62	65	1.200	0,07710	92.200	0
63	64	560	0,02140	5.000	3
64	65	1.300	0,02360	56.700	2
69	70	1.100	0,04080	43.400	1
69	72	750	0,01330	6.100	0
71	66	400	0,02250	4.600	2
73	22	1.100	0,03980	42.300	4
73	30	1.100	0,04920	52.300	1
73	37	1.100	0,02440	25.900	2
73	68	1.100	0,02690	28.600	1
73	70	1.100	0,02520	26.800	1
74	11	2.200	0,00920	86.600	3
75	32	600	0,02820	11.200	1
75	35	600	0,06580	23.500	3
76	9	200	0,19200	16.000	1
77	78	600	0,04930	17.600	1

(continua)

Tabela 24 – Dados dos ramos: Sudeste-BR.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
78	79	400	0,02250	4.600	2

Fonte: Adaptado de Mendonça (2012).

A.2.5 Nordeste brasileiro 87 barras

Tabela 25 – Dados das barras: Nordeste-BR sem redespacho - Plano 1.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	1.857	0	30	189	0	59	0	0
2	0	4.048	31	110	0	60	0	0
3	0	0	32	0	0	61	0	0
4	0	517	33	0	0	62	0	0
5	0	0	34	28	0	63	0	0
6	0	0	35	0	1.635	64	0	0
7	31	0	36	225	0	65	0	0
8	0	403	37	0	169	66	0	0
9	0	465	38	0	0	67	0	1.242
10	0	538	39	186	0	68	0	888
11	0	2.200	40	1.201	0	69	0	902
12	0	2.257	41	520	0	70	0	0
13	0	4.510	42	341	0	71	0	0
14	0	542	43	0	0	72	0	0
15	0	0	44	4.022	0	73	0	0
16	0	0	45	0	0	74	0	0

(continua)

Tabela 25 – Dados das barras: Nordeste-BR sem redespacho - Plano 1.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
17	0	0	46	205	0	75	0	0
18	0	0	47	0	0	76	0	0
19	86	0	48	347	0	77	0	0
20	125	0	49	777	0	78	0	0
21	722	0	50	5.189	0	79	0	0
22	291	0	51	290	0	80	0	0
23	58	0	52	707	0	81	0	0
24	159	0	53	0	0	82	0	0
25	1.502	0	54	0	0	83	0	0
26	47	0	55	0	0	84	0	0
27	378	0	56	0	0	85	487	0
28	189	0	57	0	0	86	0	0
29	47	0	58	0	0	87	0	0

Fonte: Adaptado de Romero et al. (2002).

Tabela 26 – Dados das barras: Nordeste-BR sem redespacho - Plano 2.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	2.747	0	30	273	0	59	0	0
2	0	4.550	31	225	0	60	0	0
3	0	0	32	0	0	61	0	0
4	0	6.422	33	0	0	62	0	0
5	0	0	34	107	0	63	0	0
6	0	0	35	0	1.531	64	0	0

(continua)

Tabela 26 – Dados das barras: Nordeste-BR sem redespacho - Plano 2.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
7	31	0	36	325	0	65	0	0
8	0	82	37	0	114	66	0	0
9	0	465	38	0	0	67	0	1.242
10	0	538	39	269	0	68	0	888
11	0	2.260	40	1.738	0	69	0	902
12	0	4.312	41	752	0	70	0	0
13	0	5.900	42	494	0	71	0	0
14	0	542	43	0	0	72	0	0
15	0	0	44	5.819	0	73	0	0
16	0	0	45	0	0	74	0	0
17	0	0	46	297	0	75	0	0
18	0	0	47	0	0	76	0	0
19	125	0	48	432	0	77	0	0
20	181	0	49	1.124	0	78	0	0
21	1.044	0	50	7.628	0	79	0	0
22	446	0	51	420	0	80	0	0
23	84	0	52	1.024	0	81	0	0
24	230	0	53	0	0	82	0	0
25	2.273	0	54	0	0	83	0	0
26	68	0	55	0	0	84	0	0
27	546	0	56	0	0	85	705	0
28	273	0	57	0	0	86	0	0
29	68	0	58	0	0	87	0	0

Fonte: Adaptado de Romero et al. (2002).

Tabela 27 – Dados das barras: Nordeste-BR com redespacho - Plano 1.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	1.857,0	0,0	30	189,0	0,0	59	0,0	0,0
2	0,0	5.262,4	31	110,0	0,0	60	0,0	0,0
3	0,0	0,0	32	0,0	0,0	61	0,0	0,0
4	0,0	672,1	33	0,0	0,0	62	0,0	0,0
5	0,0	0,0	34	28,0	0,0	63	0,0	0,0
6	0,0	0,0	35	0,0	2.125,5	64	0,0	0,0
7	31,0	0,0	36	225,0	0,0	65	0,0	0,0
8	0,0	523,9	37	0,0	219,7	66	0,0	0,0
9	0,0	604,5	38	0,0	0,0	67	0,0	1.614,6
10	0,0	699,4	39	186,0	0,0	68	0,0	1.154,4
11	0,0	2.860,0	40	1.201,0	0,0	69	0,0	1.172,6
12	0,0	2.934,1	41	520,0	0,0	70	0,0	0,0
13	0,0	5.863,0	42	341,0	0,0	71	0,0	0,0
14	0,0	704,6	43	0,0	0,0	72	0,0	0,0
15	0,0	0,0	44	4.022,0	0,0	73	0,0	0,0
16	0,0	0,0	45	0,0	0,0	74	0,0	0,0
17	0,0	0,0	46	205,0	0,0	75	0,0	0,0
18	0,0	0,0	47	0,0	0,0	76	0,0	0,0
19	86,0	0,0	48	347,0	0,0	77	0,0	0,0
20	125,0	0,0	49	777,0	0,0	78	0,0	0,0
21	722,0	0,0	50	5.189,0	0,0	79	0,0	0,0
22	291,0	0,0	51	290,0	0,0	80	0,0	0,0
23	58,0	0,0	52	707,0	0,0	81	0,0	0,0
24	159,0	0,0	53	0,0	0,0	82	0,0	0,0
25	1.502,0	0,0	54	0,0	0,0	83	0,0	0,0
26	47,0	0,0	55	0,0	0,0	84	0,0	0,0

(continua)

Tabela 27 – Dados das barras: Nordeste-BR com redespacho - Plano 1.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
27	378,0	0,0	56	0,0	0,0	85	487,0	0,0
28	189,0	0,0	57	0,0	0,0	86	0,0	0,0
29	47,0	0,0	58	0,0	0,0	87	0,0	0,0

Fonte: Adaptado de Romero et al. (2002).

Tabela 28 – Dados das barras: Nordeste-BR com redespacho - Plano 2.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	2.747,0	0,0	30	273,0	0,0	59	0,0	0,0
2	0,0	5.915,0	31	225,0	0,0	60	0,0	0,0
3	0,0	0,0	32	0,0	0,0	61	0,0	0,0
4	0,0	8.348,6	33	0,0	0,0	62	0,0	0,0
5	0,0	0,0	34	107,0	0,0	63	0,0	0,0
6	0,0	0,0	35	0,0	1.990,3	64	0,0	0,0
7	31,0	0,0	36	325,0	0,0	65	0,0	0,0
8	0,0	106,6	37	0,0	148,2	66	0,0	0,0
9	0,0	604,5	38	0,0	0,0	67	0,0	1.614,6
10	0,0	699,4	39	269,0	0,0	68	0,0	1.154,4
11	0,0	2.938,0	40	1.738,0	0,0	69	0,0	1.172,6
12	0,0	5.605,6	41	752,0	0,0	70	0,0	0,0
13	0,0	7.670,0	42	494,0	0,0	71	0,0	0,0
14	0,0	704,6	43	0,0	0,0	72	0,0	0,0
15	0,0	0,0	44	5.819,0	0,0	73	0,0	0,0
16	0,0	0,0	45	0,0	0,0	74	0,0	0,0

(continua)

Tabela 28 – Dados das barras: Nordeste-BR com redespacho - Plano 2.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
17	0,0	0,0	46	297,0	0,0	75	0,0	0,0
18	0,0	0,0	47	0,0	0,0	76	0,0	0,0
19	125,0	0,0	48	432,0	0,0	77	0,0	0,0
20	181,0	0,0	49	1.124,0	0,0	78	0,0	0,0
21	1.044,0	0,0	50	7.628,0	0,0	79	0,0	0,0
22	446,0	0,0	51	420,0	0,0	80	0,0	0,0
23	84,0	0,0	52	1.024,0	0,0	81	0,0	0,0
24	230,0	0,0	53	0,0	0,0	82	0,0	0,0
25	2.273,0	0,0	54	0,0	0,0	83	0,0	0,0
26	68,0	0,0	55	0,0	0,0	84	0,0	0,0
27	546,0	0,0	56	0,0	0,0	85	705,0	0,0
28	273,0	0,0	57	0,0	0,0	86	0,0	0,0
29	68,0	0,0	58	0,0	0,0	87	0,0	0,0

Fonte: Adaptado de Romero et al. (2002).

Tabela 29 – Dados dos ramos: Nordeste-BR.

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
35	46	170	0,2172	12.705	4
35	47	170	0,1327	8.085	2
35	51	170	0,1602	9.625	3
36	39	170	0,1189	7.315	2
36	46	170	0,0639	4.235	2

(continua)

Tabela 29 – Dados dos ramos: Nordeste-BR.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
39	42	170	0,0973	6.105	1
39	86	300	0,0233	7.510	0
40	45	600	0,0117	8.926	1
40	46	170	0,0875	5.500	3
41	64	300	0,0233	7.510	0
42	44	170	0,0698	4.565	2
42	85	170	0,0501	3.465	2
43	55	1.000	0,0254	31.326	0
43	58	1.000	0,0313	38.160	0
44	46	170	0,1671	10.010	3
47	48	170	0,1966	11.660	2
48	49	170	0,0757	4.895	1
48	50	170	0,0256	2.090	2
48	51	170	0,2163	12.760	2
49	50	170	0,0835	5.335	1
51	52	170	0,0560	3.795	2
52	59	600	0,0117	8.926	1
53	54	1.000	0,0270	32.120	0
53	70	1.000	0,0371	44.860	0
53	76	1.200	0,0058	21.232	0
53	86	1.000	0,0389	46.870	0
54	55	1.000	0,0206	25.028	0
54	58	1.000	0,0510	60.940	0
54	63	1.000	0,0203	25.430	0
54	70	1.000	0,0360	43.520	0

(continua)

Tabela 29 – Dados dos ramos: Nordeste-BR.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
54	79	1.200	0,0058	21.232	0
56	57	1.000	0,0122	16.050	0
58	78	1.200	0,0058	21.232	0
60	66	300	0,0233	7.510	0
60	87	1.000	0,0377	45.530	0
61	64	1.000	0,0186	23.420	0
61	85	300	0,0233	7.510	0
61	86	1.000	0,0139	18.060	0
62	67	1.000	0,0464	55.580	0
62	68	1.000	0,0557	66.300	0
62	72	1.200	0,0058	21.232	0
63	64	1.000	0,0290	35.480	0
65	66	170	0,3146	18.260	0
65	87	300	0,0233	7.510	0
67	68	1.000	0,0290	35.480	0
67	69	1.000	0,0209	26.100	0
67	71	1.200	0,0058	21.232	0
68	69	1.000	0,0139	18.060	0
68	83	1.200	0,0058	21.232	0
68	87	1.000	0,0186	23.240	0
69	87	1.000	0,0139	18.060	0
70	82	1.200	0,0058	21.232	0
71	72	3.200	0,0108	125.253	0
71	75	3.200	0,0108	125.253	0
71	83	3.200	0,0067	80.253	0

(continua)

Tabela 29 – Dados dos ramos: Nordeste-BR.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
72	73	3.200	0,0100	116.253	0
72	83	3.200	0,0130	149.253	0
73	74	3.200	0,0130	149.253	0
73	75	3.200	0,0130	149.253	0
73	84	3.200	0,0092	107.253	0
74	84	3.200	0,0108	125.253	0
75	76	3.200	0,0162	185.253	0
75	81	3.200	0,0113	131.253	0
75	82	3.200	0,0086	101.253	0
75	83	3.200	0,0111	128.253	0
76	77	3.200	0,0130	149.253	0
76	82	3.200	0,0086	101.253	0
76	84	3.200	0,0059	70.953	0
77	79	3.200	0,0151	173.253	0
77	84	3.200	0,0115	132.753	0
78	79	3.200	0,0119	137.253	0
78	80	3.200	0,0051	62.253	0
79	82	3.200	0,0084	98.253	0
80	81	3.200	0,0101	117.753	0
80	82	3.200	0,0108	125.253	0
80	83	3.200	0,0094	110.253	0
81	83	3.200	0,0016	23.253	0
82	84	3.200	0,0135	155.253	0

Fonte: Adaptado de Romero et al. (2002).

A.2.6 Colombiano 93 barras

Tabela 30 – Dados das barras: Colombiano sem redespacho - Plano 1.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	0,0	240,0	32	126,0	0,0	63	35,0	900,0
2	352,9	0,0	33	165,0	0,0	64	88,0	0,0
3	393,0	0,0	34	77,5	0,0	65	132,0	0,0
4	0,0	0,0	35	172,0	200,0	66	0,0	200,0
5	235,0	40,0	36	112,0	0,0	67	266,0	474,0
6	0,0	34,0	37	118,0	138,0	68	0,0	0,0
7	300,0	0,0	38	86,0	0,0	69	71,4	0,0
8	339,0	100,0	39	180,0	0,0	70	0,0	30,0
9	348,0	0,0	40	0,0	305,0	71	315,0	0,0
10	60,0	0,0	41	54,8	70,0	72	0,0	0,0
11	147,0	80,0	42	102,0	0,0	73	0,0	0,0
12	0,0	47,0	43	35,4	0,0	74	0,0	0,0
13	174,0	0,0	44	257,0	23,0	75	0,0	0,0
14	0,0	0,0	45	0,0	950,0	76	0,0	40,0
15	377,0	0,0	46	121,0	150,0	77	55,0	0,0
16	236,0	0,0	47	41,2	0,0	78	36,7	0,0
17	136,0	35,0	48	600,0	775,0	79	98,0	0,0
18	36,2	480,0	49	130,0	0,0	80	60,0	0,0
19	19,6	900,0	50	424,0	240,0	81	0,0	0,0
20	202,4	0,0	51	128,0	0,0	82	0,0	0,0
21	186,0	0,0	52	38,0	0,0	83	0,0	0,0
22	53,0	200,0	53	0,0	280,0	84	0,0	0,0
23	203,0	0,0	54	76,0	0,0	85	0,0	0,0
24	0,0	120,0	55	223,0	40,0	86	0,0	0,0
25	0,0	86,0	56	0,0	0,0	87	0,0	0,0

(continua)

Tabela 30 – Dados das barras: Colombiano sem redespacho - Plano 1.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
26	0,0	70,0	57	226,0	0,0	88	0,0	0,0
27	266,0	0,0	58	0,0	190,0	89	0,0	0,0
28	326,0	0,0	59	0,0	160,0	90	0,0	0,0
29	339,0	618,0	60	0,0	1.191,0	91	0,0	0,0
30	137,0	0,0	61	0,0	155,0	92	0,0	0,0
31	234,0	189,0	62	0,0	0,0	93	0,0	0,0

Fonte: Adaptado de Escobar (2002).

Tabela 31 – Dados das barras: Colombiano sem redespacho - Plano 2.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	0,0	240,0	32	157,3	0,0	63	44,0	1.090,0
2	406,5	165,0	33	206,5	0,0	64	110,6	0,0
3	490,5	0,0	34	96,7	0,0	65	165,0	0,0
4	0,0	0,0	35	214,6	200,0	66	0,0	300,0
5	293,6	40,0	36	140,0	0,0	67	332,5	474,0
6	0,0	34,0	37	147,3	138,0	68	0,0	0,0
7	374,3	0,0	38	108,4	15,0	69	89,0	0,0
8	423,0	230,0	39	224,0	0,0	70	0,0	180,0
9	434,1	0,0	40	0,0	305,0	71	393,0	211,0
10	74,2	0,0	41	68,4	100,0	72	0,0	0,0
11	183,9	108,0	42	127,3	0,0	73	0,0	0,0
12	0,0	47,0	43	44,2	0,0	74	0,0	0,0
13	217,3	0,0	44	321,3	23,0	75	0,0	0,0

(continua)

Tabela 31 – Dados das barras: Colombiano sem redespacho - Plano 2.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
14	0,0	0,0	45	0,0	1.208,0	76	0,0	40,0
15	470,2	0,0	46	151,7	150,0	77	70,0	0,0
16	294,0	0,0	47	51,5	0,0	78	45,1	0,0
17	169,6	35,0	48	750,0	885,0	79	123,0	0,0
18	45,2	540,0	49	162,0	0,0	80	72,0	0,0
19	24,5	1.340,0	50	528,0	240,0	81	0,0	0,0
20	252,5	0,0	51	159,0	0,0	82	0,0	0,0
21	231,7	0,0	52	46,5	0,0	83	0,0	0,0
22	66,1	200,0	53	0,0	320,0	84	0,0	0,0
23	252,5	0,0	54	95,3	0,0	85	0,0	0,0
24	0,0	150,0	55	279,0	40,0	86	0,0	300,0
25	0,0	86,0	56	0,0	0,0	87	0,0	0,0
26	0,0	70,0	57	281,0	130,0	88	0,0	0,0
27	331,4	0,0	58	0,0	190,0	89	0,0	0,0
28	406,3	0,0	59	0,0	160,0	90	0,0	0,0
29	422,6	618,0	60	0,0	1.216,0	91	0,0	0,0
30	166,7	0,0	61	0,0	155,0	92	0,0	0,0
31	327,3	189,0	62	0,0	0,0	93	0,0	0,0

Fonte: Adaptado de Escobar (2002).

Tabela 32 – Dados das barras: Colombiano sem redespacho - Plano 3.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	0,0	240,0	32	188,3	0,0	63	52,8	1.090,0

(continua)

Tabela 32 – Dados das barras: Colombiano sem redespacho - Plano 3.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
2	486,7	165,0	33	247,2	0,0	64	132,4	280,0
3	587,1	0,0	34	115,8	0,0	65	197,6	0,0
4	0,0	0,0	35	256,9	200,0	66	0,0	300,0
5	351,4	40,0	36	167,3	44,0	67	398,0	474,0
6	0,0	34,0	37	176,3	138,0	68	0,0	0,0
7	448,0	136,0	38	129,7	15,0	69	106,6	0,0
8	505,9	230,0	39	268,2	15,0	70	0,0	180,0
9	519,7	0,0	40	0,0	305,0	71	471,2	424,0
10	88,8	0,0	41	81,9	100,0	72	0,0	0,0
11	220,2	108,0	42	152,4	0,0	73	0,0	0,0
12	0,0	47,0	43	52,9	0,0	74	0,0	0,0
13	260,1	0,0	44	384,6	23,0	75	0,0	0,0
14	0,0	0,0	45	0,0	1.208,0	76	0,0	40,0
15	562,8	0,0	46	181,6	150,0	77	82,9	0,0
16	351,9	0,0	47	61,6	0,0	78	54,1	0,0
17	203,0	35,0	48	896,3	885,0	79	146,9	300,0
18	54,1	540,0	49	193,3	0,0	80	88,3	0,0
19	29,3	1.340,0	50	632,8	240,0	81	0,0	0,0
20	302,3	45,0	51	190,5	0,0	82	0,0	0,0
21	277,4	0,0	52	55,6	0,0	83	0,0	0,0
22	79,2	200,0	53	0,0	320,0	84	0,0	500,0
23	302,3	0,0	54	114,2	0,0	85	0,0	0,0
24	0,0	150,0	55	333,6	40,0	86	0,0	850,0
25	0,0	86,0	56	0,0	0,0	87	0,0	0,0
26	0,0	70,0	57	336,9	130,0	88	0,0	300,0

(continua)

Tabela 32 – Dados das barras: Colombiano sem redespacho - Plano 3.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
27	396,7	0,0	58	0,0	190,0	89	0,0	0,0
28	486,4	14,0	59	0,0	160,0	90	0,0	0,0
29	506,0	618,0	60	0,0	1.216,0	91	0,0	0,0
30	199,6	0,0	61	0,0	155,0	92	0,0	0,0
31	391,9	189,0	62	0,0	0,0	93	0,0	0,0

Fonte: Adaptado de Escobar (2002).

Tabela 33 – Dados das barras: Colombiano com redespacho - Plano 1.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	0,0	288,0	32	126,0	0,0	63	35,0	1.080,0
2	352,9	0,0	33	165,0	0,0	64	88,0	0,0
3	393,0	0,0	34	77,5	0,0	65	132,0	0,0
4	0,0	0,0	35	172,0	240,0	66	0,0	240,0
5	235,0	48,0	36	112,0	0,0	67	266,0	568,0
6	0,0	40,0	37	118,0	165,0	68	0,0	0,0
7	300,0	0,0	38	86,0	0,0	69	71,4	0,0
8	339,0	120,0	39	180,0	0,0	70	0,0	36,0
9	348,0	0,0	40	0,0	366,0	71	315,0	0,0
10	60,0	0,0	41	54,8	84,0	72	0,0	0,0
11	147,0	96,0	42	102,0	0,0	73	0,0	0,0
12	0,0	56,0	43	35,4	0,0	74	0,0	0,0
13	174,0	0,0	44	257,0	27,0	75	0,0	0,0
14	0,0	0,0	45	0,0	1.140,0	76	0,0	48,0

(continua)

Tabela 33 – Dados das barras: Colombiano com redespacho - Plano 1.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
15	377,0	0,0	46	121,0	180,0	77	55,0	0,0
16	236,0	0,0	47	41,2	0,0	78	36,7	0,0
17	136,0	42,0	48	600,0	930,0	79	98,0	0,0
18	36,2	576,0	49	130,0	0,0	80	60,0	0,0
19	19,6	1.080,0	50	424,0	288,0	81	0,0	0,0
20	202,4	0,0	51	128,0	0,0	82	0,0	0,0
21	186,0	0,0	52	38,0	0,0	83	0,0	0,0
22	53,0	240,0	53	0,0	336,0	84	0,0	0,0
23	203,0	0,0	54	76,0	0,0	85	0,0	0,0
24	0,0	144,0	55	223,0	48,0	86	0,0	0,0
25	0,0	103,0	56	0,0	0,0	87	0,0	0,0
26	0,0	84,0	57	226,0	0,0	88	0,0	0,0
27	266,0	0,0	58	0,0	228,0	89	0,0	0,0
28	326,0	0,0	59	0,0	192,0	90	0,0	0,0
29	339,0	741,0	60	0,0	1.429,0	91	0,0	0,0
30	137,0	0,0	61	0,0	186,0	92	0,0	0,0
31	234,0	226,0	62	0,0	0,0	93	0,0	0,0

Fonte: Adaptado de Escobar (2002).

Tabela 34 – Dados das barras: Colombiano com redespacho - Plano 2.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	0,0	288,0	32	157,3	0,0	63	44,0	1.308,0
2	406,5	198,0	33	206,5	0,0	64	110,6	0,0

(continua)

Tabela 34 – Dados das barras: Colombiano com redespacho - Plano 2.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
3	490,5	0,0	34	96,7	0,0	65	165,0	0,0
4	0,0	0,0	35	214,6	240,0	66	0,0	360,0
5	293,6	48,0	36	140,0	0,0	67	332,5	568,0
6	0,0	40,0	37	147,3	165,0	68	0,0	0,0
7	374,3	0,0	38	108,4	18,0	69	89,0	0,0
8	423,0	276,0	39	224,0	0,0	70	0,0	216,0
9	434,1	0,0	40	0,0	366,0	71	393,0	253,0
10	74,2	0,0	41	68,4	120,0	72	0,0	0,0
11	183,9	129,0	42	127,3	0,0	73	0,0	0,0
12	0,0	56,0	43	44,2	0,0	74	0,0	0,0
13	217,3	0,0	44	321,3	27,0	75	0,0	0,0
14	0,0	0,0	45	0,0	1.449,0	76	0,0	48,0
15	470,2	0,0	46	151,7	180,0	77	70,0	0,0
16	294,0	0,0	47	51,5	0,0	78	45,1	0,0
17	169,6	42,0	48	750,0	1.062,0	79	123,0	0,0
18	45,2	648,0	49	162,0	0,0	80	72,0	0,0
19	24,5	1.608,0	50	528,0	288,0	81	0,0	0,0
20	252,5	0,0	51	159,0	0,0	82	0,0	0,0
21	231,7	0,0	52	46,5	0,0	83	0,0	0,0
22	66,1	240,0	53	0,0	384,0	84	0,0	0,0
23	252,5	0,0	54	95,3	0,0	85	0,0	0,0
24	0,0	180,0	55	279,0	48,0	86	0,0	360,0
25	0,0	103,0	56	0,0	0,0	87	0,0	0,0
26	0,0	84,0	57	281,0	156,0	88	0,0	0,0
27	331,4	0,0	58	0,0	228,0	89	0,0	0,0

(continua)

Tabela 34 – Dados das barras: Colombiano com redespacho - Plano 2.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
28	406,3	0,0	59	0,0	192,0	90	0,0	0,0
29	422,6	741,0	60	0,0	1.459,0	91	0,0	0,0
30	166,7	0,0	61	0,0	186,0	92	0,0	0,0
31	327,3	226,0	62	0,0	0,0	93	0,0	0,0

Fonte: Adaptado de Escobar (2002).

Tabela 35 – Dados das barras: Colombiano com redespacho - Plano 3.

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
1	0,0	288,0	32	188,3	0,0	63	52,8	1.308,0
2	486,7	198,0	33	247,2	0,0	64	132,4	336,0
3	587,1	0,0	34	115,8	0,0	65	197,6	0,0
4	0,0	0,0	35	256,9	240,0	66	0,0	360,0
5	351,4	48,0	36	167,3	52,8	67	398,0	568,8
6	0,0	40,8	37	176,3	165,6	68	0,0	0,0
7	448,0	163,2	38	129,7	18,0	69	106,6	0,0
8	505,9	276,0	39	268,2	18,0	70	0,0	216,0
9	519,7	0,0	40	0,0	366,0	71	471,2	508,8
10	88,8	0,0	41	81,9	120,0	72	0,0	0,0
11	220,2	129,6	42	152,4	0,0	73	0,0	0,0
12	0,0	56,4	43	52,9	0,0	74	0,0	0,0
13	260,1	0,0	44	384,6	27,6	75	0,0	0,0
14	0,0	0,0	45	0,0	1.449,6	76	0,0	48,0
15	562,8	0,0	46	181,6	180,0	77	82,9	0,0

(continua)

Tabela 35 – Dados das barras: Colombiano com redespacho - Plano 3.

(continuação)

Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)	Barra	Demanda (MW)	Geração (MW)
16	351,9	0,0	47	61,6	0,0	78	54,1	0,0
17	203,0	42,0	48	896,3	1.062,0	79	146,9	360,0
18	54,1	648,0	49	193,3	0,0	80	88,3	0,0
19	29,3	1.608,0	50	632,8	288,0	81	0,0	0,0
20	302,3	54,0	51	190,5	0,0	82	0,0	0,0
21	277,4	0,0	52	55,6	0,0	83	0,0	0,0
22	79,2	240,0	53	0,0	384,0	84	0,0	600,0
23	302,3	0,0	54	114,2	0,0	85	0,0	0,0
24	0,0	180,0	55	333,6	48,0	86	0,0	1.020,0
25	0,0	103,2	56	0,0	0,0	87	0,0	0,0
26	0,0	84,0	57	336,9	156,0	88	0,0	360,0
27	396,7	0,0	58	0,0	228,0	89	0,0	0,0
28	486,4	16,8	59	0,0	192,0	90	0,0	0,0
29	506,0	741,6	60	0,0	1.459,2	91	0,0	0,0
30	199,6	0,0	61	0,0	186,0	92	0,0	0,0
31	391,9	226,8	62	0,0	0,0	93	0,0	0,0

Fonte: Adaptado de Escobar (2002).

Tabela 36 – Dados dos ramos: Colombiano.

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
52	88	300	0,0980	34.190	0
43	88	250	0,1816	39.560	0

(continua)

Tabela 36 – Dados dos ramos: Colombiano.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
57	81	550	0,0219	58.890	0
73	82	550	0,0374	97.960	0
27	89	450	0,0267	13.270	0
74	89	550	0,0034	14.570	0
73	89	550	0,0246	66.650	0
79	83	350	0,0457	15.400	0
8	67	250	0,2240	29.200	0
39	86	350	0,0545	9.880	0
25	28	320	0,0565	9.767	1
25	29	320	0,0570	9.882	1
13	14	350	0,0009	3.902	2
13	20	350	0,0178	5.742	1
13	23	350	0,0277	7.007	1
14	31	250	0,1307	18.622	2
14	18	250	0,1494	20.232	2
14	60	300	0,1067	15.977	2
2	4	350	0,0271	6.662	2
2	9	350	0,0122	5.282	1
2	83	570	0,0200	5.972	1
9	83	400	0,0200	5.972	1
15	18	450	0,0365	7.927	1
15	17	320	0,0483	9.422	1
15	20	320	0,0513	9.652	1
15	76	320	0,0414	9.882	1
15	24	350	0,0145	5.282	1

(continua)

Tabela 36 – Dados dos ramos: Colombiano.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
37	61	350	0,0139	4.937	1
19	61	250	0,1105	16.092	2
61	68	250	0,0789	12.412	1
37	68	320	0,0544	9.652	1
40	68	320	0,1320	18.162	1
12	75	320	0,0641	11.492	1
24	75	350	0,0161	5.512	1
35	36	250	0,2074	27.362	1
27	35	250	0,1498	22.072	1
35	44	250	0,1358	20.347	2
38	68	350	0,0389	7.927	1
38	39	350	0,0300	6.317	1
27	80	350	0,0242	7.007	1
44	80	250	0,1014	17.587	1
56	81	550	0,0114	32.858	1
45	54	320	0,0946	13.562	1
45	50	350	0,0070	4.362	2
10	78	350	0,0102	4.937	1
7	78	350	0,0043	4.132	1
30	64	250	0,1533	20.577	1
30	65	250	0,0910	13.677	1
30	72	350	0,0173	5.512	2
55	57	600	0,0174	46.808	1
57	84	600	0,0087	26.658	1
55	84	600	0,0087	26.658	1

(continua)

Tabela 36 – Dados dos ramos: Colombiano.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
56	57	600	0,0240	62.618	2
9	77	350	0,0190	5.857	1
77	79	350	0,0097	5.167	1
1	59	350	0,0232	6.202	2
59	67	250	0,1180	16.667	2
8	59	250	0,1056	15.402	2
1	3	250	0,1040	15.862	1
3	71	450	0,0136	5.167	1
3	6	350	0,0497	9.422	1
55	62	550	0,0281	70.988	1
47	52	350	0,0644	10.572	1
51	52	250	0,0859	12.872	1
29	31	250	0,1042	32.981	2
41	42	350	0,0094	4.707	1
40	42	350	0,0153	5.167	1
46	53	250	0,1041	14.597	2
46	51	250	0,1141	16.322	1
69	70	350	0,0228	6.202	2
66	69	250	0,1217	17.127	2
9	69	350	0,1098	15.747	2
60	69	350	0,0906	13.677	2
31	32	350	0,0259	6.547	1
32	34	350	0,0540	9.767	1
16	18	350	0,0625	10.917	1
16	23	350	0,0238	6.892	1

(continua)

Tabela 36 – Dados dos ramos: Colombiano.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
16	21	350	0,0282	6.892	1
31	34	250	0,0792	12.412	1
31	33	350	0,0248	6.432	2
31	60	250	0,1944	25.982	2
31	72	350	0,0244	6.317	2
47	54	250	0,1003	14.252	2
47	49	250	0,0942	13.562	2
18	58	350	0,0212	5.742	2
18	20	350	0,0504	9.537	1
18	66	350	0,0664	11.377	2
18	21	350	0,0348	7.467	1
18	22	350	0,0209	6.432	1
19	22	350	0,0691	11.722	1
4	5	350	0,0049	4.247	3
5	6	350	0,0074	4.477	2
17	23	250	0,0913	12.987	1
17	76	350	0,0020	3.902	1
12	17	350	0,0086	4.707	1
1	71	250	0,0841	14.367	2
1	8	250	0,0810	13.217	1
1	11	250	0,0799	12.527	1
4	36	250	0,0850	13.562	2
19	58	320	0,0826	11.722	1
27	64	350	0,0280	6.777	1
27	28	350	0,0238	6.202	1

(continua)

Tabela 36 – Dados dos ramos: Colombiano.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
27	44	250	0,0893	16.322	1
26	27	350	0,0657	10.917	1
27	29	350	0,0166	5.052	1
19	66	350	0,0516	9.307	1
73	74	600	0,0214	58.278	1
64	65	350	0,0741	11.837	1
29	64	350	0,0063	4.362	1
4	34	270	0,1016	14.942	2
34	70	350	0,0415	8.272	2
33	34	320	0,1139	16.322	1
8	71	400	0,0075	4.477	1
54	63	320	0,0495	9.077	3
48	63	350	0,0238	6.317	1
67	68	250	0,1660	22.072	2
39	68	350	0,0145	5.282	1
8	9	350	0,0168	5.972	1
79	87	350	0,0071	4.477	1
8	87	350	0,0132	5.167	1
39	43	250	0,1163	16.552	1
41	43	250	0,1142	16.322	1
23	24	350	0,0255	6.317	1
21	22	350	0,0549	9.882	1
26	28	350	0,0512	9.307	1
28	29	350	0,0281	6.777	1
6	10	350	0,0337	7.582	1

(continua)

Tabela 36 – Dados dos ramos: Colombiano.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
33	72	350	0,0228	6.202	1
39	40	250	0,1020	16.207	2
12	76	350	0,0081	4.707	1
48	54	350	0,0396	8.042	3
50	54	250	0,0876	12.872	2
62	73	750	0,0272	73.158	1
49	53	250	0,1008	14.252	2
40	41	350	0,0186	5.742	1
45	81	450	0,0267	13.270	1
64	74	500	0,0267	13.270	1
54	56	450	0,0267	13.270	3
60	62	450	0,0257	13.270	3
72	73	500	0,0267	13.270	2
19	82	450	0,0267	13.270	1
55	82	550	0,0290	77.498	1
62	82	600	0,0101	30.998	1
83	85	450	0,0267	13.270	2
82	85	700	0,0341	89.898	1
19	86	300	0,1513	20.922	1
68	86	350	0,0404	8.272	1
7	90	350	0,0050	4.247	2
3	90	350	0,0074	4.592	1
90	91	550	0,0267	13.270	1
85	91	600	0,0139	40.298	1
11	92	450	0,0267	13.270	1

(continua)

Tabela 36 – Dados dos ramos: Colombiano.

(continuação)

Barra de Origem	Barra de Destino	Fluxo Máximo (MW)	Reatância (p.u.)	Custo (US\$×10 ³)	Linhas Existentes
1	93	450	0,0267	13.270	1
92	93	600	0,0097	30.068	1
91	92	600	0,0088	27.588	1

Fonte: Adaptado de Escobar (2002).