



OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA EM REDES DE DUTOS MULTIPRODUTO

Erito Marques de Souza Filho

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientadores: Laura Silvia Bahiense da Silva

Leite

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Rio de Janeiro

Março de 2013

OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA EM REDES DE DUTOS
MULTIPRODUTO

Erito Marques de Souza Filho

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

Examinada por:

Prof^ª. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

Prof. Artur Alves Pessoa, D.Sc.

Prof. Flávio Neves Junior, D.Sc.

Prof. Edilson Fernandes de Arruda, D.Sc.

Prof. Nelson Maculan Filho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL.

MARÇO DE 2013

Souza Filho, Erito Marques de

Otimização da programação de transferência em redes de dutos multiproduto/ Erito Marques de Souza Filho. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XIII, 137 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Tese (Doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Produção, 2013.

Referencias Bibliográficas: p. 106 - 115.

1. Transporte. 2. Redes de dutos. 3. Programação. I. Leite, Laura Silvia Bahiense da Silva *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título.

Dedico aos meus pais Erito Marques de Souza e Eliene Jesus da Silva. A meus irmãos Carlos e Emerson e a meu sobrinho Vinícius, por tudo que me proporcionaram. A Vaninha.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e a minha família pela dedicação.

A Vaninha pelo amor, apoio e paciência.

Aos Professores Laura Silvia Bahiense da Silva Leite e Virgílio José Martins Ferreira Filho por todo apoio que me foi dado ao longo dessa jornada.

Aos professores Flávio Neves Junior, Artur Alves Pessoa, Edilson Arruda e Nelson Maculan por aceitar o convite para participar da banca examinadora e colaborar com o aperfeiçoamento desta pesquisa.

A Leonardo Mariachi, Ormeu Coelho e Gustavo Neblina pela grande amizade.

Aos funcionários da COPPE-UFRJ: Andreia, Roberta, Diego e Pedro pela ajuda.

Aos amigos de longa data Nilson Trevisan e Vanessa Frota.

A Barbara Pereira, Roger Rocha e Paulo Ribas pelo suporte.

A minhas tias Meire, Edna, Constança, Jane, Ivete, Marimar, Diná, Eliete - pelo apoio.

A minha tia Laura: saudades para sempre e muito obrigado por tudo.

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

OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA EM REDES DE DUTOS MULTIPRODUTO

Erito Marques de Souza Filho

Março/2013

Orientadores: Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Programa: Engenharia de Produção

O transporte de petróleo e dos seus produtos derivados é de grande importância dentro da cadeia de suprimentos na indústria do petróleo. Uma parte relevante do preço dos produtos finais está ligada aos custos logísticos de transporte e armazenagem. O gerenciamento das operações de transporte, de forma a minimizar estes custos é, portanto, um objetivo perseguido continuamente pelas companhias atuantes no setor. Nesse contexto, este trabalho apresenta um modelo matemático de Programação Linear Inteira para realizar a programação de transferência de uma rede de dutoviária com múltiplas fontes, destinos e produtos. Foi desenvolvido também uma heurística para pós-processamento das soluções e um procedimento para determinação de limites inferiores para o problema. Além disso, foram avaliadas possíveis modificações na formulação matemática do problema e os impactos na programação decorrentes da redução do consumo de óleo combustível e da utilização de estoques de segurança. Ademais, foi desenvolvida uma ferramenta computacional para visualização da programação das atividades da rede.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

SCHEDULING OPTIMIZATION IN MULTIPRODUCT PIPELINE NETWORK

Erito Marques de Souza Filho

March/2013

Advisors: Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Department: Industrial Engineering

The transportation of oil and its derivatives is of vital importance within the supply chain in the petroleum industry. A relevant part of the final price of petroleum products is linked to logistics costs: transportation and storage. The management of transportation operations to minimize these costs is therefore a goal pursued constantly by companies operating in the sector. In this context, this work presents an Integer Programming mathematical model to design the scheduling of a pipeline network with multiple sources, destinations and pumped products. Heuristic for postprocessing solutions and a procedure to determine lower bounds for the problem were also developed. Furthermore, possible changes in the mathematical formulation of the problem and the impact on scheduling from reduced fuel oil consumption and use safety stocks were evaluated. In addition, we developed a computational tool for viewing the programming of network activities.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO.....	2
1.2. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	4
1.3. CONTRIBUIÇÕES ALCANÇADAS.....	5
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	6
2. PROBLEMA DE TRANSPORTE DUTOVIÁRIO (PTD).....	7
2.1. O PROBLEMA.....	7
2.2. TERMINOLOGIA.....	10
2.3. RESTRIÇÕES DO PTD	11
2.4. MÉTRICA DE AVALIAÇÃO DAS SOLUÇÕES	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1. TRABALHOS ENVOLVENDO UM POLIDUTO, UMA FONTE E UM DESTINO 16	
3.2. TRABALHOS ENVOLVENDO UM POLIDUTO, UMA FONTE E VÁRIOS DESTINOS.....	19
3.3. TRABALHOS ENVOLVENDO REDE DE DUTOS.....	23
3.4. SÍNTESE DOS TRABALHOS SOBRE SCHEDULING EM DUTOS	32
3.5. BREVE REVISÃO SOBRE OTIMIZAÇÃO ROBUSTA.....	38
4. MODELO MATEMÁTICO E HEURÍSTICAS.....	41
4.1. PROBLEMÁTICA E HIPÓTESES CONSIDERADAS.....	41
4.2. MODELO ESQUEMÁTICO E NOTAÇÃO UTILIZADA.....	45
4.3. FUNÇÃO OBJETIVO.....	48
4.4. RESTRIÇÕES DE BALANÇO VOLUMÉTRICO	49
4.5. RESTRIÇÕES DE ENVIO, RECEBIMENTO E DESLOCAMENTO DE PRODUTOS NO DUTO	51
4.6. RESTRIÇÕES DE INTERFACE.....	52
4.7. RESTRIÇÕES DE PRODUTOS NOS TRECHOS.....	53
4.8. MODELAGEM DE SITUAÇÕES ESPECÍFICAS	54
4.9. RESTRIÇÕES DE DOMÍNIO DAS VARIÁVEIS.....	59
4.10. HEURÍSTICA PARA GERAÇÃO DE LIMITES INFERIORES	60
4.11. HEURÍSTICA PARA FIXAÇÃO DOS SENTIDOS DOS DUTOS	67
4.12. HEURÍSTICA PARA PÓS-PROCESSAMENTO DAS SOLUÇÕES	68
5. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS.....	72
5.1 PRIMEIRO EXPERIMENTO: TESTES COM INSTÂNCIAS-BASE	73
5.2 SEGUNDO EXPERIMENTO: MUDANÇA DE SENTIDO NOS DUTOS ...	86
5.3 TERCEIRO EXPERIMENTO: INSERÇÃO DE OUTROS GRUPOS DE RESTRIÇÕES.....	87
5.4 QUARTO EXPERIMENTO: AVALIAÇÃO DE OUTRAS FUNÇÕES OBJETIVO 90	
5.5 QUINTO EXPERIMENTO: SUBSTITUIÇÃO DO ÓLEO COMBUSTÍVEL E ESTOQUE MÍNIMO DE SEGURANÇA	93
5.6 SEXTO EXPERIMENTO: PARÂMETROS ROBUSTOS NA FUNÇÃO OBJETIVO.....	96
5.7 SUMÁRIO DOS EXPERIMENTOS	97
6. FERRAMENTA DE VISUALIZAÇÃO GRÁFICA.....	100

7. CONCLUSÕES	104
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Exemplo de uma rede de dutos	8
Figura 4.1: Exemplo de geração de interfaces em um duto	42
Figura 4.2: Exemplo de discretização de um duto	45
Figura 4.3: Deslocamento de produtos em um duto discretizado em quatro trechos.....	52
Figura 4.4: Geração de interface seguida de ociosidade no duto	54
Figura 4.5: Exemplo de produtos enviados em um duto discretizado em um horizonte de planejamento de 7 períodos de tempo	55
Figura 4.6: Exemplo de produtos enviados em um duto discretizado com manutenção programada.....	56
Figura 4.7: Exemplo de aplicação da heurística de pós-processamento	69
Figura 5.1: Rede de dutos.....	74
Figura 6.1: Classes da programação em ActionScript do VISDUT.....	101
Figura 6.2: Ferramenta de visualização gráfica dos dutos (VISDUT).....	102
Figura 6.3: Visualização da ocorrência de interfaces no VISDUT	103
Figura 6.4: Exemplo de zoom em áreas de interesse	103

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1: Gráfico de Gantt representando, para todas as três instâncias, os produtos enviados em cada duto ao longo do horizonte de planejamento bem como as interfaces formadas (destacadas por meio de barras horizontais em negrito)	80
Gráfico 5.2: Valores obtidos na primeira instância-base para os estoques em cada período de tempo na RECAP (A), REPLAN (B), Cubatão (C), REVAP (D), RPBC(E), Santos (F), Barueri (G) e São Caetano (H).	83
Gráfico 5.3: Valores obtidos na segunda instância-base para os estoques em cada período de tempo na RECAP (A), REPLAN (B), Cubatão (C), REVAP (D), RPBC(E), Santos (F), Barueri (G) e São Caetano (H).	84
Gráfico 5.4: Valores obtidos na terceira instância-base para os estoques em cada período de tempo na RECAP (A), REPLAN (B), Cubatão (C), REVAP (D), RPBC(E), Santos (F), Barueri (G) e São Caetano (H).	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Quantidade e extensão de dutos em operação, por função, segundo produtos movimentados 31/12/2008, 31/12/2009 e 31/12/2010.....	3
Tabela 1.2: Extrato do artigo terceiro da Resolução Número 42 da ANP	4
Tabela 3.1: Resumo da literatura a respeito de programação dutoviária em um único duto ...	34
Tabela 3.2: Resumo da literatura a respeito de programação dutoviária em redes de dutos ...	36
Tabela 5.1: Descrição dos seis experimentos realizados.....	72
Tabela 5.2: Informações necessárias e parâmetros utilizados para definição de uma instância	75
Tabela 5.3: Resultados computacionais para as três instâncias testadas após a resolução do modelo PLIM e da aplicação da Heurística de Pós-Processamento (HPP).....	77
Tabela 5.4: Comparação dos resultados obtidos pelo AG com os modelo proposto nas três instâncias-base.....	78
Tabela 5.5: Resultados computacionais para as três instâncias testadas após a resolução do modelo PLIM considerando a escolha de sentidos de operação	87
Tabela 5.6: Resultados computacionais para três instâncias testadas a partir da inserção de diferentes tipos de restrições no modelo matemático.....	91
Tabela 5.7: Resultados computacionais para três instâncias testadas a partir de modificações na função objetivo das três instâncias-base.....	92
Tabela 5.8: Resultados computacionais considerando estoques mínimos de segurança e substituição do óleo combustível	94
Tabela 5.9: Resultados computacionais considerando estoques mínimos de segurança e substituição do óleo combustível (em milhares de metros cúbicos) do estoque ao final do horizonte de planejamento	95
Tabela 5.10: Resultados computacionais considerando incertezas nos valores da função objetivo em um tempo computacional de 4 horas.....	97
Tabela 5.11: Síntese dos resultados obtidos nos seis experimentos realizados	97

LISTA DE SIGLAS

AG	- Algoritmos Genéticos
AI	- Adobe Illustrator
APPS	- Antes do pré-processamento do PLIM -SOLVER
ANP	- Agência Nacional do Petróleo
AS	- Action Script
B&B	- Branch-and-Bound
BPA	- Batch-to-Pipe Assignment
CEL	- Centro de Estudos em Logística
CLP	- Constraint Linear Programming
CNCO	- Centro Nacional de Controle Operacional
DPPS	- Depois do pré-processamento do PLIM -SOLVER
FIFO	- First-In-First-Out
GLP	- Gás Liquefeito de Petróleo
GRASP	- Greed Randorized Adaptive Search Procedure
HFS	- Heurística de Fixação dos Sentidos
HPP	- Heurística de Pós-Processamento
IBP	- Instituto Brasileiro de Petróleo
LCO	- Light Cycle Oil
PLIM	- Programação Linear Inteira Mista
MOEA	- Algoritmos Evolucionários Multiobjetivos
OSBRA	- Oleoduto São Paulo-Brasília
PDDL	- Planning Domain Definition Language
PL	- Programação Linear
PTD	- Problema de Transporte Dutoviário
PTDS	- Problema de Transporte Dutoviário Simplificado
QAv	- Querosene de aviação
RECAP	- Refinaria de Capuava
REPLAN	- Refinaria de Paulínea
REVAP	- Refinaria Henrique Lages
RPBC	- Refinaria Presidente Bernardes
VISDUT	- Visualizador de Dutos
VNS	- Variable Neighborhood Search

1. INTRODUÇÃO

“Nunca tenha medo de tentar algo novo. Lembre-se de que um amador solitário construiu a Arca. Um grande grupo de profissionais construiu o Titanic” – Luís Fernando Veríssimo

Diariamente são movimentados no mundo, em importação e exportação, cerca de 53.500 milhões de barris de petróleo (37.700 de óleo cru e 15.800 de produtos derivados) (BP Statistical Review, 2011). Quantidade equivalente é também movimentada internamente dentro de cada país. Em vista destes grandes números, o tema transporte de petróleo e dos seus produtos derivados assume uma importância vital dentro da cadeia de suprimentos na indústria do petróleo. Uma parte relevante do preço final dos produtos de petróleo está ligada aos custos logísticos: transporte e armazenagem. Assim, gerenciar estas operações de forma a minimizar estes custos logísticos é um objetivo perseguido continuamente pelas companhias atuantes no setor. Para movimentar esta quantidade gigantesca de material a indústria se utiliza de forma integrada dos diversos modais de transporte: dutos, navios, trens e caminhões. Enquanto os navios são o principal modal de transporte intercontinental, os dutos são a principal forma de transporte intracontinental, assumindo os trens e caminhões a tarefa de realizar o transporte regional e local. Apesar de seu alto custo de instalação, os dutos são considerados modais de transporte bastante eficientes para transporte de grandes quantidades de petróleo e de seus derivados por longas distâncias, pois possuem baixos custos de operação quando comparados com outros modais, elevados índices de confiabilidade, baixas taxas de perda de produto, baixo impacto ambiental e sofrem menor influência de condições climatológicas adversas.

As companhias de petróleo operam vastas e complexas redes de dutos por onde são transportados múltiplos produtos entre diferentes pontos. Dadas as diferenças dos fluidos transportados, geralmente uma rede pode ser dedicada ao transporte de gás, ao transporte de petróleo bruto ou ao transporte de diferentes derivados. Este trabalho ocupou-se particularmente desta última. Neste caso, tem-se uma rede dutoviária multiproduto onde um conjunto de produtos, por exemplo, diesel, gasolina querosene, precisam ser movimentados de pontos (áreas operacionais) onde são produzidos ou armazenados (refinarias, terminais) para pontos onde são demandados (outras refinarias, centros de distribuição, terminais, portos, clientes) através de um, ou de um conjunto, de dutos. Na operação de uma rede dutoviária os dutos operam sempre cheios de líquidos, aqui considerados incompressíveis. Desta forma, se

certa quantidade de algum produto é bombeada para dentro de um duto em uma área operacional, a mesma quantidade de produto (o mesmo, ou não) é retirada na outra extremidade do duto. A atividade de programação da malha consiste então em determinar quando, qual quantidade (batelada) de qual produto será bombeada de cada área operacional para seus respectivos destinos. Este é um problema multiproduto e multifluxo, onde se deseja otimizar algum critério, geralmente a minimização dos custos totais de operação, considerando um conjunto de demandas, limites de produção de cada área, quantidades de recursos disponíveis e outras restrições de caráter operacional. Nesse contexto, o problema de programação de dutos é bastante complexo em função de sua natureza combinatória, bastando ressaltar que o sequenciamento de n bateladas de produto em um único duto, em caso de avaliação de todas as combinações possíveis, é de ordem fatorial ($n!$). Milidiú e Liporace (2003) mostraram que é NP-Completo o problema de transporte de derivados de petróleo em um oleoduto quando se considera restrições de interface. Uma implicação imediata desse resultado é que o planejamento de uma rede de dutos considerando restrições de interface é bastante difícil.

1.1. MOTIVAÇÃO

Os últimos anos atestam um aumento na quantidade de dutos em operação no Brasil. Em 2009 a quantidade de dutos era de 547 (sendo 388 destinados a transferência e transporte de derivados) e em 2011 chegou a 578 (sendo 405 destinados a transferência e transporte de derivados), o que representa um aumento de 5% na malha dutoviária brasileira nesse período. Apesar de existirem em menor quantidade, os dutos de gás natural totalizaram, em 2011, mais de 11000 quilômetros de extensão enquanto os dutos destinados a movimentação de derivados contabilizam, neste mesmo ano, um pouco menos de 6000 quilômetros, como se pode constatar na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Quantidade e extensão de dutos em operação, por função, segundo produtos movimentados 31/12/2008, 31/12/2009 e 31/12/2010.

Produtos movimentados	Função	Quantidade			Extensão		
		2008	2009	2010	2008	2009	2010
Derivados	Transferência	286	304	307	1.004	1.099	1.105
	Transporte	102	98	98	4.849	4.792	4.792
Gás natural	Transferência	59	61	62	2.225	2.270	2.271
	Transporte	31	37	42	6.838	7.574	9.102
Petróleo	Transferência	32	32	32	1.985	1.985	1.985
Outros ¹	Transferência	32	32	32	36	36	36
	Transporte	5	5	5	40	40	40
Total		547	569	578	16.986	17.796	19.331

Fonte: Anuários Estatísticos da ANP de 2009, 2010 e 2011.

Os dutos demandam um controle rigoroso de sua atividade de e transporte. Dessa forma, deve-se definir adequadamente sua programação, de modo que se alcance uma eficiência do ponto de vista econômico. Segundo Felizari (2009) ela deve coordenar objetivos de produção e compromissos contratados com clientes e distribuidores tendo como objetivo otimizar o desempenho econômico do sistema, levando-se em consideração alterações nas demandas, especificações de produtos, datas de entrega, qualidade e quantidade de matérias-primas e na disponibilidade e desempenho das unidades de processo.

Uma programação bem realizada pode trazer economias significativas para a empresa, bem como a otimização dos recursos disponíveis, um melhor aproveitamento de seu capital humano e ganhos de produtividade que podem se traduzir em uma maior competitividade. O planejamento dessas atividades recebe uma importância ainda maior quando se considera a existência de novas exigências ambientais, que se traduzem pela necessidade de inserção de novas restrições a serem aplicadas a produção e comercialização de derivados. Pode-se citar, por exemplo, a resolução número 42 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2009b), que determina, em seu artigo terceiro, a redução do teor de enxofre do óleo diesel tipo A e do óleo diesel tipo B, bem como os municípios autorizados a comercializá-los, conforme se verifica na Tabela 1.2:.

Tabela 1.2: Extrato do artigo terceiro da Resolução Número 42 da ANP

“Art. 3º Fica estabelecido, para feitos desta Resolução, que os óleos diesel A e B deverão apresentar as seguintes nomenclaturas, conforme o teor máximo de enxofre:

- a) Óleo diesel A S50 e B S50: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 50 mg/kg.
- b) Óleo diesel A S500 e B S500: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 500 mg/kg.
- c) Óleo diesel A S1800 e B S1800: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 1800 mg/kg.

§ 1º É obrigatória a comercialização de óleo diesel B S50 nos municípios determinados no ANEXO I.
§ 2º É obrigatória a comercialização de óleo diesel B S500 nos municípios determinados no ANEXO II e, a partir de 1º de janeiro de 2010, nos municípios determinados no ANEXO III.
§ 3º É proibida a comercialização do óleo diesel B S500 nos municípios determinados no ANEXO I.
§ 4º É proibida a comercialização de óleo diesel B 1800 nos municípios determinados nos ANEXOS I, II e III desta Resolução.”

Fonte: ANP (2009b) - disponível em: <http://www.recap.com.br/pdfs/portarias/anp42.pdf>

Segundo Sousa (2010), o aumento da demanda por produtos e o aumento das restrições ambientais provocarão impactos importantes na cadeia de suprimento de derivados de petróleo, o que requer a otimização dos recursos existentes e a realização de novos investimentos para que se viabilize o atendimento das necessidades dos clientes. Outra questão relevante é a reestruturação da organização produtiva brasileira de modo a ampliar a participação do gás natural em sua matriz energética. Mazzei (2007) destaca que essa é uma tendência na maioria dos países, desenvolvidos ou em desenvolvimento, e tem como justificativas principais: o maior volume e dispersão das reservas de gás natural existentes no mundo, quando comparadas ao petróleo, bem como a crescente pressão de grupos ambientais favoráveis à utilização de uma fonte energética mais limpa e polivalente que pudesse substituir: a eletricidade nos estabelecimentos comerciais e residenciais, o óleo combustível no setor industrial, a gasolina e o diesel no setor de transportes e o carvão para geração termelétrica, com elevada eficiência e menores impactos.

Esse panorama é bastante propício para a construção de sofisticados métodos matemáticos desenvolvidos com o intuito de fornecer suporte à tomada de decisão na temática da programação de rede de dutos.

1.2. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O presente trabalho tem por objetivo geral desenvolver um conjunto de ferramentas para auxiliar o tomador de decisão em relação à programação das atividades de distribuição e transporte de derivados de petróleo em uma rede dutoviária. Essa programação deve responder quais produtos devem ser bombeados, em que ordem essa tarefa deve ser realizada, o volume de cada bombeamento, suas respectivas vazões e o destino de cada um dos produtos, desde que sejam atendidas um conjunto de restrições operacionais, de forma a otimizar um conjunto de critérios pré-estabelecidos pelo decisor.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Determinar o estado-da-arte da literatura sobre o planejamento das atividades dutoviárias.
- Desenvolver uma formulação de Programação Linear Inteira para problemas de transporte em dutos.
- Comparar o modelo proposto com outras abordagens realizadas anteriormente.
- Desenvolver um procedimento para determinação de limites inferiores para o problema e uma heurística para pós-processamento das soluções obtidas.
- Avaliar possíveis modificações na formulação matemática do problema.
- Avaliar os impactos na programação decorrentes da redução do consumo de óleo combustível e da utilização de estoques de segurança.
- Desenvolver uma ferramenta computacional para visualização da programação das atividades de uma rede de dutos.

1.3. CONTRIBUIÇÕES ALCANÇADAS

Este trabalho traz uma ampla revisão bibliográfica sobre a temática de programação de um único duto e de redes de dutos. Além disso, o modelo matemático aqui proposto para um problema de programação de redes de dutos se mostrou melhor que os propostos em trabalhos anteriores. Por outro lado, a formulação desenvolvida permitiu a inclusão de diversos grupos particulares de restrições – a critério do tomador de decisão. O trabalho também apresenta um cenário em que ocorre uma redução no volume transportado de óleo combustível, e outro em que é considerada a utilização de estoques de segurança visando atender a legislação específica da ANP sobre o tema. Além disso, foram feitos experimentos considerando possíveis modificações na formulação matemática; alguns deles levam em conta a existência de alguns parâmetros estocásticos. Nesse caso, foi aplicado o modelo de otimização robusta proposto por Bertsimas e Sim (2004), de modo pioneiro, em problemas de programação de redes de dutos. Por fim, o trabalho apresenta uma ferramenta computacional desenvolvida em *ActionScript* com o intuito de obter uma melhor visualização das programação obtida após a resolução do modelo matemático.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta tese está organizada da seguinte maneira: no capítulo 2 descreve-se o Problema de Transporte Dutoviário (PTD) e, em seguida, faz-se uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos a respeito de programação de atividades de transporte por dutos. No capítulo 4, exibe-se o modelo matemático e as heurísticas desenvolvidas, as melhorias propostas no âmbito deste trabalho juntamente com suas possíveis extensões. Nos Capítulos 5 são exibidos os experimentos computacionais. O sexto capítulo apresenta a ferramenta de visualização das programações obtidas enquanto o sétimo exibe as conclusões; em seguida são listadas as referências bibliográficas utilizadas.

2. PROBLEMA DE TRANSPORTE DUTOVIÁRIO (PTD)

“Pode ser que pra você não tenha nenhum problema/ Mas pra mim tem, mas pra mim tem/Apostar na loteria e não ganhar/Andar de bicicleta contra o vento/ Um engarrafamento/ O elevador parar no vigésimo andar/Não ter aumento/ O ano inteiro e no verão/Faltar luz no meio da noite/Com mil mosquitos pra te sugar/Pagar caro um conserto qualquer/E na mesma semana o troço volta a estragar/Enfrentar milhões de filas de atendimento/Não ter telefone que funcione/E quando a chuva entra em casa/Inunda a sala sem ser convidada/ Será que alguém se lembra em quem foi que votou.../Viajar num ônibus lotado/ Tomar remédio falsificado/Ver o prédio onde mora cair/Ver no final do jogo o seu time/ Simplesmente desistir” – Biquini Cavado

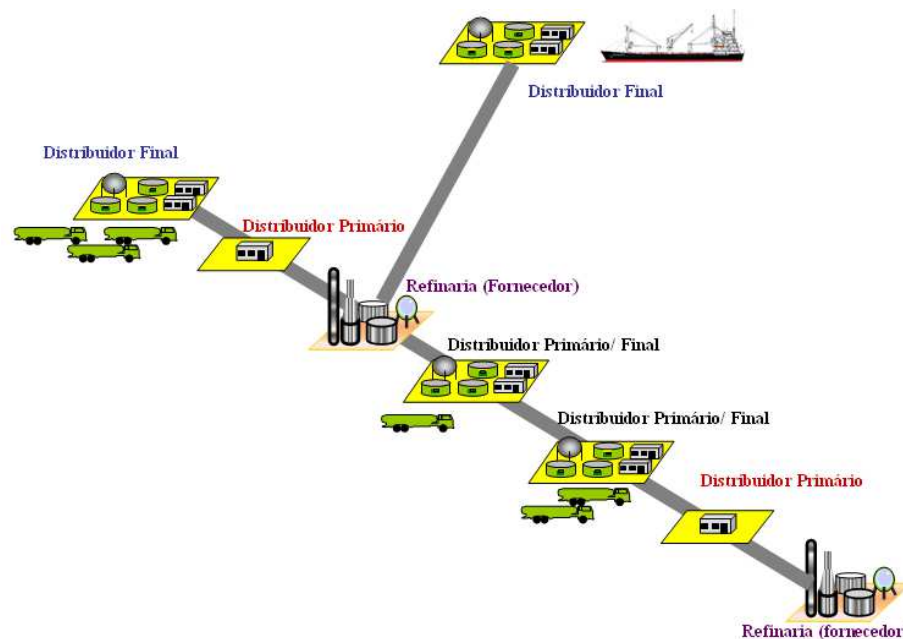
A primeira seção deste capítulo faz uma caracterização dos problemas de programação dutoviária. Na seção subsequente são descritas, em detalhes, terminologias importantes e de uso corrente na indústria do petróleo, em particular na programação de oleodutos. Na seção 2.3 são apresentadas as principais restrições relativas à operação de oleodutos. Na última seção deste capítulo são descritos os principais custos envolvidos no processo.

2.1. O PROBLEMA

Uma malha de transporte dutoviário pode ser entendida como um grafo direcionado, onde os vértices são formados por fornecedores, distribuidores primários e distribuidores finais. Os fornecedores formam o primeiro elo da cadeia de distribuição, pois são os pontos de produção ou recebimento dos produtos a serem transportados. Esse grupo é composto pelas refinarias, portos marítimos e terminais de distribuição. Os distribuidores primários são também denominados vértices de passagem, pois apenas enviam os produtos recebidos para outro terminal. Os distribuidores finais enviam os produtos recebidos para o mercado consumidor. Dependendo do problema, um mesmo vértice pode atuar em mais de uma modalidade: uma refinaria, por exemplo, além de ser um fornecedor de derivados, pode receber produtos de um terminal e encaminhá-lo para seu mercado consumidor local. Na Figura 2.1, por exemplo, existem dois fornecedores (refinarias), dois vértices de passagem, dois vértices de distribuição final e dois vértices que podem atuar como distribuidores primários ou como secundários.

O atendimento ao mercado local é feito, geralmente, por caminhões ou cabotagem, enquanto a exportação é feita por navios de grande porte. Em uma malha de transporte dutoviário, as arestas direcionadas representam sentidos dos dutos. A partir delas são compostas as rotas de fluxo para o envio de produtos de uma dada origem para um determinado destino. Em alguns problemas, é possível o envio de produtos em ambos os sentidos e nesse caso, essa malha torna-se um multigrafo direcionado sem laços e os dutos são denominados birecionais.

Figura 2.1: Exemplo de uma rede de dutos



Seja M uma malha dutoviária, D_i a demanda associada ao seu i -ésimo nó e P_i a produção associada ao seu i -ésimo nó distribuidor. Um Problema de Transporte Dutoviário (PTD) consiste em encontrar uma programação de transferência de petróleo e derivados que responda quais produtos devem ser bombeados, em que ordem essa tarefa deve ser realizada, o volume de cada bombeamento, suas respectivas vazões e o destino de cada um dos produtos, desde que sejam atendidas um conjunto de restrições operacionais, de forma a otimizar um conjunto de critérios pré-estabelecidos pelo decisor (ALVES, 2007). Esses critérios podem ser, por exemplo, a maximização dos lucros obtidos ou minimização de custos operacionais.

Em função de suas características estruturais, um sistema dutoviário pode ser dividido nas seguintes categorias:

- Quanto à finalidade:
 - oleoduto (transporte de petróleo e derivados)

- alcoolduto (transporte de etanol)
- gasoduto (transporte de gás natural)
- aqueduto (transporte de água)
- mineroduto (transporte de minérios, cargas sólidas ou em pó)
- outros¹ (nesse caso, pode-se acrescentar a palavra duto um prefixo indicando sua finalidade)
- Quanto ao número de dutos utilizados:
 - um único duto
 - dois ou mais dutos (rede de dutos)
- Quanto ao tipo de instalação:
 - subterrâneo (instalado embaixo da terra, com aflorações na superfície determinadas pela agência reguladora)
 - terrestre
 - submarino (instalado no mar)
 - submerso (instalado no fundo de um corpo aquático)
- Quanto à direção de fluxo no duto:
 - unidirecional
 - birecional (quando, permitido fluxo reverso)
- Quanto à quantidade de fornecedores
 - única fonte
 - várias fontes
- Quanto à quantidade de destinos
 - único destino
 - vários destinos
- Quanto à quantidade de produtos escoados
 - duto dedicado (um único produto)
 - poliduto (vários produtos)

As características de uma malha dutoviária juntamente com as hipóteses assumidas indicam o nível de complexidade de um PTD. Nesse contexto, pode-se afirmar, *ceteris paribus*, que as programações envolvendo oleodutos multiprodutos são mais complexas, que

¹ Existe ainda um conceito mais geral que trata o uso de cápsulas para transporte de cargas sólidas ou líquidas por meio de dutos. Nesse caso, os produtos são colocados nessas cápsulas e bombeados ao longo do duto. Uma explanação mais detalhada sobre o assunto pode ser encontrada em Murta (2003).

aquelas relativas a alcooldutos, minerodutos, aquedutos ou gasodutos, porque nesses últimos, geralmente, os dutos são dedicados. Além disso, a quantidade de produtos escoados, o número de fontes, o número de destinos e a existência de birecionalidade são elementos que influenciam diretamente na complexidade do problema. No escopo desse trabalho tratar-se-á um PTD em uma rede de oleodutos, com múltiplas fontes, destinos e produtos escoados. A existência de birecionalidade será considerada em alguns modelos, que serão descritos nas seções subsequentes.

2.2. TERMINOLOGIA

Em cada local o recebimento de produto é feito através de um conjunto de tanques, designados especialmente para essa finalidade e separados por tipo de produto a ser recebido. Na literatura, a título de simplificação do modelo matemático, é comum substituir esse conjunto de tanques por um único tanque de mesma capacidade de armazenamento (por produto). Esse fenômeno, denominado tancagem agregada, é usado, em geral, sempre que existir a possibilidade de troca de produto dentro dos tanques. Além disso, o transporte de produtos deve ser feito exclusivamente por rotas pré-cadastradas, as quais são denominadas rotas de fluxo. Em uma rota de fluxo, um conjunto de dutos é alinhado em cada área intermediária de maneira que o fluxo proveniente de um deles é repassado para seu sucessor imediato. Essa situação caracteriza uma operação de passagem. No âmbito desse trabalho, será utilizada a expressão combinação de rotas (zp) para denotar o conjunto de rotas de fluxo que podem atender a demanda de um produto p em todas as áreas que demandam esse produto. Nesse caso, cada rota de fluxo da combinação de rotas pode ser representada por um grafo em árvore cujo vértice inicial e o vértice final possuem grau 1 e os demais vértices têm grau 2.

O produto, quando entregue no destino, é diferente daquele enviado pela fonte, entretanto admite-se que suas propriedades estão dentro dos limites impostos pela agência reguladora, que no caso brasileiro, é a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Nesse caso, dizemos que o produto transportado é fungível.

O envio de produtos é feito por meio de bateladas, as quais são caracterizadas pelo volume, tipo de produto, vazão e destino. O envio de uma batelada a partir de uma área de envio caracteriza uma operação de bombeio. Quando uma batelada chega a uma determinada área, diz-se ter ocorrido uma operação de recebimento.

Define-se uma operação pulmão como o recebimento de um produto em um tanque, simultaneamente ao bombeamento de um produto a partir desse mesmo tanque, não necessariamente com a mesma vazão. Denomina-se operação de injeção a situação onde uma batelada transportada por um duto principal recebe um volume de produto adicional de um outro duto secundário, em geral, em formato T. Nesse caso, o tamanho da batelada aumenta e sua vazão também. Quando os dutos considerados são birecionais, existe a possibilidade de reversão, a qual consiste na alteração do sentido de escoamento de produtos ao longo do duto. Em uma operação de reversão, as vazões de cada produto no sentido reverso ($b \rightarrow a$) não são necessariamente iguais às vazões no sentido original ($a \rightarrow b$).

Quando se envia duas bateladas sequencialmente (uma após a outra), de produtos distintos, ocorre uma contaminação entre eles, denominada interface, que é fruto da inexistência de separação física entre cada batelada. A existência de interfaces implica no envio desse produto contaminado para unidades de tratamento, fato que requer um custo adicional. Uma alternativa consiste no uso de produtos de densidades intermediárias entre as bateladas, os quais são chamados selos. Outra possibilidade, é a caracterização do produto como um produto de qualidade inferior, e neste caso, o custo está associado à perda de margem devido ao processo de degradação. Nesse contexto, a formação de um baixo número de interfaces é um critério relevante na redução dos custos operacionais. Além disso, a programação dos dutos é realizada para um determinado horizonte de tempo, o qual é denominado horizonte de planejamento. Na literatura, como será visto adiante, o tempo de envio ou recebimento de cada produto tem sido tratado de forma contínua ou discreta.

Em diversos setores industriais brasileiros, em particular na indústria petrolífera, uma questão que adquire papel de destaque é o não-acionamento ou o acionamento limitado das bombas em horários onde o custo da energia elétrica seja mais elevado. Esses horários são denominados horários de pico de consumo de energia ou horários de ponta; na literatura, é possível ainda, encontrar o uso do termo horossazonalidade para descrever tal situação.

2.3. RESTRIÇÕES DO PTD

Alves (2007) listou um conjunto de restrições relativas às características e condições de operação da rede dutoviária. São elas:

- Atendimento à demanda: os produtos devem estar disponíveis nos tanques de armazenamento para que as demandas sejam satisfeitas. Além disso, todas as

bateladas devem ser entregues nos seus respectivos destinos até o final do horizonte de planejamento.

- Bombeamento de produtos: cada estação de bombeamento possui um limite mínimo e máximo de vazão dos produtos. Além disso, restrições adicionais podem ser inseridas para limitar o envio de produtos no horário de pico.
- Compatibilidade de produtos: alguns produtos não podem entrar em contato durante o transporte em função do elevado custo de tratamento das interfaces formadas.
- Estoques: os estoques nos tanques devem se manter em um nível pré-estabelecido pelo decisor.
- Manutenção programada: o duto não pode operar enquanto uma manutenção programada não estiver concluída; nesse caso, o duto fica indisponível em todo o período de tempo entre o início e o término da manutenção.
- Restrições locais: em função das particularidades de cada área, algumas restrições se tornam específicas. Algumas áreas não podem executar concomitante certas operações. A título de exemplo, pode-se citar a existência de restrições quanto ao número de operações simultâneas de bombeamento e/ou recebimento de determinados produtos.
- Tamanho das bateladas: existe um volume mínimo de cada batelada, pois caso contrário, todo seu volume misturar-se-ia nos produtos adjacentes devido à existência de interfaces.
- Restrições de paradas: limitam o tempo que um determinado produto pode ficar dentro do duto.

Felizari (2009) acrescenta ainda que um dos grandes desafios dos especialistas (programadores) de sistemas de planejamento dutoviário é a confecção de escalonamentos que possam ser efetivamente cumpridos dentro do horizonte de planejamento, de forma que sejam evitadas reprogramações, que sejam atendidos os requisitos de entrega e se possa gerenciar adequadamente a utilização/ocupação dos dutos e dos níveis de inventário. Nesse contexto, o autor destaca a importância de outros dois tipos de restrições:

- Início de bombeio: deve-se programar o início de bombeio de bateladas em períodos que não coincidam com horários de troca de turno.

- Alterações da programação em andamento: devem ser evitadas alterações na programação em andamento (consolidada no dia anterior), priorizando-se a introdução de modificações nos dias mais a frente, desde que seja possível.

2.4. MÉTRICA DE AVALIAÇÃO DAS SOLUÇÕES

Em um PTD, cada solução viável encontrada deve ser avaliada segundo uma determinada métrica. O processo de construção dessa métrica implica em se considerar um conjunto de critérios relevantes segundo a ótica do tomador de decisão. Na prática, procura-se minimizar o custo operacional da malha dutoviária. Dentre esses custos, podemos citar o custo de energia elétrica, o custo de estocagem, o custo de interface, o custo de não-atendimento da demanda (contratada e demanda excepcional) e o custo de atraso na entrega, os quais são descritos abaixo:

- Custo de bombeamento: na programação de oleodutos, esses custos refletem o gasto de energia referente ao envio de um produto. Esses dependem do duto e da distância percorrida pelo produto da origem até seu destino. Além disso, o envio de produtos no horário de pico (17h às 21h) implica, necessariamente, em um gasto adicional com energia, que é fruto da tarifa extra de energia elétrica que o processo requer.
- Custo de estocagem: refere-se ao valor gasto para manter armazenado um determinado produto em uma área operacional
- Custo de interface: esses custos são relativos à necessidade de tratamento da interface formada por pares de produtos distintos enviados em sequência (um após o outro) em um mesmo duto. Outra interpretação possível para tais custos seria considerá-los como custos de inserção de um selo entre as interfaces; ou, como se viu anteriormente, seria o custo associado à perda de margem devido ao processo de degradação.
- Custo de não-atendimento da demanda contratada: ocorre pelo não atendimento da demanda. Nesse caso, a empresa incorre em um pagamento de multa por não cumprimento de contrato.
- Custo de não-atendimento de uma demanda excepcional: um aquecimento do mercado pode resultar em um aumento não previsto de demanda. Nesse caso, esse custo reflete o quanto se deixou de lucrar em virtude do não atendimento dessa parcela adicional da demanda.

- Custo de atraso na entrega: a empresa se vê obrigada ao pagamento de uma multa devido à entrega de produtos com atraso.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

“Inexiste no mundo coisa mais bem distribuída que o bom senso, visto que cada indivíduo acredita ser tão bem provido dele que mesmo os mais difíceis de satisfazer em qualquer outro aspecto não costumam desejar possuí-lo mais do que já possuem” – René Descartes.

A literatura relativa ao transporte dutoviário apresenta uma variedade de metodologias e abordagens para os diversos problemas. Devido à sua natureza combinatória, este é um problema difícil de ser resolvido. De fato, o problema de transporte de derivados em um único duto e com restrição de compatibilidade de produtos é NP-Completo (MILIDIÚ e LIPORACE, 2003). Nesse contexto, Sánchez & Mier (2005) destacam em sua revisão bibliográfica, que para tornar o problema computacionalmente tratável, várias simplificações são assumidas para a modelagem do problema de distribuição dutoviária, dentre as quais pode-se ressaltar:

- simplificações de caráter topológico (redes, bi/unidirecionalidade, etc.)
- simplificações das dimensões do oleoduto (número de terminais, bases, etc.)
- simplificações do horizonte temporal (dias, semanas, etc.)
- simplificações de condições de operação do duto (discretização de bateladas, cálculo de interfaces, etc.)
- simplificações na seleção dos elementos relevantes que condicionam a busca do programa ou a estimativa desses elementos relevantes.
- simplificações derivadas da existência de sequências de produtos proibidos.

Nesse capítulo, são descritos os principais trabalhos encontrados na literatura de distribuição dutoviária. Essa revisão é uma versão ampliada e revisada dos trabalhos de Souza Filho *et al.* (2006), Souza Filho (2007) e Alves (2007). Nas seções subsequentes desse capítulo, os trabalhos foram categorizados de acordo com o número de dutos, quantidade de produtos transportados, número de fontes e destinos. Os trabalhos aqui descritos foram catalogados em uma biblioteca criada no software EndNote² versão 10.0.

² O EndNote é software produzido pela Thomson Reuters que faz o gerenciamento de material bibliográfico.

3.1. TRABALHOS ENVOLVENDO UM POLIDUTO, UMA FONTE E UM DESTINO

Amiragov e Nuriev (1970) publicaram um dos primeiros trabalhos em escalonamento de um poliduto. Os autores desenvolveram um algoritmo simples que se baseava na definição dos tempos críticos de fornecimento e dos limites máximos de bombeamento, dentro do tempo crítico, em cada estágio. Foram conduzidos experimentos numéricos que demonstravam a aplicação do algoritmo considerando que apenas três produtos são bombeados no duto. Techo e Holbroock (1974) abordaram o problema de escalonamento de um duto multiproduto. O problema foi tratado com o auxílio de planilhas com a finalidade de minimizar a quantidade de interfaces.

No problema abordado por Shah (1996), o duto transporta alguns tipos de petróleo e o sistema (refinaria, porto e duto) foi decomposto, em função de sua complexidade, em dois subproblemas que foram modelados usando Programação Linear Inteira Mista (PLIM) com discretização do horizonte de tempo em intervalos de igual duração. O primeiro subproblema determina como a refinaria é operada e como será abastecida pelo duto, com o objetivo de minimizar a quantidade de material que resta nos tanques após estes terem alimentado as unidades de destilação. O segundo determina como descarregar os navios e como os tanques do porto devem alimentar o duto, uma vez que o *schedule* do duto já foi estabelecido, com o objetivo de encontrar uma solução viável. O modelo foi testado em um horizonte de um mês, discretizado em intervalos de um dia, considerando quatro tipos de petróleo, duas torres de destilação, sete tanques na refinaria e oito tanques no porto.

Em Pinto *et al.* (2000) são apresentadas várias aplicações reais de modelos de planejamento e *scheduling* em refinarias de petróleo. Os autores usaram Programação Linear Inteira Mista para lidar com várias subseções da refinaria, como as descritas pelos problemas a seguir:

- Problema de gerenciamento de estoque de petróleo para uma refinaria, que recebe vários tipos de óleo através de um duto. Para um dado horizonte de tempo, o número, tipo, horário de início e fim das bateladas de óleo são conhecidas a priori.
- Problema de produção e distribuição em uma refinaria com várias unidades de processamento que produzem diversos produtos que são armazenados em tanques intermediários e posteriormente enviados para os oleodutos como produtos finais ou misturados a outros produtos para obter o *blend* desejado. Os oleodutos estão ligados aos mercados consumidores.

- Problema de *scheduling* de produção de óleo combustível e asfalto com gerenciamento de operações que inclui mistura, armazenamento e distribuição. A produção de óleo combustível e asfalto é armazenada em tanques para produtos finais que depois serão distribuídos por dois dutos ou por caminhões. Para todos esses problemas foram considerados custos de interface dos produtos.

Em Magatão *et al.* (2004), o poliduto transporta diferentes tipos de *commodities*, tais como, gasolina, diesel, querosene, álcool e gás liquefeito de petróleo (GLP), os quais podem ser bombeados tanto da refinaria para o porto, como do porto para a refinaria. O problema consiste em fazer a programação de transferência de produtos no oleoduto em um horizonte de tempo limitado, visando procedimentos de baixo custo operacional. O modelo foi formulado usando Programação Linear Inteira Mista com discretização uniforme do tempo. Foram consideradas as disponibilidades de produtos, restrições de armazenamento, sequências de bombeamento, determinação da taxa de fluxo, além de uma variedade de restrições operacionais. Para lidar com esses problemas de *scheduling* de larga escala encontrados no mundo real, os autores propõem uma estratégia de decomposição envolvendo dois modelos em PLIM (um principal e um auxiliar), uma rotina auxiliar e um banco de dados. O problema foi resolvido para algumas instâncias e os resultados obtidos indicaram a possibilidade de uma economia de pelo menos 8%.

Relvas *et al.* (2006) propuseram um modelo PLIM com abordagem contínua do tempo que utiliza o sequenciamento de bateladas proposto por Cafaro e Cerdá (2004). Este modelo explora a gestão de estoques no fim da cadeia para que o escalonamento incorpore, além das demandas do mercado, restrições de estocagem, como por exemplo, aquelas relacionadas ao período de liquidação de cada lote (*settling periods*). Além disso, as demandas de mercado são incluídas em uma base discreta, sendo o modelo capaz de operar entre escalas discretas e contínuas. Relvas *et al.* (2007) estenderam o modelo anterior de forma a contemplar variáveis de fluxo, paradas nos dutos e *settling periods* que variam com os dutos. Ademais, os autores propuseram uma estratégia de escalonamento reativo que trata situações imprevistas e fornece novos escalonamentos com desvios mínimos em relação aos anteriores. Em Relvas *et al.* (2008) modificou-se o modelo proposto em Relvas *et al.* (2006; 2007). Nessa nova formulação os tanques foram contabilizados de maneira individualizada. Relvas *et al.* (2009) desenvolveram um procedimento heurístico, que combina os dados do problema e a matriz de possíveis sequências, para derivar sequenciamentos válidos antes da implementação do modelo. A heurística foi aplicada e validada usando um cenário de real de uma companhia petrolífera portuguesa.

Hassimotto (2007) abordou um sistema composto por um duto birecional multiproduto denominado OSPLAN. Baseado no trabalho de Rejowski (2001), o autor propôs um modelo PLIM com representação discreta do horizonte de tempo, divisão do duto em lotes de tamanho fixo, restrições de balanço de materiais e restrições de negócio. Com o objetivo de se alcançar um melhor desempenho computacional, baseados nos trabalhos de Rejowski e Pinto (2003) e Rejowski e Pinto (2004), foram inseridas ainda restrições de cortes válidos que reduziram a região viável do modelo relaxado sem, contudo, modificar a região inteira viável. Além disso, foi proposta uma formulação alternativa que penaliza na função objetivo os estoques fora de uma determinada faixa de operação.

Magatão *et al.* (2008) propuseram um modelo híbrido (*Constraint Logic Programming* -CLP + PLIM) que foi aplicado ao *scheduling* de um poliduto. Este modelo é composto por um módulo principal, um módulo para cálculo das janelas de tempo (pré-processamento), um módulo auxiliar (módulo de tancagem) e uma base de dados, a qual recebe as informações vindas dos demais blocos e as disponibiliza para o modelo principal. O módulo de tancagem é responsável pela alocação de alguns recursos (tanques) para uma dada atividade e é essencialmente o mesmo descrito por Magatão *et al.* (2004). O módulo de pré-processamento leva em conta o horizonte de tempo disponível para o bombeio, as faixas de variações possíveis para o bombeio de cada produto e a demanda a ser atendida. Ele retorna as janelas de tempo que devem ser respeitadas no modelo principal. O modelo principal combina as técnicas de CLP e PLIM para determinar a sequência de bombeio de cada produto e estabelece o instante de tempo inicial e final dessa operação. Foram construídos dois cenários, sendo que no primeiro deles o horizonte de planejamento variou de 114 a 144 horas e no segundo, o ele variou de 96 a 126 horas. Em cada cenário, o modelo híbrido foi comparado com a modelo que faz uso somente de CLP ou somente de PLIM. Os autores concluíram que o modelo CLP-PLIM tende a ter um tempo computacional médio menor que as abordagens PLIM e CLP. Além disso, esse modelo híbrido teve desempenho satisfatório em problemas-testes em que o número de variáveis e restrições do modelo é significativamente elevado.

Baseado nos trabalhos de Pereira (2008) para programação de dutos e de Lee *et al.* (1996) para programação de terminais, a dissertação de mestrado de Benzecry (2010) desenvolveu um modelo PLIM para programação das operações de movimentação de petróleo do Terminal de São Francisco do Sul para a Refinaria de Araucária. O objetivo é determinar qual navio deve atracar no terminal, qual petróleo deverá ser descarregado, qual volume e o qual tipo de petróleo será enviado para a refinaria de modo a atender sua demanda e minimizando os custos operacionais. Foram consideradas restrições de capacidade,

disponibilidade de petróleo, manutenção dos estoques e bombeio durante o horário de ponta. Os experimentos conduzidos indicaram a utilidade do modelo como uma ferramenta de previsibilidade da programação do suprimento de petróleo, de modo a evitar interrupções no fornecimento de petróleo para a refinaria.

3.2. TRABALHOS ENVOLVENDO UM POLIDUTO, UMA FONTE E VÁRIOS DESTINOS

Em Hane e Ratliff (1995) o planejamento do transporte de produtos é feito para um conjunto de ordens de serviço cíclicas no tempo, onde cada batelada de produto tem o destino já estabelecido. O objetivo é encontrar o *schedule* dos produtos que minimize o número de vezes que o duto retoma à vazão normal após esta ter sido interrompida para fazer uma entrega de um produto. Esta foi a maneira encontrada pelos autores para tratar, de uma forma simplificada, os custos de bombeamento. Não são incluídas restrições de armazenagem, de compatibilidade de produtos e nem prazos de entrega. Para a solução do problema foi construído um algoritmo guloso e um algoritmo *branch-and-bound* (B&B). O algoritmo B&B utiliza o algoritmo guloso para obter uma boa solução viável inicial. Foram feitos testes computacionais para um conjunto de dados gerado aleatoriamente com base em um grande oleoduto de uma companhia americana. O B&B chegou à solução ótima para todos os problemas testados, não ultrapassando o tempo de execução de 2,5 minutos, para o caso onde o duto tinha 24 nós de destino. Já o algoritmo guloso obteve soluções satisfatórias em poucos segundos.

Sasikumar *et al.* (1997) apontam desvantagens do uso de modelos numéricos em problemas de *scheduling*, dentre elas, eles consideram mais crítica, a inabilidade de se tolerar mudanças de especificação no sistema. As restrições e as métricas utilizadas podem mudar de tempos em tempos, ocasionando modificações significativas na estrutura do modelo. Isto aliado ao fato que, em sistemas muito complexos, a viabilidade da solução é mais importante que a otimalidade, justificando uma abordagem utilizando modelos simbólicos heurísticos para a resolução desse tipo problema. Foi utilizada uma técnica de inteligência artificial denominada *beam search*, que gera uma boa programação mensal para o duto, e que leva em conta as exigências e disponibilidade de produtos, enquanto satisfaz uma grande variedade de restrições incluindo níveis de estoques permitidos e restrições de sequenciamento. O modelo faz uso de penalidades incorporadas à função heurística de avaliação, devido ao fato de algumas restrições serem mais importantes do que outras, como por exemplo, o fornecimento

dos produtos a todos os destinos, minimização de paradas, etc. Além disso, o modelo proposto considera a utilização de um produto selante que deveria ser bombeado em pequena quantidade entre cada par de produtos, visando evitar a contaminação dos produtos. Ele foi implementado e colocado em uso em um sistema dutoviário indiano composto por uma refinaria e três destinos que transportava quatro tipos de produto. Para um horizonte de planejamento de um mês, o tempo de execução do algoritmo foi de aproximadamente uma hora.

Rejowski (2001) e Rejowski e Pinto (2003) estudaram um problema baseado no oleoduto São Paulo-Brasília (OSBRA) da Petrobras, onde uma refinaria (REPLAN) distribui gasolina, óleo diesel, GLP e querosene de aviação para cinco bases de distribuição, e desenvolveram dois modelos em Programação Linear Inteira Mista com representação discreta do tempo. O primeiro modelo discretiza o oleoduto em lotes de mesma capacidade, enquanto o segundo (modelo) o divide em lotes de capacidades diferentes. Os modelos foram baseados inicialmente em programação disjuntiva e depois foram linearizados a partir da envoltória convexa. Em Rejowski (2001) foi utilizada também a formulação *Big M* para a linearização. Os modelos incorporam várias restrições de operação como balanço de massa, demanda de produtos, restrições de capacidade e restrições de sequenciamento de produtos. O objetivo é determinar, para um horizonte de tempo de três dias, as operações de bombeamento de novos produtos para o duto e as operações de carga e descarga dos tanques na refinaria e nos depósitos, de tal forma que os custos de estoque, de bombeamento e de interface dos produtos sejam minimizados. Os modelos não encontraram soluções ótimas para os exemplos apresentados. Com o objetivo de melhorar a eficiência desta formulação, Rejowski e Pinto (2004) propõem a introdução de restrições e cortes ao modelo de Programação Linear Inteira Mista original. As restrições são não intuitivas e impõem que um seguimento do duto só pode ficar inativo se estiver preenchido por apenas um produto e os cortes são baseados nas demandas e no estoque inicial dos segmentos do duto. Essas alterações foram testadas em três exemplos com diferentes demandas por produtos. A solução ótima foi alcançada em todos os exemplos apresentados e em alguns casos houve uma melhora significativa no tempo computacional. Rejowski (2007) estendeu o modelo proposto por Rejowski e Pinto (2003). Foi proposta uma formulação de tempo contínuo que incorpora considerações hidráulicas. Essas considerações se fazem necessárias devido às perdas que os produtos sofrem após serem movimentados ao longo do duto. Foram desenvolvidas duas formulações, uma não linear - PNLIM e uma PLIM. A formulação não linear possui um número menor de variáveis que o modelo PLIM e otimiza o sequenciamento dos produtos dentro do duto, as potências

consumidas elétricas pelas estações bem como seus rendimentos. O modelo PLIM , por sua vez, tem um alcance mais limitado, pois considera como parâmetro os rendimentos e os aspectos hidráulicos. Com essas formulações foi possível ampliar o horizonte de planejamento de 75 para 90 e depois para 120 horas. Os resultados obtidos também podem ser encontrados em Rejowski e Pinto (2008).

Cafaro e Cerdá (2004) utilizaram uma formulação de Programação Linear Inteira Mista com representação contínua do tempo para o transporte de derivados de uma única refinaria para vários terminais de distribuição. O modelo leva em conta restrições tais como balanço de massa, níveis permitidos nos tanques e restrições de sequenciamento de produtos. Se necessário o modelo pode inserir selos para evitar interfaces não desejáveis. O objetivo do problema é minimizar os custos de estoque, de interface dos produtos e de bombeamento, podendo incluir custos mais altos de bombeamento nos períodos de pico. A solução ótima foi encontrada para os dois problemas apresentados, que foram extraídos do trabalho de Rejowski e Pinto (2003). Segundo os autores, a representação contínua do tempo permitiu uma descrição mais rigorosa do problema, uma severa redução das variáveis binárias, das restrições e do tempo computacional.

Em sua tese, Jittamai (2004) estudou o problema de *schedule* de produtos em um poliduto, sendo que estes devem ser entregues aos terminais de destino dentro de janelas de tempo. Os produtos a serem transportados são dados por um conjunto de ordens de serviços cíclicas, onde cada ordem de serviço corresponde a uma quantidade de produto que deve ser entregue dentro de uma janela de tempo a um determinado destino. Foi provado que este problema é NP-Completo. Para a solução do problema foi desenvolvido um algoritmo de fluxo reverso, que consiste em se estabelecer a sequência de entregas desejadas de produto e fazer o caminho inverso no duto obtendo a sequência de entrada. Como o objetivo do problema é minimizar sua inviabilidade, essa sequência de entregas de produtos deve minimizar a violação das janelas de tempo. Não foram contempladas as restrições de compatibilidade de produtos e de capacidade de armazenamento nos tanques. Para os testes computacionais um conjunto de instâncias foi gerado aleatoriamente com base em um grande oleoduto de uma companhia americana. O algoritmo forneceu bons resultados quando comparados às soluções ótimas dessas instâncias, as quais foram obtidas por busca exaustiva. O trabalho também traz um estudo preliminar para o caso onde o poliduto tem várias fontes. O algoritmo de fluxo reverso é adaptado para esse problema e também é testado com instâncias geradas aleatoriamente.

Sangineto (2006) utilizou Algoritmos Genéticos (AG) para abordar o problema de transporte dutoviário do oleoduto São Paulo-Brasília (OSBRA) que transporta cinco tipos de produtos, de uma refinaria (REPLAN) a cinco terminais. Foram consideradas restrições de compatibilidade de produtos, de capacidade de armazenamento, atendimento a demanda e estocagem (é desejável manter um estoque baixo nos tanques), além de custos de bombeamento, interface e estocagem. As restrições foram incorporadas à função de avaliação através do método de minimização de energia. O algoritmo foi testado e comparado a uma programação real fornecida pela Petrobras, com horizonte de planejamento de uma semana, discretizado em períodos de uma hora. Os resultados obtidos foram satisfatórios, correspondendo aos objetivos de melhorar o atendimento da demanda, reduzir interfaces e custos de bombeamento, o pior resultado ocorreu no estoque médio, devido ao alto número de faltas de estoque na programação real.

Souza Filho (2007) propôs uma metaheurística *Variable Neighborhood Search* (VNS) para o escalonamento do oleoduto São Paulo-Brasília (OSBRA). No problema estudado, uma refinaria transporta 5 tipos de produtos que são distribuídos em 5 locais distintos. Na modelagem do problema foram considerados alguns cenários que contemplam os custos de bombeamento, estocagem, interface, envio de produto no horário de pico, não atendimento da demanda e o custo de exceder a capacidade nas bases. Os dutos e o horizonte de planejamento foram discretizados. O VNS, quando comparado com o modelo proposto por Sangineto (2006), teve um desempenho considerado satisfatório. Além disso, foi proposta uma extensão que aborda um aumento do horizonte de planejamento de uma para duas semanas. Nesse caso, o problema foi resolvido em um tempo inferior a três horas. Em Souza Filho *et al.* (2008) foi proposto um modelo PLIM para o problema, que foi resolvido pelo método *Branch-and-Cut*. Os resultados obtidos foram melhores que aqueles alcançados anteriormente pelo VNS.

Cafaro e Cerdá (2005) e Cafaro e Cerdá (2008) propuseram um modelo PLIM com formulação contínua do horizonte de tempo para determinação de um *scheduling* dinâmico de dutos. Nesse caso as operações dutoviárias são escalonadas em um horizonte rolante multiperíodo de tamanho fixo. Além disso, novas informações sobre mudanças nos destinos das bateladas, atualizações no plano de produção da refinaria, cancelamento de ordens e informações sobre estoque são disponibilizadas ao longo do horizonte de planejamento. O objetivo é atualizar dinamicamente a sequência e os volumes das novas bateladas a serem enviadas no duto de modo a atender as demandas, manter os estoques em níveis aceitáveis, determinar o tamanho de cada batelada e minimizar o custo total de operação. O modelo foi

aplicado com sucesso a um estudo de caso real, uma modificação daquele apresentado por Rejowski e Pinto (2003), na qual um duto envia 4 produtos distintos a 5 terminais em um horizonte de planejamento rolante composto por 4 períodos de 1 semana.

MirHassani e Ghorbanalizadeh (2008) propuseram um modelo PLIM para *scheduling* de um sistema dutoviário composto por uma refinaria e um duto multiproduto conectado a alguns depósitos e mercados consumidores. Este duto é ramificado e possui um formato em Y. Além disso, tanto o duto quanto o tempo foram discretizados. O objetivo é minimizar o número total de interfaces geradas. Foram conduzidos dois estudos de caso. No primeiro deles, o duto ramificado, que transporta 4 tipos de produtos distintos, foi dividido em 9 segmentos de igual volume. No segundo cenário, o duto foi dividido em 7 segmentos e transporta apenas três produtos. Os autores obtiveram soluções viáveis para ambas as instâncias. MirHassani e Jahromi (2011) abordaram esse mesmo problema através do modelo proposto por Cafaro e Cerdá (2004) que faz uso da discretização contínua do tempo. Esse modelo possui um menor número de variáveis binárias e permitiu uma melhor descrição do problema. Foram encontradas soluções ótimas para todas as instâncias testadas. Destaque-se ainda que houve uma significativa redução do tempo computacional gasto para obtê-las.

3.3. TRABALHOS ENVOLVENDO REDE DE DUTOS

A dissertação de Camponogara (1995) trata do problema de transporte de derivados de petróleo (gasolina, diesel, querosene de aviação, nafta, GLP, álcool anidro e álcool hidratado) por uma rede de dutos bidirecionais, baseado na rede de claros da Petrobras. Inicialmente foi elaborado um modelo de Programação Matemática, baseado em um Modelo de Fluxo em Rede com Multiperíodos, para o problema. Mas devido à dificuldade em se obter soluções para o modelo, a alternativa escolhida pelo autor, foi a de usar uma abordagem heurística. Assim, o problema foi decomposto em 3 problemas menores: a geração das operações de transporte (*jobs*); a escolha da rota entre a base produtora e a consumidora de cada *job*; e a programação das operações (*scheduling*). Esses componentes foram integrados em um algoritmo de *Times Assíncrono* (A-Team), que pode ser visto como uma organização de *software* descentralizada para cooperação de algoritmos. O modelo heurístico obedece às restrições de demanda, restrições de capacidade e restrições de sequenciamento de produtos e tem como objetivo encontrar uma solução viável. Com isso, a restrição de atendimento às demandas torna-se o objetivo e o modelo procura minimizar a inviabilidade. As rotas são escolhidas dentre um conjunto pré-estabelecido com base na experiência da Petrobras. Para os

exemplos apresentados não foi encontrada nenhuma solução que atendesse à demanda dos mercados consumidores durante o horizonte de tempo de 120 horas, houve desabastecimento a partir de 100 horas e de 80 horas.

Em Crane *et al.* (1999), os autores utilizam o Algoritmo Genético (AG) para abordar uma versão bem simplificada do problema de transporte em rede de dutos. Foi considerada uma rede de dutos com a topologia de uma árvore direcionada com apenas 8 terminais e 2 produtos. Os volumes dos tanques de armazenagem em cada terminal são discretizados, podendo assumir somente os valores 0, 1 ou 2. Não são consideradas restrições de compatibilidade de produtos; as bateladas de produtos tem volume unitário e cada trecho de duto comporta apenas uma batelada. Os autores desenvolveram um AG com representação binária para o cromossomo, onde cada gene do cromossomo estabelece um possível estado para cada terminal e uma ação a ser tomada dentro de um conjunto de ações pré-estabelecidas. O objetivo é atingir as metas pré-determinadas para o nível de cada tanque de armazenagem de todos os terminais. O algoritmo foi aplicado a uma pequena instância e chegou à solução ótima. Porém, dado que o comprimento do cromossomo é proporcional ao número de estados possíveis para cada terminal, para um problema do mundo real o tamanho do cromossomo iria crescer exponencialmente, impossibilitando o uso deste método.

O trabalho de Milidiú *et al.* (2001) descreve um método heurístico do tipo *Greed Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) para resolver o problema de transporte de derivados de petróleo em rede de dutos, apresentado por Camponogara (1995). O método desenvolvido utiliza as soluções obtidas pela heurística A-Teams, desenvolvida por esse autor, como pontos de partida para buscas locais. Estas buscas locais obtêm soluções refinadas dentre as quais a de menor custo é retornada pelo método. O custo da solução representa a soma dos volumes totais de produto faltando ou transbordando em cada hora de simulação. Os autores resolveram a mesma instância apresentada por Camponogara (1995), com e sem o método GRASP para fazer a busca local. Foi obtida solução viável apenas com o uso do método GRASP.

Braconi (2002) também propôs uma abordagem heurística para encontrar soluções viáveis para o problema de transporte de derivados em dutos bidirecionais. Essa heurística é dividida em duas etapas. Na primeira, é obtido o planejamento dos produtos a serem transportados com suas respectivas rotas e volumes. Nesta etapa é resolvido um problema de programação linear. Este problema foi derivado de uma relaxação da formulação original do problema como um problema de Programação Linear Inteira Mista, que teve como base o modelo de fluxo em rede com multiperíodos. Na segunda etapa é utilizada uma heurística

para definir o *scheduling* dos produtos de forma que sejam respeitadas as restrições de sequenciamento de produtos e de capacidade de armazenamento dos tanques, entre outras restrições que asseguram o funcionamento correto dos dutos. São realizadas diversas iterações entre as etapas da heurística até que seja encontrada uma solução viável para o problema. Para testar a heurística foram utilizadas cinco instâncias baseadas na rede de Claros e Escuros da Petrobras. Foram encontradas soluções viáveis para todas as instâncias, com um horizonte de programação variando de 5 a 30 dias e com tempos computacionais inferiores a 20 minutos. Além disso, a autora encontrou uma solução viável para o mesmo problema apresentado por Camponogara (1995), para um horizonte de cinco dias de programação.

Assis (2002) propôs um modelo de otimização de fluxo em redes para solução de um PTD composto por 4 refinarias e 10 terminais, na qual são transportados gasolina, óleo diesel e querosene de aviação. Cada nó da rede possui produção própria, capacidade de estocagem e demanda para os mercados locais. Os dutos podem operar em ambas as direções, dependendo das características de demanda na rede. Foram desenvolvidas instâncias que consideram um único período ou múltiplos períodos. Foram construídos ainda dois tipos de objetivos, a saber, maximizar a ocupação do sistema ou minimizar as quantidades transportadas. O modelo de otimização em redes desenvolvido pelo autor é um modelo de Programação Linear e foi resolvido pelo método SIMPLEX.

De La Cruz *et al.* (2003; 2005) abordaram a problemática de rede de dutos bidirecionais mediante Algoritmos Evolucionários Multiobjetivos (MOEA) e Programação Linear Inteira Mista (PLIM), obtendo resultados similares com ambas as técnicas. Em De La Cruz *et al.* (2005) os autores ainda implementaram um método híbrido, onde os dois métodos, MOEA e PLIM, são executados em paralelo, e as soluções obtidas pelo PLIM são usadas como soluções imigrantes para o algoritmo evolucionário. O uso dessa técnica híbrida permite obtenção de soluções viáveis em um menor tempo de execução computacional. Tais resultados foram obtidos para uma rede que transporta quatro tipos de produtos de dois terminais fontes para três terminais de destino, passando por dois terminais intermediários. Dos dutos dessa rede, apenas um é bidirecional. São considerados prazos de entrega para as demandas e restrições de capacidade e de colisão nos dutos bidirecionais. No Algoritmo Evolucionário, algumas destas restrições são penalizadas na função objetivo, enquanto outras exigem uma reparação da solução. Embora não sejam consideradas restrições de compatibilidade de produtos, um dos objetivos é reduzir o número de interfaces de produtos dentro de cada duto. O outro objetivo é reduzir o tempo final para realizar a entrega de todas as demandas.

O problema de transporte por dutos (PTD) tratado por Pessoa (2003) não considera as restrições de sequenciamento de produtos e de capacidade de armazenamento. É dado um conjunto de ordens de serviço com a quantidade de produto a ser transportada (dado em bateladas unitárias) e com destino já definido para cada ordem. É definido também um subconjunto de ordens proteláveis, que servirão para empurrar as outras ordens aos seus destinos. Foi provado que esse problema é NP-Difícil, mesmo que o grafo que representa a rede de dutos seja acíclico. Foi feita uma simplificação do problema, denominada PTDS, onde todas as bateladas proteláveis são armazenadas em nós no estado inicial. Isto permitiu o desenvolvimento de um algoritmo polinomial BPA (*Batch-to-Pipe Assignment*) capaz de obter soluções viáveis para qualquer grafo com o objetivo de minimizar uma função de custo de operações. No caso do grafo ser acíclico, essa solução é ótima. Para o caso em que se queira minimizar o *makespan* no PTDS foi demonstrado que não existe algoritmo polinomial para a solução do problema, mesmo que o grafo seja acíclico e planar. Podendo o algoritmo BPA fornecer uma solução m -aproximada, onde m é número de dutos da rede, quando o grafo for acíclico. Como o objetivo principal do trabalho foi encontrar resultados teóricos que permitam um maior entendimento da estrutura combinatória inerente ao problema, nenhuma instância foi resolvida. Esses resultados também são encontrados em Milidiú *et al.* (2002) e Milidiú *et al.* (2003).

Em Más (2001) e Más e Pinto (2003) foi estudado o problema de *scheduling* de curto prazo em complexos contendo portos, refinarias e uma infraestrutura de oleodutos unidirecionais capaz de transferir petróleo dos portos para as refinarias. Os portos contêm píeres que recebem petroleiros para descarga, tanques de armazenagem e uma rede de tubulações que os interconectam. As refinarias possuem sua própria infraestrutura de armazenagem. O problema também considera a armazenagem intermediária em subestações. Devido à sua complexidade, o problema foi formulado por meio de dois modelos distintos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) de tempo contínuo com base em eventos, que giram em torno dos elementos da estrutura física do sistema. O primeiro modelo engloba a estrutura do porto e considera uma representação agregada dos oleodutos e armazenagem intermediária. A sua solução envolve a alocação de petroleiros a píeres assim como operações de descarga de petroleiros e carga de oleodutos. Estas informações são utilizadas pelo segundo modelo que representa, de forma detalhada, a infraestrutura das subestações que contêm oleodutos e tanques intermediários. As variáveis de decisão, neste caso, envolvem operações de carga e descarga de tanques e oleodutos. Os autores apresentaram um exemplo de *scheduling* de óleo cru para um complexo contendo um porto, quatro refinarias e duas

subestações, treze petroleiros, quatro píeres e quatorze tipos de petróleo. Essa instância foi modelada usando uma vez o modelo de porto e três vezes o modelo de subestação, que foram resolvidos em cascata, obedecendo à direção do porto para as refinarias. Foi encontrada uma solução viável para o problema em tempos computacionais razoáveis. Neste trabalho algumas interfaces indesejáveis de produtos nos oleodutos foram penalizadas através da introdução de uma parcela de custos de interface na função objetivo dos modelos. Em Veiga (2006) foi desenvolvida uma hierarquização do modelo proposto por Más (2001). O modelo original foi dividido em três blocos menores. O primeiro deles é responsável pela determinação dos recursos, o segundo pelo seu sequenciamento e o terceiro pela sua temporização. Com essa abordagem foi possível à obtenção de melhores resultados, em menores tempos computacionais. Boschetto (2006) propôs um método de pré-processamento, que também foi aplicado ao modelo PLIM proposto por Más (2001). Esse método faz uso da Teoria das Restrições para eliminar o máximo de restrições redundantes, fixar o maior número de variáveis e reduzir o porte do modelo. Os testes realizados permitiram que se alcançassem soluções factíveis de boa qualidade com uma redução significativa nos tempos computacionais obtidos por Más (2001).

Neiro e Pinto (2004) propõem um modelo de otimização para o planejamento de uma cadeia de suprimentos de petróleo que compreende terminais de petróleo, refinarias e centros de distribuição e uma rede de dutos unidirecionais para suprimento de petróleo e outra para distribuição de produtos. A distribuição através dos dutos é definida dos terminais de petróleo para as refinarias e das refinarias para terminais intermediários ou para centros de distribuição. Foi feito um estudo de caso para um complexo contendo quatro refinarias e cinco terminais (inclui terminais de petróleo e centros de distribuição). Todo esse complexo foi modelado a partir de três estruturas básicas que representam unidades de processamento, tanques e dutos. Essas estruturas compõem o conjunto de restrições do problema de otimização de toda a cadeia, que corresponde a um problema de Programação Não Linear Inteiro Misto de grande escala. Foi encontrada solução para o exemplo apresentado. No entanto, a abordagem para a estrutura de dutos é muito simplificada e não leva em consideração as perdas ocorridas nas interfaces dos produtos.

Em Liporace (2005), o problema de transporte em oleodutos serviu como inspiração para a elaboração de um novo domínio para o desenvolvimento de planejadores de propósito geral. Este domínio, *Pipesworld*, foi especificado em *Planning Domain Definition Language*

(PDDL)³ e incorporado ao *benchmark* oficial da "4th International Planner Competition". A primeira versão do *Pipesworld* também pode ser encontrada em Milidiú *et al* (2003b). O autor também demonstra que problemas de transporte de derivados em uma rede com um único duto e com restrições de sequenciamento de produtos são NP-Completo. O que implica que esses problemas com restrições de sequenciamento são difíceis para qualquer topologia de rede, com dutos unidirecionais ou bidirecionais. Essa mesma demonstração também é apresentada em Milidiú e Liporace (2003). A contribuição maior deste trabalho é uma estrutura de *software* de código livre, PLANSIM, que conta com simuladores a evento discreto, estratégias de busca e buscas heurísticas (com técnicas de inteligência artificial) para facilitar a construção de planejadores especializados. Utilizando essa ferramenta, foi construído o PLUMBER, um aplicativo voltado para a solução do problema de planejamento de transporte em redes dutoviárias. Foram consideradas restrições de sequenciamento de produtos e de capacidade de armazenamento, e as bateladas não foram definidas a priori. Foi resolvida uma instância para a rede de Claros da Petrobras com 13 áreas, 25 dutos e 16 produtos, porém com um número bem limitado de demandas. O objetivo é atender às demandas no menor número de operações possível.

Em sua dissertação de mestrado, Marcellino (2006) trata o problema de transporte de derivados de petróleo, em uma rede de dutos bidirecionais, como um problema de planejamento para o período de uma semana, com o objetivo mais abrangente de encontrar os fluxos de produtos em cada oleoduto durante todo o horizonte de tempo, e os estoques de produtos em cada área ao final deste período de tempo. O trabalho merece destaque por ser o primeiro a levar em conta a realidade atual vivida pela indústria do petróleo no Brasil, que aponta para uma tendência de independência crescente entre os envolvidos com a distribuição dutoviária. Este novo cenário exigirá maior segurança e privacidade da informação trocada entre os participantes, impossibilitando um processo de solução centralizado como o atual. Sendo assim, o problema é modelado como um Problema de Satisfação de Restrições Distribuído com Otimização, onde as variáveis e restrições são distribuídas entre múltiplos agentes autônomos, que representam diferentes terminais e refinarias, de forma a manter a privacidade das informações associadas a cada um deles. Para a solução foi utilizado o Algoritmo *Adopt* (Assíncrono Distribuído com Otimização). Cinco instâncias foram geradas aleatoriamente com base em dados históricos reais da Rede de Claros da Transpetro. Cada instância foi ajustada em vários níveis de complexidade onde eram variados os números de

³ PDDL é uma linguagem utilizada como padrão pela comunidade de planejamento em inteligência artificial.

dutos, bases e produtos transportados pela rede. A solução ótima foi obtida para vários níveis de complexidade das instâncias.

Em sua dissertação, Westphal (2006) propôs um AG com elitismo para otimização do transporte de derivados em uma rede de dutos. Ela transporta 4 tipos de produtos e é composta por 2 refinarias, 5 terminais (sendo 2 deles intermediários), e 9 dutos (sendo um deles birecional). Foram consideradas restrições de quantidade mínima de batelada, atendimento a demanda, capacidade de tanques e restrições de envio e recebimento simultâneo na conexão que apresenta birecionalidade. Os dutos e horizonte de tempo foram discretizados em um modelo multiobjetivo que considera os seguintes critérios: minimização da quantidade enviada de bateladas, minimização da quantidade recebida de bateladas, minimização do tempo de atendimento a demanda e minimização da fragmentação no envio de bateladas. Os resultados obtidos indicaram uma rápida convergência para boas soluções Pareto-ótimas.

Mori *et al.* (2007) propuseram um modelo de simulação a eventos discretos para realizar a programação de uma rede de dutos composta por 9 áreas, sendo 3 refinarias, 1 porto e 5 centros de distribuição. A rede é composta por 15 dutos e transporta mais de 10 produtos diferentes. O modelo de simulação proposto é formado por três blocos. O primeiro deles é responsável pela geração de eventos em tempos particulares, os quais são fornecidos por um pacote de otimização, e pela geração de atributos desses eventos, tais como tipo, volume, rota e fluxo de cada produto, de acordo com as informações disponíveis na base de dados. O segundo bloco é o de tancagem agregada, o qual considera três aspectos distintos: produção, demanda e transporte. No bloco de dutos, cada um desses entes é modelado como um sistema de filas do tipo FIFO (*First-In-First-Out*). O modelo de simulação permitiu a detecção de conflitos na alocação de cada duto bem como na violação dos níveis de estoque. Além disso, os atrasos puderam ser mensurados e foram disponibilizadas estatísticas sobre a taxa de utilização de cada duto, as quais permitem a identificação de gargalos no sistema, ociosidades ou mesmo identificar e classificar novas abordagens de *scheduling*.

Felizari (2009) utilizou uma abordagem de decomposição para tratar o PTD em uma rede de dutos composta 15 dutos, sendo três deles passíveis de reversão. Eles conectam 3 refinarias, 1 porto e cinco centros de distribuição e transportam mais de 10 produtos diferentes. Nesse tipo de abordagem o PTD é decomposto em três elementos-chave: alocação de recursos, sequenciamento de atividades e temporização das tarefas. Foi proposto um modelo PLIM com domínio contínuo do horizonte de tempo para determinar o escalonamento de curto prazo das operações da rede. Foram consideradas restrições

operacionais relevantes, tais como composição das vazões ao longo das rotas de fluxo, alinhamentos locais, penalização por horossazonalidade, troca de turno, operações de reversão e pulmão. Segundo o autor, os resultados obtidos permitiram avaliar a taxa de ocupação dos dutos ao longo do horizonte de programação, identificando folgas e gargalos no sistema. Yamamoto (2007a) propôs um AG multiobjetivo para sequenciamento de bateladas previamente geradas a partir do bloco de alocação de recursos visando à obtenção de melhores soluções após o processo de temporização. Os resultados obtidos indicaram um aumento da taxa de utilização dos dutos e a diminuição do número de interseções entre diferentes produtos, esta última pode representar um menor gasto com selos ou uma menor perda de qualidade de produtos. Yamamoto (2007b) avaliou o comportamento de diversas metaheurísticas no tocante a ordenação das bateladas. Ela concluiu que a metaheurística *Variable Neighborhood Search* (VNS) teve um melhor desempenho e foi capaz de produzir soluções subótimas em um baixo tempo de processamento. Felizari (2009) também propôs um modelo de ordenação das bateladas baseado em Programação Lógica por Restrições (CLP) e concluiu que os resultados obtidos foram melhores que aqueles baseados em heurística construtiva. Os resultados obtidos em Felizari (2009) também podem ser encontrados em Neves-Jr. *et al.* (2007) e Felizari *et al.* (2009). Melhorias no modelo PLIM proposto podem ser encontradas em Boschetto *et al.* (2008) e Boschetto e Neves-Jr (2009).

Alves (2007) propôs um AG para escalonamento de uma rede dutos operada pela Transpetro. Essa rede transporta 9 tipos de produtos, dentre os quais foram considerados apenas 5 pela autora. A topologia da rede considera 8 dutos, 4 refinarias e 4 terminais. Foram consideradas restrições de atendimento a demanda e capacidade de armazenamento dos tanques. Foram construídas instâncias com horizontes de planejamento de 7 e de 14 dias. Nelas, os dutos foram discretizados bem como o horizonte de tempo. Os resultados obtidos indicaram um baixo tempo computacional para obtenção de soluções subótimas. Em quatro dentre as cinco instâncias testadas, foram encontradas soluções melhores do que aquelas já conhecidas pela Transpetro. Pereira (2008) propôs um modelo PLIM para resolução do problema abordado por Alves (2007). Após 24 horas de execução, o método *Branch-and-Bound* não conseguiu encontrar soluções viáveis. Em função disso, a autora optou pela redução do horizonte de planejamento o que resultou em significativas melhorias quando se compara os resultados do método exato com os obtidos pelo AG. No âmbito desse trabalho foi proposta uma extensão do modelo PLIM proposto por Pereira (2008).

Sanchez (2007) combinou metaheurística e simulação para geração e validação da programação de uma rede de oleodutos. Desenvolveu-se um conjunto de módulos para

criação de modelos de simulação a eventos discretos, que permitem avaliar a qualidade das programações dutoviárias, além de servir como uma ferramenta de apoio para avaliação de escalonamentos alternativos. A tarefa de geração das soluções é realizada a partir dos resultados obtidos pela metaheurística de Busca Tabu. Foram realizados experimentos computacionais, para um horizonte de 4 semanas, de duas redes de dutos distintas, ambas representadas por um grafo em forma de árvore. A primeira delas transporta 7 produtos e é composta por uma refinaria, 6 terminais e 6 dutos; a segunda rede também transporta 7 produtos, mas é composta por uma refinaria, 10 terminais e 10 dutos. O modelo desenvolvido deve cumprir as metas estabelecidas em seis critérios, a saber, carências nos tanques, volume entregue nos tanques, número de interfaces proibidas, duração das interfaces, duração dos bloqueios e o custos das interfaces. Os resultados obtidos indicaram a geração de escalonamentos satisfatórios em tempos inferiores a uma hora.

Moura *et al.* (2008a; 2008b) abordaram o problema de uma rede de dutos com 29 dutos e 14 nós que transporta cerca de 30 produtos. O problema foi tratado por meio de uma abordagem híbrida que combina uma heurística construtiva randomizada e um modelo de Programação por Restrições. O horizonte de tempo é tratado de forma contínua e os dutos não foram discretizados. O problema foi decomposto em uma fase de planejamento e uma fase de escalonamento. Na primeira fase a heurística construtiva é responsável pela criação de um conjunto de ordens de entrega. Cada ordem é definida pelo volume, origem, destino, rota e prazo de entrega. Na segunda fase é realizado o sequenciamento das ordens obtidas na fase anterior. Na fase de escalonamento são determinados ainda os tempos de início de cada operação de bombeamento de modo que nenhuma restrição operacional seja violada. O modelo foi testado em cenários cujo horizonte de planejamento era de 7 e 10 dias. Os resultados obtidos indicaram que a abordagem desenvolvida é promissora quando se considera redes de dutos de grande porte. Uma extensão desse modelo e uma descrição mais detalhada do problema foi proposta em Ciré (2008) e Lopes *et al.* (2010).

Cafaro e Cerdá (2009) propuseram um modelo PLIM com formulação contínua do horizonte de tempo para determinação do *scheduling* de um duto com múltiplas fontes. Para tal, eles generalizaram o modelo proposto por Cafaro e Cerdá (2004), o qual considera uma única fonte. O modelo generalizado foi aplicado com sucesso em um sistema dutoviário, introduzido por Jittamai (2004), composto por 2 refinarias e 3 terminais que transporta 3 diferentes tipos de produto. Foram considerados dois modos de operação do duto e horizontes de planejamento de 5, 7 e 10 dias.

Herrán *et al.* (2010) abordaram o planejamento de curto prazo de uma rede de dutos. Neste modelo tanto o horizonte de planejamento quanto os dutos são discretizados. O objetivo é minimizar os custos de bombeamento, interface, estocagem e parada dos dutos. Foram propostos dois modelos PLIM para o problema: completo e simplificado. Para ilustrar a aplicação do modelo foram conduzidos experimentos numéricos. Os dados foram selecionados de forma que, para os dutos bidirecionais, houvesse bombeamento em ambos os sentidos. Os resultados obtidos indicaram que o modelo completo é indicado quando a demanda e os custos de parada são baixos, enquanto o modelo simplificado foi melhor quando a demanda é elevada ou os custos de parada são elevados.

Kira *et al.* (2010) propuseram um modelo matemático que fez algumas adaptações no modelo PLIM proposto por Cafaro e Cerdá (2008) de modo a se contemplar particularidades da prática descrita pelos programadores. O modelo foi aplicado em um sistema dutoviário composto por 1 refinaria e 5 centros de distribuição em horizontes de planejamento de 30 e 60 dias. Os principais avanços obtidos com a nova modelagem referem-se ao cumprimento da restrição de bombeio contínuo de produtos, além de evitar o chaveamento da rede em determinados órgãos e a conseqüente parada de trechos de duto. Além disso, essa nova formulação permitiu a representação das restrições de maneira mais intuitiva, visando controlar a dinâmica de sangria e as faixas de vazão de transporte ao longo da rede.

Cafaro e Cerdá (2010), a partir do trabalho de Cafaro e Cerdá (2009), propuseram um modelo PLIM com representação contínua do horizonte do tempo para o *scheduling* de uma rede de dutos unidirecionais onde são permitidas injeções simultânea de bateladas. Foram apresentados três exemplos distintos, onde cada nó da rede possui grau no máximo igual a 2. Além disso, considerou-se duas orientações na função objetivo, a primeira delas procura minimizar o *makespan* e nesse caso, as operações nos dutos devem ser encerradas o mais cedo possível; na segunda, minimiza-se o custo total das operações. Os resultados obtidos indicaram para cada cenário a seqüência ótima de bombeamento dos produtos, tamanho dos lotes, taxas aceitáveis de bombeamento, tempos de início e fim do bombeamento de cada bloco e alocação das bateladas a serem recebidas, todas de uma vez, em cada terminal.

3.4. SÍNTESE DOS TRABALHOS SOBRE SCHEDULING EM DUTOS

A literatura a respeito do transporte dutoviário teve suas origens no fim da década de 60. Os primeiros trabalhos desenvolvidos tratavam basicamente da utilização de um poliduto que transportava poucos produtos. Nessa época o desenvolvimento de algoritmos para o

problema era bastante incipiente, pois não se dispunha de um aparato computacional que se verifica nos dias de hoje. Nesse contexto, os primeiros trabalhos desenvolvidos neste assunto focavam a solução de problemas baseadas no cômputo de cálculos manuais e/ou o uso de planilhas.

A quantidade de trabalhos sobre programação de dutos tem crescido bastante na última década, principalmente aqueles relativos à rede dutos, que atualmente superam a quantidade de trabalhos envolvendo um único duto. A maior parte dos trabalhos envolvendo um único poliduto utiliza modelos PLIM . Isso pode ser explicado, quando se leva em conta porte dos modelos matemáticos gerados, os quais na maior parte das vezes podem ser resolvidos em um tempo computacional razoável. Nos trabalhos relacionados à rede de dutos foram propostas diversas abordagens, tanto exatas quanto heurísticas. Apesar de também existir um predomínio do modelos PLIM , merece destaque a técnica de Programação Lógica Por Restrições, utilizada com sucesso em alguns trabalhos recentes. Existe ainda um equilíbrio entre o uso da representação discreta e contínua do tempo.

Um detalhe importante na programação de oleodutos são as hipóteses e restrições consideradas em cada modelo. Em geral, são feitas simplificações que tem o intuito de tornar o modelo matemático mais tratável, entretanto frequentemente tais suposições ignoram algumas características relevantes do processo. Ainda, que se tenha em mente que um modelo é uma simplificação da realidade, nenhum dos modelos disponíveis hoje na literatura, contempla todas as necessidades da programação de oleodutos. Tome-se, por exemplo, que apenas o trabalho de Rejowski (2007) considera restrições hidráulicas; poucos trabalhos como, o de Felizari (2009), consideram restrições de troca de turno; ou mesmo a hipótese de que a vazão de bombeamento seja constante, muito comum nesse tipo de problema, pode não ser verdadeira. Esse panorama dá indícios de que esse tipo de problema continuará sendo objeto de estudo da comunidade científica, inclusive com um aumento na quantidade de publicações na área, nesta próxima década, em função dos óbices a serem transpostos e do desafio que eles representam.

De uma maneira geral, os trabalhos desenvolvidos possuem como característica principal o desenvolvimento de ferramentas computacionais que auxiliem o tomador de decisão na tarefa de programação dos dutos. Esse foco é responsável pela literatura incipiente com relação a trabalhos teóricos, destacando-se principalmente os trabalhos de Milidiú e Liporace (2003) e Pessoa (2003). Além disso, apesar da natureza não-linear inerente nesse tipo de problema, poucos trabalhos fazem uma abordagem não linear, como se pode destacar nos trabalhos de Neiro e Pinto (2004) e Rejowski (2007). Entretanto, é importante pontuar

que a utilização de qualquer método depende do *trade-off* entre a qualidade da solução obtida e o tempo computacional necessário para obtê-la. Nesse ínterim, a opção da maioria dos autores de não considerar tais tipos de modelos, reside basicamente na complexidade de obtenção de soluções viáveis, uma vez que nesse tipo de problema a quantidade de variáveis e restrições facilmente supera os limites máximos recomendados pelos pacotes de otimização que se encontram disponíveis no mercado ou o tempo computacional gasto para obtenção de alguma solução viável é significativamente elevado.

Outra particularidade relevante na literatura, é a inexistência de trabalhos que considerem incerteza em alguns dos parâmetros no modelo de otimização. Novamente, a razão para tal situação está atrelada a tratabilidade dos modelos matemáticos. Destaque-se ainda, que apesar do aumento da literatura sobre o assunto, a quantidade de instâncias disponíveis para testes é bastante escassa e, além disso, não existe uma biblioteca de instâncias-testes similar a que ocorre, por exemplo, em problemas clássicos de Programação Inteira, como o Problema da Mochila ou o Problema do Caixeiro Viajante. Parte das explicações, relativas a isso, se devem ao sigilo imposto pelas companhias na divulgação dos seus dados.

Uma síntese da literatura dutoviária a respeito de trabalhos envolvendo um único duto e rede de dutos são apresentados respectivamente na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2. Mais informações a respeito dos trabalhos descritos nessas tabelas são exibidas no APÊNDICE A e no APÊNDICE B.

Tabela 3.1: Resumo da literatura a respeito de programação dutoviária em um único duto

Autor(es)	Ano	Número de fontes	Número de destinos	Técnica utilizada	Horizonte de Planejamento	Solução alcançada
Amiragov e Nuriev	1970	Uma	Um	Heurística	2 horas	Solução viável
Techo Holbrook	1974	Uma	Um	Heurística implementada com o auxílio de planilha eletrônica	--	Solução viável
Hane e Ratliff	1995	Uma	Vários	Algoritmo Guloso + Branch-and-Bound	--	Solução ótima
Shah	1996	Uma	Um	PLIM (com discretização uniforme do horizonte de tempo)	1 mês	Solução viável
Sasikumar <i>et al.</i>	1997	Uma	Vários	Beam Search (Inteligência Artificial)	1 mês	Solução viável
Pinto <i>et al.</i>	2000	Uma	Vários	PLIM (com	58h	Solução ótima

Rejowski	2001	Uma	Vários	discretização uniforme do horizonte de tempo) PLIM (com discretização uniforme do horizonte de tempo)	75 horas	Solução viável
Rejowski	2003	Uma	Vários	PLIM (com discretização uniforme do horizonte de tempo)	75 horas	Solução viável
Cafaro e Cerdá	2004	Uma	Vários	PLIM (com representação contínua do horizonte de tempo)	75 horas	Solução ótima
Jittamai	2004	Uma /Várias	Vários	Heurística de Fluxo Reverso	--	Solução viável
Magatão <i>et al.</i>	2004	Duas	Dois	PLIM (com discretização uniforme do horizonte de tempo)	120 horas	Solução ótima
Rejowski e Pinto	2004	Uma	Vários	PLIM (com discretização uniforme do horizonte de tempo)	75 horas	Solução ótima
Cafaro e Cerdá	2005	Um	Vários	PLIM	4 períodos de uma semana	Solução ótima
Relvas <i>et al.</i>	2006	Um	Um	PLIM	75 horas	Solução ótima
Relvas <i>et al.</i>	2007	Um	Um	PLIM	75 horas	Solução ótima
Sanginetto	2006	Uma	Vários	Algoritmo Genético	168 horas	Solução viável
Hassimotto	2007	Várias	Vários	PLIM	64 horas	Solução viável
Rejowski	2007	Um	Vários	PLIM /MINLP	75 horas	Solução ótima/ viável
Souza Filho	2007	Um	Vários	VNS	168/336 horas	Solução viável
Souza Filho <i>et al.</i>	2008	Um	Vários	PLIM	168	Solução ótima
Cafaro e Cerdá	2008	Um	Vários	PLIM	4 períodos de uma semana	Solução ótima
Magatão <i>et al.</i>	2008	Duas	Dois	CLP+PLIM	114 a 144 horas e 96 a 126 horas	Solução ótima
MirHassani e Ghorbanalizadeh	2008	Um	Vários	PLIM		Solução viável
Rejowski e Pinto	2008	Um	Vários	PLIM /MINLP	75 horas	Solução ótima/ viável
Relvas <i>et al.</i>	2008	Um	Um	PLIM	7 dias	Solução ótima

Relvas <i>et al.</i>	2009	Um	Vários	Heurística	1 semana, 1 mês e 6 meses	Solução viável
Benzecry	2010	Um	Um	PLIM	7 e 30 dias	Solução ótima
MirHassani e Jahomi	2011	Um	Vários	PLIM	72 horas	Solução ótima

Tabela 3.2: Resumo da literatura a respeito de programação dutoviária em redes de dutos

Autor(es)	Ano	Número de fontes	Número de destinos	Técnica utilizada	Horizonte de Planejamento	Solução alcançada
Camponogara	1995	Várias	Vários	Heurística A-Team	120 h	Solução Inviável
Crane <i>et al.</i>	1999	Uma	Vários	Algoritmo Genético	--	Solução Viável
Más e Más e Pinto	2001	Uma	Vários	PLIM de tempo contínuo baseado em eventos	168 horas	Solução viável
Milidiú <i>et al.</i>	2001	várias	Vários	GRASP	120 h	Solução viável
Assis	2002	Várias	Vários	PL	Mono ou multiperíodo (6 meses)	Solução ótima
Braconi	2002	Várias	Vários	PL (com discretização do horizonte de tempo) + Heurística	5 a 30 dias	Solução viável
Milidiú <i>et al.</i>	2002	Várias	Vários	Heurística	--	Solução viável / ótima (resultados teóricos)
De la Cruz <i>et al.</i>	2003	Várias	Vários	Algoritmo Multiobjetivo Evolucionário e PLIM	65 períodos de Tempo	Solução viável
Más e Más e Pinto	2003	Uma	Vários	PLIM de tempo contínuo baseado em eventos	168 horas	Solução viável
Milidiú <i>et al.</i>	2003	Várias	Vários	Heurística	--	Solução viável / ótima (resultados teóricos)
Pessoa	2003	Várias	Vários	Heurística	--	Solução viável / ótima (resultados teóricos)
Neiro e Pinto	2004	Várias	Vários	MINLP (com discretização do horizonte de tempo)	2 períodos de tempo	Solução ótima local
De la Cruz <i>et al.</i>	2005	Várias	Vários	Algoritmo Multiobjetivo	65 períodos de Tempo	Solução viável

				Evolucionário e PLIM		
Liporace	2005	Várias	Vários	Busca Heurísticas (Inteligência Artificial) + Simuladores	--	Solução viável
Boschetto	2006	Várias	Vários	Teoria das Restrições	168 horas	Solução viável
Marcellino	2006	Várias	Vários	Problema de Satisfação de Restrições Distribuído com Otimização	1 semana	Soluções viáveis/ótimas
Veiga	2006	Várias	Vários	PLIM hierarquizado	168 horas	Solução viável
Westphal	2006	Várias	Vários	AG multiobjectivo	48 períodos de tempo	Solução Pareto-ótima
Alves	2007	Várias	Vários	AG	1 e 2 semanas	Solução viável
Mori <i>et al.</i>	2007	Várias	Vários	Simulação a eventos discretos	20 dias	Solução viável
Neves-Jr. <i>et al.</i>	2007	Várias	Vários	PLIM	30 dias	Solução viável
Sánchez	2007	Várias	Vários	Simulação + Tabu Search	4 semanas	Solução viável
Yamamoto	2007a	Várias	Vários	AG multiobjectivo	30 dias	Solução viável
Yamamoto	2007b	Várias	Vários	VNS	30 dias	Solução viável
Boschetto <i>et al.</i>	2008	Várias	Vários	PLIM	30 dias	Solução viável
Ciré	2008	Várias	Vários	CLP	7 e 10 dias	Solução Viável
Moura <i>et al.</i>	2008a	Várias	Vários	CLP	7 e 10 dias	Solução Viável
Moura <i>et al.</i>	2008b	Várias	Vários	CLP	7 e 10 dias	Solução Viável
Pereira	2008	Várias	Vários	PLIM	3 a 7 dias	Solução viável/ ótima
Boschetto e Neves-Jr	2009	Várias	Vários	PLIM	30 dias	Solução viável
Cafaro e Cerdá	2009	Várias	Vários	PLIM	5, 7 e 10 dias	Solução ótima
Felizari <i>et al.</i>	2009	Várias	Vários	CLP	30 dias	Solução viável
Felizari	2009	Várias	Vários	PLIM + CLP	30 dias	Solução viável
Cafaro e Cerdá	2010	Várias	Vários	PLIM	--	Solução ótima
Kira <i>et al.</i>	2010	Várias	Vários	PLIM	30 e 60 dias	Solução ótima
Lopes <i>et al.</i>	2010	Várias	Vários	CLP	7 e 10 dias	Solução viável
Herrán <i>et al.</i>	2010	Várias	Vários	PLIM	100 horas	Solução ótima

3.5. BREVE REVISÃO SOBRE OTIMIZAÇÃO ROBUSTA

Nessa seção segue uma revisão sobre a temática de otimização robusta. Isso ocorreu porque essa técnica foi utilizada em um dos seis experimentos propostos nesse trabalho.

De acordo com Bertsimas e Sim (2004), o paradigma clássico da programação matemática considera que os coeficientes das variáveis e da função objetivo são precisamente conhecidos. Entretanto, esta situação muitas das vezes não condiz com a realidade, uma vez que variações nos dados podem fazer uma determinada solução deixar de ser ótima ou mesmo não ser nem mais viável. Uma questão natural que surge, seria como selecionar soluções que fossem inunes a essa variação dos dados, isto é, soluções robustas. O primeiro trabalho nessa direção foi realizado por Soyster (1973) que propôs um modelo robusto de Programação Linear. Em seu trabalho, Soyster considera o maior nível de proteção possível, entretanto seu modelo é o mais conservador do ponto de vista prático, pois a solução robusta tem um valor de função objetivo muito maior que a do modelo quando não se considera incertezas nos dados. Dessa forma, Ben-Tal e Nemirovski (2000) propuseram um modelo menos conservador que o proposto por Soyster (1973). Entretanto, esse modelo não é tão atrativo para problemas de otimização discreta por ser não-linear. Em Bertsimas e Sim (2004) foi proposto um modelo robusto de Programação Linear Inteira Mista para problemas de otimização discreta, o qual será descrito abaixo, pois será utilizado no âmbito desse trabalho.

Considere o seguinte Problema de Programação Linear (P) e assuma que existam somente elementos da matriz A que sejam sujeitos a incerteza. Em caso de existência de incertezas na função objetivo basta inseri-la como restrição e considerar o modelo R . Considere a linha i sujeita a incerteza.

$$\begin{array}{ll}
 \text{Max } c'x & \text{Max } z \\
 Ax \leq b \quad (P) & z - c'x \leq 0 \\
 l \leq x \leq u & Ax \leq b \quad (R) \\
 & l \leq x \leq u
 \end{array}$$

Bertsimas e Sim (2004) mostraram que problemas dessa natureza podem ser resolvidos por meio de modelos de otimização linear. Eles utilizaram o modelo U de incerteza nos dados que foi proposto em Ben-Tal e Nemirovski (2000). Considere uma linha particular da matriz A e seja J_i o conjunto dos coeficientes dessa linha sujeitos a incerteza. Nesse modelo cada coeficiente a_{ij} , $j \in J_i$ é modelado como uma variável aleatória simétrica e limitada \tilde{a}_{ij} ($j \in J_i$) que assume valores em $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$. Associado aos parâmetros

sujeitos a incerteza \tilde{a}_{ij} , os autores definiram a variável aleatória $\eta_{ij} = (\tilde{a}_{ij} - a_{ij}) / \hat{a}_{ij}$, a qual obedece uma distribuição simétrica desconhecida que assume valores entre $[-1, 1]$.

Para cada restrição i do modelo sujeita a incerteza, considere o parâmetro de proteção Γ_i , que não necessariamente é um número inteiro e assume valores entre $(0, |J_i|)$. Como é improvável que todos os coeficientes a_{ij} ($j \in J_i$) sofram modificação, a idéia é ficar protegido para todos os casos onde ocorra a variação de no máximo $\lfloor \Gamma_i \rfloor$ coeficientes e apenas um coeficiente a_{it} se modifique para $(\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{a}_{it}$. Dessa forma, mesmo que ocorram tais modificações, a solução obtida será viável com uma determinada probabilidade a ser calculada - probabilidade de violação da solução.

Bertsimas e Sim (2004) provaram que o problema robusto (P) é equivalente ao problema Q . Além disso, eles demonstraram que a probabilidade (P_i) de a solução robusta violar a restrição i é dada em função do parâmetro Γ_i . Assim, esse parâmetro controla o *trade-off* entre a probabilidade de violação da restrição e o valor da função objetivo – fenômeno denominado “preço da robustez”. Foi provado ainda que, assumindo válido para o problema o modelo U de incerteza nos dados, limites superiores para essa probabilidade podem ser calculados pela equação (3.1).

$$\begin{aligned}
 & \text{Max } c'x \\
 & \sum_j a_{ij}x_j + z_i\Gamma_i + \sum_{j \in J_i} p_{ij} \leq b_i \quad \forall i \\
 & z_i + p_{ij} \geq \hat{a}_{ij}x_j \quad \forall i, j \in J_i \\
 & -y_j \leq x_j \leq y_j \quad \forall j \\
 & l_j \leq x_j \leq u_j \quad \forall j \\
 & p_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in J_i \\
 & y_j \geq 0 \quad \forall j \\
 & z_i \geq 0 \quad \forall i
 \end{aligned} \tag{Q}$$

$$P(i) \leq (1-\mu)C(n, \lfloor \nu \rfloor) + \sum_{l=\lfloor \nu+1 \rfloor}^{|J_i|} C(n, l) \quad \text{onde}$$

$$C(n, l) = \begin{cases} \frac{1}{2^{|J_i|}}, & \text{se } l=0 \text{ ou } l=|J_i| \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{|J_i|}{(|J_i|-l)l}} \exp\left(|J_i| \log\left(\frac{|J_i|}{2(|J_i|-l)}\right) + l \log\left(\frac{|J_i|-l}{l}\right)\right), & \text{c.c} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\nu = \frac{(\Gamma_i + |J_i|)}{2}$$

$$\mu = \nu - \lfloor \nu \rfloor$$

4. MODELO MATEMÁTICO E HEURÍSTICAS

“Until recently there was no general automatic routine for solving such problems, as opposed to procedures for proving optimality of conjectured solutions, and the work here is intended to fill the gap” – Ailsa Land e Alison Doig, sobre algoritmos de programação inteira (branch-and-bound).

Nesse capítulo será feita uma descrição da problemática e das hipóteses consideradas no âmbito dessa tese. Em seguida, são descritos o modelo matemático e as heurísticas aqui desenvolvidas.

4.1. PROBLEMA E HIPÓTESES CONSIDERADAS

Considere uma rede $\{\mathbf{A}, \mathbf{L}, \mathbf{P}\}$ onde $|\mathbf{A}|$ áreas operacionais são interconectadas por $|\mathbf{L}|$ dutos e que transporta $|\mathbf{P}|$ tipos de derivados de petróleo. Considere ainda que cada área operacional s ($s \in \mathbf{A}$), produz uma quantidade $Qp_{s,p,t}$ do produto p ($p \in \mathbf{P}$) no tempo t ($t = 1, 2, \dots, T$) e demanda uma quantidade $Qd_{s,p,t}$ do produto p ($p \in \mathbf{P}$) no tempo t ($t = 1, 2, \dots, T$). O problema de programação da rede de dutos consiste em indicar, ao longo de um horizonte de planejamento T , quais produtos devem ser enviados e recebidos de/em cada área operacional, quais produtos estarão em cada trecho de cada duto, bem como suas respectivas quantidades. A solução deve atender as demandas de cada área, respeitar as diversas restrições operacionais e minimizar o custo total incluindo os custos de bombeamento e os custos relacionados à ocorrência de interfaces.

As interfaces ocorrem quando se enviam sequencialmente duas bateladas (uma após a outra) de produtos distintos. Elas decorrem da inexistência de separação física entre cada batelada e implicam que uma certa quantidade de produtos irá se misturar resultando em contaminação entre eles. Na Figura 4.1, a interface é destacada em negrito e ocorre devido ao envio de uma batelada de produto 1 no tempo t , quando o duto estava preenchido com o produto 2. A existência de interfaces em dutos se traduz em custos para a empresa petrolífera. Estes custos podem ser devidos ao envio do produto contaminado para unidades de tratamento, ao uso de produtos de densidades intermediárias entre as bateladas (selos) ou ainda a caracterização do produto como um produto de qualidade inferior, que neste caso, possui um custo associado à perda de margem neste processo denominado de *downgrade*. Neste trabalho, os custos de interface foram tratados de maneira indireta nos experimentos

onde estes custos foram considerados, pois se optou por minimizar o número total de interfaces ao longo da rede, que foi ponderado adequadamente para que essa parcela não fosse desprezível em relação à parcela referente aos custos de bombeamento.

Figura 4.1: Exemplo de geração de interfaces em um duto

	Produto a enviado no período (t)	Produto no primeiro trecho do duto no período (t-1)
duto (X→Y)	Produto – 1	Produto – 2

Para caracterizar adequadamente o problema, diversas considerações precisam ser feitas, tanto do ponto de vista da captura das condições reais em que as operações são realizadas na rede de dutos, quanto da representação abstrata destas operações. Para facilitar a descrição destas hipóteses chamamos de operacionais as primeiras e de modelagem as demais. Estas hipóteses se baseiam naquelas descritas por Alves (2007) e são detalhadas a seguir.

4.1 Hipóteses Operacionais

Chamamos de hipóteses operacionais aquelas que estão ligadas à operação real da rede de dutos. Elas usualmente são simplificações que podem ou não ser respeitadas na operação real do duto. São elas:

(i) os fluidos bombeados (produtos) são incompressíveis, os dutos operam pressurizados e estão sempre completamente preenchidos. Além disto, não são consideradas operações de pulmão e injeção. A consequência destas hipóteses operacionais é que a cada quantidade de produto inserida na rede em um determinado intervalo de tempo corresponde exatamente a mesma quantidade de produto saindo da rede no mesmo intervalo de tempo. Operações pulmão e de injeção são eventualmente realizadas na operação real de uma rede de dutos, mas sua inclusão torna o problema mais complexo, fugindo ao escopo do presente trabalho.

(ii) as vazões (volume transportado por unidade de tempo) e o custo unitário de bombeio são conhecidos, constantes e independentes. A consideração de vazões variáveis e de custos relacionados a estas vazões torna o problema não linear e sobremaneira mais complexo. Esta consideração seria mais importante no projeto da rede, onde o dimensionamento das bombas e dos diâmetros dos dutos é fortemente afetado pela não linearidade. No presente trabalho, de programação de uma rede de dutos já instalada, os regimes de operação variam pouco em torno do ponto projetado e, por conseguinte a suposição de linearidade pode ser considerada razoável. Além disto, na modelagem do

problema se optou por considerar os custos de bombeio independentes do produto a ser bombeado. Esta é uma condição facilmente modificável no modelo, mas optamos por esta alternativa devido a dificuldade de encontrar parâmetros de custo adequados para as instâncias de teste. Levando adicionalmente em conta que, via de regra, as redes de dutos são separadas por grandes classes de produtos, redes de claros para produtos de densidade menor e rede de escuros para produtos de maior densidade, esta é uma suposição razoavelmente bem amparada na realidade.

(iii) não são considerados custos de estoques; além disso, em cada área operacional o recebimento de produto é feito através de um conjunto de tanques, designados especialmente para essa finalidade e separados por tipo de produto a ser recebido. Neste trabalho, não se modela cada tanque separadamente, mas sim se optou por substituir esse conjunto de tanques por um conjunto menor de tanques, um para cada produto, com a mesma capacidade de armazenamento, denominada tancagem agregada, por produto. É assumido que os produtos estão prontos para serem transportados, ou seja, não são consideradas misturas em tanque ou em duto para obtê-los.

(iv) todas as áreas operacionais pertencentes à rede de dutos possuem valores conhecidos e determinísticos de demanda e produção para cada produto, em cada período de tempo do horizonte de planejamento. A demanda de um determinado produto em uma área específica é atendida pelo envio de produtos a partir de refinarias ou de outras áreas operacionais que possuem esse produto em estoque. Dessa forma, a produção de uma refinaria, em um determinado intervalo de tempo, pode ter um (ou alguns) dos seguintes destinos: estoque, atendimento do mercado consumidor local, atendimento da demanda de outras áreas operacionais.

(v) os dutos podem operar apenas em um único sentido. Reversão do sentido de um duto envolve diversas operações de abertura e fechamento de válvulas, assim como realinhamentos de fluxo. Normalmente estas operações são evitadas tanto por sua complexidade operacional, quanto pelo aumento das possibilidades de falhas durante a operação. Permitir esta reversão também aumenta a complexidade de modelagem do problema.

(vi) os dutos estão operacionais durante todo o horizonte de planejamento. Esta é uma suposição razoável dentro de um horizonte de planejamento de curto prazo. Uma situação de parada de um trecho de dutos pode ser estudada com uma nova programação, em que esta condição é estabelecida na configuração inicial na rede dutoviária. A modelagem dinâmica desta condição aumentaria muito o porte do modelo, além de só fazer sentido em um

ambiente estocástico onde a uma falha de um trecho estaria associada uma distribuição de probabilidade. Claramente esta abordagem foge ao escopo do presente trabalho.

(vii) a configuração inicial da rede dutoviária é conhecida. Isto é, são conhecidos os estoques de cada produto em cada local e os produtos em cada trecho de duto no instante inicial.

4.1.2 Hipóteses de modelagem

Chamamos de hipóteses de modelagem aquelas que foram usadas para modelar matematicamente o problema e que não estão ligadas diretamente as operações de transferência. Elas dizem respeito essencialmente a forma como o tempo e os volumes foram tratados, nessa abordagem de forma discretizada.

(i) o horizonte de tempo foi discretizado em períodos de tempo de igual duração. Esta hipótese, em conjunto com a hipótese de vazões constantes, impõe que os volumes transportados em cada duto seja um múltiplo inteiro (o número de períodos de tempo em que houve bombeamento de produtos) da vazão.

(ii) para consistência do modelo, os volumes dos dutos também precisam ser discretizados. Cada duto foi dividido em um conjunto de trechos de igual volume, denominado de lote. O volume de cada lote é dado por um múltiplo inteiro do volume de produto que pode ser transportado naquele duto na unidade de tempo. A suposição de um número inteiro de trechos conjuntamente com o volume fixo dos lotes e um horizonte de planejamento finito impõe a necessidade de ajustes nos volumes originais dos dutos. O exemplo a seguir ilustra esta afirmação.

Considere um duto que conecte as áreas X e Y , cujo volume seja de 3400 m^3 e ainda que produtos sejam bombeados por ele a uma vazão constante de $600 \text{ m}^3 / \text{h}$. Suponha ainda que a unidade de discretização do horizonte de planejamento seja de duas horas. Assim ao longo desse tempo seria possível transportar 1200 m^3 . Desta forma, o duto seria dividido em $2,83$ ($3400\text{m}^3 / 1200\text{m}^3$) trechos. Como é necessário que o número de trechos seja inteiro, esse valor é arredondado para 3 e o volume do duto é aumentado para 3600 m^3 , conforme se visualiza na Figura 4.2. Generalizando este procedimento, considerando C o volume original do duto em metros cúbicos, v a vazão do duto em metros cúbicos por hora e w a unidade de discretização do horizonte de planejamento em horas, então a quantidade de trechos (q) e a

capacidade ajustada do duto (C') e são dados respectivamente por: $q = \left\lceil \frac{C}{v * w} \right\rceil$ e

$C' = q * v * w$, onde $\lceil x \rceil$ representa o teto do número x .

Estas hipóteses naturalmente simplificam muito o problema transformando um problema não linear em um problema inteiro. Naturalmente que um ajuste conveniente da unidade de tempo pode tornar o modelo tão próximo quanto se queira – um modelo com discretização em minutos, por exemplo, aproxima-se bastante do modelo contínuo real de operação. Entretanto, faz-se necessário considerar o *tradeoff* entre a acuracidade do modelo e a sua resolução em um tempo computacional aceitável.

Figura 4.2: Exemplo de discretização de um duto

duto (X→Y) real	Capacidade do duto: 3400 m ³		
	Vazão: 600 m ³ / h		
	Tamanho do horizonte de tempo: 2 h		
	Número de lotes: 2,83		
duto (X→Y) discretizado	Capacidade ajustada do duto: 3600 m ³		
	Vazão: 600 m ³ / h		
	Tamanho do horizonte de tempo: 2 h		
	Número ajustado de lotes: 3		
	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3
duto (X→Y) discretizado	Produto - 1 Volume do lote: 1200 m ³	Produto - 2 Volume do lote: 1200 m ³	Produto - 1 Volume do lote: 1200 m ³

4.2. MODELO ESQUEMÁTICO E NOTAÇÃO UTILIZADA

De forma esquemática o problema de programação de uma rede dutoviária multiprodutos pode ser definido como:

Dados:

Topologia da rede e sua configuração inicial, parâmetros de capacidade e custo.

Obter:

A programação das operações de transferência, isto é quando e onde uma batelada de cada produto deve ser enviada e recebida.

Com o Objetivo de

Minimizar os custos de bombeio e de interface (ou uma outra função objetivo de interesse).

Sujeito a:

- Restrições de balanço volumétrico;
- Restrições de envio, recebimento e deslocamento de produtos no duto;
- Restrições de interface;
- Restrições de produtos nos trechos;
- Restrições de domínio das variáveis;
- Restrições extras (inseridas a critério do gestor)

Segue a notação completa utilizada para a definição do modelo.

Conjuntos e índices	Descrição
$s, r, s' \in A$	Conjunto de áreas operacionais (locais)
$(s, r) \in L$	Conjunto de dutos
$l \in L_{s,r}$	Conjunto de trechos (lotes) em que é dividido o duto (s,r) com origem em s e destino em r
$p, p' \in P$	Conjunto de produtos
$t = 1, 2, \dots, T$	Intervalos de tempo, horizonte de planejamento
Θ	Conjunto de horários de pico
$\Omega_{s,r}$	Conjunto dos períodos de tempo na qual o duto (s,r) permanecerá inoperante devido a manutenção programada

Parâmetros	Descrição
$ A $	Número de áreas operacionais (locais)
$ P $	Número de produtos
L_{max}	Número de lotes que compõem o maior duto
T	Horizonte de planejamento
M_1, M_2	Números suficientemente grandes (BIG-M)
W_Q	Peso do critério de otimização relativo ao volume de produto bombeado
W_I	Peso do critério de otimização relativo ao número de interfaces
W_{HP}	Peso associado ao critério de otimização relativo ao envio no horário de pico
W_{STO}	Peso associado ao critério de otimização relativo ao existência de paradas nos dutos
$KL_{s,r} = L_{s,r} $	Número de lotes (trechos) que contém o duto (s,r)
$QL_{s,r}$	Volume (em m ³) dos lotes do duto (s,r)
$Qp_{s,p,t}$	Volume (em m ³) de produção do produto p no local s , no tempo t
$Qd_{s,p,t}$	Volume (em m ³) demandado do produto p no local s no tempo t
$Qmin_{s,p}$	Volume (em m ³) mínimo do produto p que deve ser estocado no local s
$Qmax_{s,p}$	Volume (em m ³) máximo do produto p que pode ser estocado no local s

$TX_{s,r}$	Taxa mínima de envio de bateladas no duto (s,r)
$Mbat_{s,r,p}$	Quantidade mínima de bateladas do produto p a serem enviadas no duto (s,r) em caso de bombeamento

Cond. Iniciais	Descrição (parâmetros binários)
$XL_{s,r} = 1$	Se existe o duto (s,r)
$Xp_{s,r,l,p} = 1$	Se o trecho l do duto (s,r) contém produto p no instante inicial
$Mpr_{s,r} = 1$	Se existe manutenção programada no duto (s,r)

Cond. Iniciais	Descrição (parâmetros contínuos)
$Qi_{s,p,0}$	Volume (em m^3) em estoque no local s do produto p , no tempo 0 (estoque inicial)

Variáveis Binárias	Descrição
$Xr_{s,r,p,t} = 1$	Se o local r recebe o produto p , vindo do local s , no tempo t
$Xs_{s,r,p,t} = 1$	Se o local s envia o produto p , para o local r , no tempo t
$Xc_{s,r,p,p',t} = 1$	Se há contaminação devido a interface entre os produtos p e p' , no duto (s,r) , no tempo t
$Xp_{s,r,l,p,t} = 1$	Se o trecho l do duto (s,r) contém produto p no tempo t
$Xsto_{s,r,t} = 1$	Se existe uma parada no duto (s,r) no tempo t
$Xdir_{s,r} = 1$	Se o duto (s,r) opera nesse sentido $(s \rightarrow r)$ durante o horizonte de programação
$Xsmin_{s,r,p} = 1$	Se o duto (s,r) envia uma quantidade mínima de bateladas do produto p
$Xscons_{s,r,p} = 1$	Se o duto (s,r) envia uma quantidade mínima de bateladas consecutivas de produto p
$Xb_{s,r,p,t}$	Grupo de variáveis auxiliares usadas na modelagem do bombeamento consecutivo de produtos

Variáveis Contínuas	Descrição
$Qi_{s,p,t}$	Volume (em m^3) em estoque no local s do produto p , no tempo t
$\sigma qi_{s,p,t}$	Volume (em m^3) acumulado (recebido menos enviado) no local s , do produto p , entre o tempo 1 e tempo t

O índice l referente aos trechos de um determinado duto assume valor “1” para trecho mais próximo da origem e o valor igual a $KL_{s,r}$ para o trecho mais próximo do destino. Dada a complexidade do modelo um cuidado prévio deve ser tomado para tornar o modelo o mais enxuto possível. Desta forma, antes da execução do modelo é conveniente um pré-processamento garantindo que as variáveis e restrições somente sejam criadas:

- a) quando existe o duto em questão: $XL_{s,r}=1$;
- b) de acordo com a quantidade máxima de trechos do duto: $l \leq KL_{s,r}$ e;
- c) se os locais de origem e destino podem armazenar o produto em questão: $Q_{max_{s,p}} > 0$.

4.3. FUNÇÃO OBJETIVO

A equação (4.0) contabiliza as quatro principais parcelas que compõem a função objetivo do problema. Elas se referem, respectivamente, ao bombeamento, à interface, ao envio no horário de pico e à existência de paradas no duto. As equações (4.1) a (4.1h), apresentadas em seguida, são particularizações dessa função genérica e visam estudar o comportamento do modelo em situações particulares mais próximas da realidade, as quais são objetos de experimentação apresentados no capítulo 5.

$$\begin{aligned}
 MinTC = & W_Q \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t=1..T} QL_{s,r} X_{S_{s,r,p,t}} + W_I \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{t=1..T} X_{C_{s,r,p,p',t}} + \\
 & W_{HP} \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t \in \Theta} QL_{s,r} X_{S_{s,r,p,t}} + W_{STO} \sum_{(s,r) \in L} \sum_{t=1..T} X_{sto_{s,r,t}}
 \end{aligned} \tag{4.0}$$

A principal função objetivo utilizada é minimizar os custos relacionados ao bombeamento e a existência de interfaces. Uma vez que os custos ligados ao bombeamento são proporcionais aos volumes bombeados e os custos ligados a existência de interfaces são proporcionais ao número de ocorrências delas, é necessário utilizar ponderadores adequados para ajustar a diferença de grandeza entre estas duas parcelas da função objetivo (4.1). A primeira parcela se refere ao volume total de produto bombeado, o qual é dado pela soma dos volumes enviados em cada duto. O segundo termo calcula a quantidade total de interfaces.

$$MinTC = W_Q \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t=1..T} QL_{s,r} X_{S_{s,r,p,t}} + W_I \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{t=1..T} X_{C_{s,r,p,p',t}} \tag{4.1}$$

A função objetivo (4.1b) considera uma penalização pelo envio de produtos no horário de pico, o qual é modelado como uma parcela adicional de custo na função objetivo anterior proporcional ao volume bombeado nesse horário diferenciado. Sempre que houver um envio de produto nesse horário será contabilizado um aumento percentual de W_{HP} vezes essa parcela da função objetivo.

$$\begin{aligned}
MinTC = & W_Q \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t=1,..,T} QL_{s,t} X_{S_{s,r,p,t}} + W_I \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{t=1,..,T} X_{C_{s,r,p,p',t}} + \\
& W_{HP} \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t \in \Theta} QL_{s,t} X_{S_{s,r,p,t}}
\end{aligned} \tag{4.1b}$$

A equação (4.1c) exibe mais uma alternativa possível para a função objetivo. Nesse caso considera-se a inclusão de uma parcela adicional na função objetivo, a qual contabiliza penalizações em função da quantidade de paradas nos dutos. O uso dessa função objetivo implica obrigatoriamente na inclusão de um grupo particular de restrições (4.15 a 4.17) que será apresentado posteriormente.

$$\begin{aligned}
MinTC = & W_Q \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t=1,..,T} QL_{s,t} X_{S_{s,r,p,t}} + W_I \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{t=1,..,T} X_{C_{s,r,p,p',t}} + \\
& W_{STO} \sum_{(s,r) \in L} \sum_{t=1,..,T} X_{sto_{s,r,t}}
\end{aligned} \tag{4.1c}$$

A equação (4.1d) considera-se a minimização da quantidade total bombeada e da quantidade bombeado no horário de pico

$$MinTC = W_Q \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t=1,..,T} QL_{s,t} X_{S_{s,r,p,t}} + W_{HP} \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t \in \Theta} QL_{s,t} X_{S_{s,r,p,t}} \tag{4.1d}$$

As equações (4.1e) e (4.1f) consideram respectivamente a minimização e maximização estrita da quantidade total bombeada.

$$MinTC = W_Q \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t=1,..,T} QL_{s,t} X_{S_{s,r,p,t}} \tag{4.1e}$$

$$MaxTC = W_Q \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t=1,..,T} QL_{s,t} X_{S_{s,r,p,t}} \tag{4.1f}$$

As equações (4.1g) e (4.1h) consideram respectivamente a minimização estrita da quantidade total de interfaces e da quantidade de bombeamentos no horário de pico.

$$MinTC = W_I \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{t=1,..,T} X_{C_{s,r,p,p',t}} \tag{4.1g}$$

$$MinTC = W_{HP} \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t \in \Theta} QL_{s,t} X_{S_{s,r,p,t}} \tag{4.1h}$$

4.4. RESTRIÇÕES DE BALANÇO VOLUMÉTRICO

As restrições (4.2) asseguram que em cada instante de tempo, em cada local e para cada produto o volume estocado é igual ao volume estocado no período anterior adicionado aos volumes recebidos e produzidos e descontado os volumes enviados e consumidos (demandados). Além disso, as restrições (4.3) asseguram que os níveis de estoque estejam dentro de limites mínimos e máximos pré-estabelecidos.

$$Qi_{s,p,t} = Qi_{s,p,t-1} + Qp_{s,p,t} - Qd_{s,p,t} + \sum_{r \in A} QL_{r,s} Xr_{r,s,p,t} - \sum_{r \in A} QL_{s,r} Xs_{s,r,p,t} \quad (4.2)$$

$$\forall s \in A, p \in P, t = 1, 2, \dots, T$$

$$Qmin_{s,p} \leq Qi_{s,p,t} \leq Qmax_{s,p} \quad \forall s \in A, p \in P, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.3)$$

Esta é uma formulação natural, proposta por Pereira (2008), para as restrições de balanço volumétrico, mas, uma vez que o custo de estocagem não é considerado na função objetivo, esta formulação pode ser consideravelmente melhorada para fazer uso da estrutura do problema, usando restrições da mochila encadeadas (*knapsack cascading*), como feito em Rocha *et al.* (2011). Para tanto observe que as variáveis contínuas do problema são as variáveis $Qi_{s,p,t}$. Essas variáveis só figuram nas restrições (4.2) e (4.3). Como as restrições (4.2) são de igualdade, é possível substituí-las diretamente nas restrições (4.3). O novo modelo inteiro obtido (restrições 4.3a e 4.3b) elimina as variáveis $Qi_{s,p,t}$ e reduz o número de restrições.

$$\sum_{\tau=1,t} \sum_{r \in A} QL_{r,s} Xr_{r,s,p,\tau} - \sum_{\tau=1,t} \sum_{r \in A} QL_{s,r} Xs_{s,r,p,\tau} \geq Qmin_{s,p} - Qi_{p,s,0} - \sum_{\tau=1,t} Qp_{s,p,\tau} + \sum_{\tau=1,t} Qd_{s,p,\tau} \quad (4.3a)$$

$$\forall s \in A, p \in P, t = 1, 2, \dots, T$$

$$\sum_{\tau=1,t} \sum_{r \in A} QL_{r,s} Xr_{r,s,p,\tau} - \sum_{\tau=1,t} \sum_{r \in A} QL_{s,r} Xs_{s,r,p,\tau} \leq Qmax_{s,p} - Qi_{p,s,0} - \sum_{\tau=1,t} Qp_{s,p,\tau} + \sum_{\tau=1,t} Qd_{s,p,\tau} \quad (4.3b)$$

$$\forall s \in A, p \in P, t = 1, 2, \dots, T$$

Alternativamente, após a constatação de que o lado esquerdo das restrições (4.3a) e (4.3b) é o volume acumulado (recebido menos enviado) no local s , do produto p , entre o tempo 1 e tempo t ($\sigma qi_{s,p,t}$) pode-se obter as equações (4.2a).

$$\sigma qi_{s,p,t} = \sum_{\tau=1,t} \sum_{r \in A} QL_{r,s} Xr_{r,s,p,\tau} - \sum_{\tau=1,t} \sum_{r \in A} QL_{s,r} Xs_{s,r,p,\tau} \quad \forall s \in A, p \in P, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.2a)$$

Substituindo-se as equações (4.2a) em (4.3a) e (4.3b) obtém-se as restrições (4.3c) e (4.3d).

$$\sigma qi_{s,p,t} \geq Q_{\min_{s,p}} - Qi_{s,p,0} - \sum_{\tau=1,t} Qp_{s,p,\tau} + \sum_{\tau=1,t} Qd_{s,p,\tau} \quad \forall s \in A, p \in P, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.3c)$$

$$\sigma qi_{s,p,t} \leq Q_{\max_{s,p}} - Qi_{s,p,0} - \sum_{\tau=1,t} Qp_{s,p,\tau} + \sum_{\tau=1,t} Qd_{s,p,\tau} \quad \forall s \in A, p \in P, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.3d)$$

Observe que as restrições (4.3a) e (4.3b) são restrições de mochila com uma estrutura encadeada no tempo, uma vez que o lado esquerdo da restrição no tempo $t+1$ é igual ao lado esquerdo da restrição no tempo t acrescido dos termos relativos as variáveis $Xr_{s,r,p,t+1}$ e $Xs_{s,r,p,t+1}$. Como ressaltado por Rocha *et. al.* (2011) e também constatado nos experimentos computacionais relatados nesta tese, esta formulação geralmente acelera o desempenho dos *solvers* comerciais para PLIM .

4.5. RESTRIÇÕES DE ENVIO, RECEBIMENTO E DESLOCAMENTO DE PRODUTOS NO DUTO

As restrições (4.4) garantem que será enviado no máximo um produto p em cada intervalo de tempo t pelo duto (s,r) . As restrições (4.5) garantem que o produto bombeado p é àquele contido no primeiro trecho do duto ($l=1$), ou seja, o que está sendo enviado está entrando no início do duto. As restrições (4.6) afirmam que cada trecho l do duto (s,r) contém apenas um tipo de produto p , em cada intervalo de tempo t .

$$\sum_{p \in P} Xs_{s,r,p,t} \leq 1 \quad \forall (s,r) \in L, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.4)$$

$$Xp_{s,r,1,p,t} \geq Xs_{s,r,p,t} \quad \forall (s,r) \in L, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.5)$$

$$\sum_{p \in P} Xp_{s,r,l,p,t} = 1 \quad \forall (s,r) \in L, l \in L_{sr}, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.6)$$

O deslocamento dos lotes dentro do duto é modelado pelas equações (4.7). Estas restrições garantem que se o duto está em operação, isto é, se $\sum_{p \in P} Xs_{s,r,p,t} = 1$, os lotes são deslocados. Neste caso, os produtos contidos do primeiro ao penúltimo trecho são deslocados

para o trecho seguinte. No exemplo apresentado na Figura 4.3, que considera um duto discretizado em quatro trechos, após o envio de produto 3, os produtos contidos nos trechos 1, 2, e 3 são deslocados respectivamente para os trechos 2, 3 e 4. Ressalta-se que o deslocamento dos lotes de produtos contidos do primeiro trecho ($l = 1$) é dado pela restrição (4.5).

Figura 4.3: Deslocamento de produtos em um duto discretizado em quatro trechos

Tempo	Trecho 1 (produto bombeado no duto)	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4
t	Produto - 1	Produto - 2	Produto - 1	Produto - 1
$t + I$	Produto - 3	Produto - 1	Produto - 2	Produto - 1

$$Xp_{s,r,l,p,t} - \sum_{p \in P} Xs_{s,r,p,t} \geq Xp_{s,r,l-1,p,t-1} - 1 \quad \forall (s,r) \in L, l = 2, \dots | L_{s,r} |, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.7)$$

As restrições (4.8) asseguram que quando o duto está em operação, o lote que estava, no tempo $t-1$, contido no último trecho deve ser recebido, no tempo t , no destino r . Por sua vez, a restrição (4.9) garante que só há recebimento, se o duto estiver em operação e que é possível receber no máximo um produto (um lote) em cada intervalo de tempo.

$$Xr_{s,r,p,t} - \sum_{p \in P} Xs_{s,r,p,t} \geq Xp_{s,r,KL_{s,r},p,t-1} - 1 \quad \forall (s,r) \in L, p \in P, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.8)$$

$$\sum_{p \in P} Xr_{s,r,p,t} = \sum_{p \in P} Xs_{s,r,p,t} \quad \forall (s,r) \in L, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.9)$$

Nos intervalos em que o duto não está em operação, isto é quando não há bombeamento, os lotes devem permanecer parados dentro do duto, o que é dado pelas restrições (4.10).

$$Xp_{s,r,l,p,t} + \sum_{p \in P} Xs_{s,r,p,t} \geq Xp_{s,r,l,p,t-1} \quad \forall (s,r) \in L, l \in L_{s,r}, p \in P, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.10)$$

4.6. RESTRIÇÕES DE INTERFACE

As restrições de interface são dadas pelas restrições (4.11). Essas restrições não lineares detectam o contato entre dois produtos distintos dentro do duto $p \neq p'$, sempre que for bombeado um produto p' diferente daquele que estava contido no primeiro trecho do duto p . Além disso, quando existe uma interface, em um dado tempo t , entre os produtos p e p' então

necessariamente o produto p deve ocupar o primeiro trecho do duto no período anterior e o produto enviado no tempo t deve ser p' .

$$Xc_{s,r,p,p',t} = Xp_{s,r,l,p,t-1} Xs_{s,r,p',t} \quad \forall (s,r) \in L, l=1, p, p' \in P, p \neq p', t=1,2,\dots,T \quad (4.11)$$

Como se trata de um produto de variáveis binárias, a linearização dessas restrições de interface é feita substituindo as restrições (4.11) pelas restrições (4.11a), (4.11b), (4.11c).

$$Xc_{s,r,p,p',t} - Xp_{s,r,l,p,t-1} - Xs_{s,r,p',t} \geq -1 \quad \forall (s,r) \in L, l=1, p, p' \in P, p \neq p', t=1,2,\dots,T \quad (4.11a)$$

$$-Xc_{s,r,p,p',t} + Xp_{s,r,l,p,t-1} \geq 0 \quad \forall (s,r) \in L, l=1, p, p' \in P, p \neq p', t=1,2,\dots,T \quad (4.11b)$$

$$-Xc_{s,r,p,p',t} + Xs_{s,r,p',t} \geq 0 \quad \forall (s,r) \in L, p, p' \in P, p \neq p', t=1,2,\dots,T \quad (4.11c)$$

Se $Xp_{s,r,l,p,t-1}$ ou $Xs_{s,r,p',t}$ valerem zero, então $Xc_{s,r,p,p',t}$ pode valer zero ou “1”. Como a função objetivo do problema minimiza o número de interfaces, então na solução ótima a variável $Xc_{s,r,p,p',t}$ assumirá o valor zero. Desta forma, as restrições (4.11b), (4.11c) são desnecessárias e sua retirada reduz o porte do modelo matemático. Isso fez com que neste trabalho a quantidade de restrições fosse reduzida em 22%.

4.7. RESTRIÇÕES DE PRODUTOS NOS TRECHOS

Neste grupo de restrições (4.12), sempre que existir, num determinado período, um produto em um determinado trecho de um duto, então necessariamente esse mesmo produto deve estar no trecho anterior do duto, no período anterior. Como consequência, evita-se a formação de uma interface no duto em um determinado tempo t e em seguida deixar esse duto sem bombear nenhum produto.

$$-Xp_{s,r,l,p,t} + Xp_{s,r,l-1,p,t-1} \geq 0 \quad \forall (s,r) \in L, l > 2, p \in P, t=2,\dots,T \quad (4.12)$$

Esta situação é ilustrada na Figura 4.4, onde o produto 1 foi bombeado no instante t e em função do contato com o produto contido no duto no instante anterior (produto 2) gerou-se uma interface entre estes produtos (a qual é destacada em negrito). No tempo subsequente ($t+1$), nenhum produto foi bombeado no duto o qual manteve sua configuração anterior.

Supondo que não haja violação dos estoques – caso em que a solução obtida seria inviável, esta interface desnecessária seria evitada se no lugar do produto 1, fosse enviado produto 2.

Figura 4.4: Geração de interface seguida de ociosidade no duto

Tempo	Trecho 1 (produto bombeado no duto)	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4
t	Produto - 1	Produto - 2	Produto - 1	Produto - 1
$t + 1$	Produto - 1	Produto - 2	Produto - 1	Produto - 1

4.8. MODELAGEM DE SITUAÇÕES ESPECÍFICAS

Nesta seção são apresentadas um conjunto de situações que não foram contempladas no trabalho de trabalho de Alves (2007) e nem no de Pereira (2008). Elas podem ser adicionadas ao modelo matemático a critério do tomador de decisão.

4.8 Escolha dos sentidos dos dutos

Caso os dutos não possuam seus sentidos de operação fixados ou definidos *a priori* pelo tomador de decisão, uma possibilidade seria considerar a inserção de variáveis binárias adicionais indicando o sentido de operação de cada duto ($Xdir_{s,r}$). Neste caso, as restrições (4.7), (4.8), (4.10) e (4.11) devem ser alteradas para que elas sejam válidas caso o sentido de normal de operação do duto seja escolhido ou o sentido reverso. Essas alterações são descritas nas equações (4.7s), (4.8s), (4.10s) e (4.11s).

$$Xp_{s,r,l,p,t} - \sum_{p \in P} Xs_{s,r,p,t} \geq Xp_{s,r,l-1,p,t-1} + Xdir_{s,r} - 2 \quad \forall (s,r) \in L, l = 2, \dots, |L_{s,r}|, t = 1 \quad (4.7s)$$

$$Xr_{s,r,p,t} - \sum_{p \in P} Xs_{s,r,p,t} \geq Xp_{s,r,KL_{s,r},p,t-1} + Xdir_{s,r} - 2 \quad \forall (s,r) \in L, p \in P, t = 1 \quad (4.8s)$$

$$Xp_{s,r,l,p,t} + \sum_{p \in P} Xs_{s,r,p,t} \geq Xp_{s,r,l,p,t-1} + Xdir_{s,r} - 1 \quad \forall (s,r) \in L, l \in L_{s,r}, p \in P, t = 1 \quad (4.10s)$$

$$Xc_{s,r,p,p',t} - Xp_{s,r,l,p,t-1} - Xs_{s,r,p',t} \geq Xdir_{s,r} - 2 \quad \forall (s,r) \in L, l = 1, p, p' \in P, p \neq p', t = 1 \quad (4.11s)$$

Além disso, devem ser inseridos dois grupos adicionais de restrições. A restrição (4.13) garante que apenas um sentido deve ser escolhido enquanto a restrição (4.14) assegura que se ocorre envio de produto em um determinado sentido, então o sentido reverso não pode ser utilizado.

$$Xdir_{s,r} + Xdir_{r,s} = 1 \quad \forall (s,r) \in L \quad (4.13)$$

$$Xdir_{s,r} - Xs_{s,r,p,t} \geq 0 \quad \forall (s,r) \in L, p \in P, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.14)$$

4.8 Penalização no número de paradas nos dutos

Considera-se que há uma parada no duto quando, em determinado período de tempo existe o bombeamento de um lote de produto, e no período seguinte não há nenhum bombeamento. O não bombeamento de produto no primeiro período de tempo não é contabilizado como parada. Na Figura 4.5 tem-se um exemplo de um duto onde foram realizadas duas paradas, a primeira delas no quarto período de tempo e a outra no sexto período.

Figura 4.5: Exemplo de produtos enviados em um duto discretizado em um horizonte de planejamento de 7 períodos de tempo

	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6	Período 7
duto (X→Y) discretizado	Não houve envio	Produto - 2	Produto - 2	Não houve envio	Produto - 1	Não houve envio	Produto - 1

Para modelar essa situação devem ser inseridas no modelo as restrições (4.15), (4.16) e (4.17). As restrições (4.15) indicam que sempre que houver bombeamento em um dado período e não houver bombeamento no período subsequente então deve ser contabilizada uma parada. As restrições (4.16) asseguram que só existe parada se em um tempo k se houver bombeamento no período anterior ($k-1$). Similarmente, em (4.17) garante-se que só existe parada no tempo k se não houver bombeamento no período. A inserção dessas restrições no modelo implica que se use uma função objetivo que penalize a quantidade de paradas nos dutos, que é dada na equação (4.1c). Observe-e que as restrições (4.16) e (4.17) não precisam ser inseridas, pois serão redundantes se a função objetivo penalizar o número de paradas, argumento esse que é análogo ao realizado anteriormente em relação a minimização do número de interfaces.

$$Xsto_{(s,r,t)} - \sum_{p \in P} Xs_{(s,r,p,t-1)} + \sum_{p \in P} Xs_{(s,r,p,t)} \geq 0 \quad \forall (s,r) \in L, t > 1 \quad (4.15)$$

$$-Xsto_{(s,r,t)} + \sum_{p \in P} Xs_{(s,r,p,t-1)} \geq 0 \quad \forall (s,r) \in L, t > 1 \quad (4.16)$$

$$-Xsto_{(s,r,t)} - \sum_{p \in P} Xs_{(s,r,p,t)} \geq -1, \quad \forall (s,r) \in L, t > 1 \quad (4.17)$$

4.8.3 Existência de manutenções programadas

Ao longo do horizonte de programação pode ser necessário paralisar as operações, em um duto, ou em um nó da rede, por um determinado período de tempo. Se um determinado nó j estiver inoperante, então todos os dutos da rede que possuam uma extremidade em j também devem ficar inoperantes. Na Figura 4.6 exibe-se um exemplo de duto com um período de manutenção programada iniciando no período 4 e terminado no período 7. Nesse período não há, obrigatoriamente, bombeamento de nenhum produto.

Figura 4.6: Exemplo de produtos enviados em um duto discretizado com manutenção programada

	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6	Período 7
duto ($X \rightarrow Y$) discretizado	Não houve envio	Produto - 2	Produto - 2	Período de Manutenção Programada			
(continuação)	Período 8	Período 9	Período 10	Período 11	Período 12	Período 13	Período 14
duto ($X \rightarrow Y$) discretizado	Produto - 2	Produto - 2	Produto - 2	Produto - 1	Produto - 1	Não houve envio	Produto - 1

A existência de restrições de períodos de manutenção programada nos dutos é dada pelas equações (4.18) e (4.19).

$$\sum_{t \in \Omega_{(s,r)}} Xs_{(s,r,p,t)} = 0 \quad \forall (s,r) \in L, p \in P \mid Mpr_{(s,r)} = 1 \quad (4.18)$$

$$\sum_{t \in \Omega_{(s,r)}} Xr_{(s,r,p,t)} = 0 \quad \forall (s,r) \in L, p \in P \mid Mpr_{(s,r)} = 1 \quad (4.19)$$

4.8.4 Existência de restrições de envio e recebimento

Esse tipo de restrição, explicitado na equação (4.20), impede que ocorram o envio e recebimento simultâneo de um mesmo produto, em uma mesma área operacional. Considere uma área operacional A que pode receber produtos da área B e bombear produtos para as áreas C e D. Se por exemplo, a área A recebesse o produto 1 no período 2 oriundo do local B, então a restrição de envio e recebimento simultâneo não permite que nesse período a área A

envie o produto 1 para C nem para D nesse período de tempo. Similarmente, o envio do produto 1 pela área A no período 2, implica que B não poderá enviar esse produto para A no período 2.

$$Xr_{(s,r,p,t)} + \sum_{s' \in A} Xs_{(r,s',p,t)} \leq 1 \quad \forall (s,r) \in L, p \in P, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.20)$$

4.8.5 Existência de restrições pulmão

Esse tipo de restrição, explicitado na equação (4.21), ocorre quando um determinado produto é recebido em um determinado área operacional rede e deve ser bombeado no tempo subsequente para outra área operacional. Novamente, considere uma área operacional A que pode receber produtos da área B e bombear produtos para as áreas C e D. Se por exemplo, a área A recebesse o produto 1 no período 2 oriundo do local B, então essa restrição indica que nesse período de tempo deve-se bombear esse produto para a área C ou para a área D.

$$-Xr_{(s,r,p,t)} + \sum_{s' \in A} Xs_{(r,s',p,t+1)} \geq 0 \quad \forall (s,r) \in L, p \in P, t = 1, 2, \dots, T-1 \quad (4.21)$$

4.8.6 Existência de uma taxa mínima de bombeamento nos dutos

Esse tipo de restrição, explicitado na equação (4.22), modela o caso onde é exigida uma taxa mínima de envio de produtos em cada duto. Se em um determinado duto, por exemplo, essa taxa for 20% e o horizonte de planejamento de 48 horas, então esse duto, deve enviar no mínimo 10 bateladas de produtos. De uma maneira geral, se a taxa percentual for igual a x e se o horizonte de planejamento for de y horas, então esse duto deve enviar no mínimo $\lceil x * y \rceil$ bateladas de produtos.

$$\sum_p Xs_{(s,r,p,t)} \geq Tx_{(s,r)} * T \quad \forall (s,r) \in L, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.22)$$

4.8.7 Existência de um número mínimo de bateladas bombeadas se houver bombeamento

Na programação de dutos, pode não ser desejável o bombeamento de uma única batelada de um determinado produto. Isso implica, na prática, a possibilidade de ocorrência de duas situações distintas: na primeira delas o produto não é bombeado, na segunda situação deve ocorrer o bombeamento de uma quantidade mínima de bateladas ao longo do duto para que a operação seja viável economicamente. Essa situação é modelada nas equações (4.23) e

(4.24), as quais fazem uso de uma formulação BIG-M. Nesse caso, recomenda-se que o valor dos parâmetros M_1 e M_2 sejam suficientemente grandes para satisfazer as restrições. O valor a ser utilizado para M_1 pode ser igual ao horizonte de planejamento (T), pois esse valor equivale ao máximo de bateladas possíveis de serem enviadas. O valor de M_2 a ser utilizado pode ser igual ao valor mínimo da quantidade de bateladas (Mbat).

$$\sum_t X_{s(r,p,t)} \leq M_1 * X_{smin(s,r,p)} \quad \forall (s,r) \in L, p \in P \quad (4.23)$$

$$\sum_t X_{s(r,p,t)} \geq Mbat_{(s,r,p)} - M_2 * (1 - X_{smin(s,r,p)}) \quad \forall (s,r) \in L, p \in P \quad (4.24)$$

4.8.7 Existência de um número mínimo de bateladas consecutivas bombeadas se houver bombeamento

Outra possibilidade seria o envio de bateladas consecutivas de um mesmo produto. A modelagem dessa situação deve considerar três grupos distintos de restrições, as quais são descritas a seguir.

O primeiro grupo delas indica que se houver bombeamento do produto p no primeiro período ($t = 1$) então serão enviados $Mbat_{s,r,p} - 1$ bateladas de p nos períodos subsequentes. Essa restrição é exibida na equação (4.25).

$$X_{s,r,p,t'} - X_{s,r,p,1} \geq 0 \quad \forall (s,r) \in L, p \in P, t' = 2 \dots Mbat_{s,r,p} \quad (4.25)$$

A equação (4.26) modela o segundo grupo de restrições, nas situações onde não mais tempo suficiente para iniciar um bombeamento com o número mínimo de bateladas, isto é: se o produto p não é bombeado no período t' ($t' = T - Mbat_{s,r,p} + 1, \dots, T - 1$) então esse produto não deve ser bombeado nos t'' ($\forall t'' > t'$).

$$-X_{s,r,p,t'} + X_{s,r,p,t''} \leq 0 \quad \forall (s,r) \in L, p \in P, t' = T - Mbat_{s,r,p} + 1, \dots, T - 1, t'' > t' \quad (4.26)$$

Além disso, se existe bombeamento no tempo t e não existe bombeamento no tempo $t-1$, então nos $Mbat_{s,r,p} - 1$ períodos subsequentes serão enviadas bateladas consecutivas do

produto p . Usando operadores lógicos, pode-se descrever essa situação através da restrição (4.27a):

$$\left(X_{s,r,p,t} = 1 \right) \wedge \left(X_{s,r,p,t-1} = 0 \right) \Rightarrow \left(X_{s,r,p,t+1} = 1 \right) \vee \dots \vee \left(X_{s,r,p,t+Mbat_{s,r,p}-1} = 1 \right), \quad (4.27a)$$

$$\forall (s,r) \in L, p \in P, t = 2, \dots, T - Mbat_{s,r,p}$$

As restrições apresentadas em (4.27a) podem ser reescritas de modo a se obter um novo grupo de restrições (4.27b). Por conseguinte, as restrições do grupo (4.27b) podem ser linearizadas, conforme se visualiza nas restrições apresentadas em (4.28).

$$\left\{ \begin{array}{l} -2 * X_{s,r,p,t} + X_{s,r,p,t-1} \leq -2 \Rightarrow -X_{s,r,p,t+1} \leq -1 \\ -2 * X_{s,r,p,t} + X_{s,r,p,t-1} \leq -2 \Rightarrow -X_{s,r,p,t+2} \leq -1 \\ \dots \\ -2 * X_{s,r,p,t} + X_{s,r,p,t-1} \leq -2 \Rightarrow -X_{s,r,p,t+Mbat_{s,r,p}-1} \leq -1 \\ \forall (s,r) \in L, p \in P, t = 2, \dots, T - Mbat_{s,r,p} \end{array} \right. \quad (4.27b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -2 * X_{s,r,p,t} + X_{s,r,p,t-1} \leq -2 * Xb1_{s,r,p,t} \\ -X_{s,r,p,t+1} \leq -Xb1_{s,r,p,t} \\ -X_{s,r,p,t+2} \leq -Xb1_{s,r,p,t} \\ \dots \\ -X_{s,r,p,t+Mbat_{s,r,p}-1} \leq -Xb1_{s,r,p,t} \\ \forall (s,r) \in L, p \in P, t = 2, \dots, T - Mbat_{s,r,p} \end{array} \right. \quad (4.28)$$

4.9. RESTRIÇÕES DE DOMÍNIO DAS VARIÁVEIS

As restrições (4.35), (4.36), (4.37), (4.38), (4.39), (4.40), (4.41), (4.42), (4.43), (4.44) e (4.45) garantem que as variáveis em questão são binárias.

$$X_{r,s,r,p,t} \in \{0,1\} \quad \forall (s,r) \in L, p \in P, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.35)$$

$$X_{s,r,p,t} \in \{0,1\} \quad \forall (s,r) \in L, p \in P, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.36)$$

$$X_{c,s,r,p,p',t} \in \{0,1\} \quad \forall (s,r) \in L, p, p' \in P, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.37)$$

$$X_{p,s,r,l,p,t} \in \{0,1\} \quad \forall (s,r) \in L, l \in L_{s,r}, p \in P, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.38)$$

$$Xsto_{s,r,t} \in \{0,1\} \quad \forall (s,r) \in L, l \in L_{s,r}, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.39)$$

$$Xdir_{s,r} \in \{0,1\} \quad \forall (s,r) \in L \quad (4.40)$$

$$Xsmin_{s,r,p} \in \{0,1\} \quad \forall (s,r) \in L, p \in P \quad (4.41)$$

$$Xscons_{s,r,p} \in \{0,1\} \quad \forall (s,r) \in L, p \in P \quad (4.42)$$

$$Xb_{s,r,p,t} \in \{0,1\} \quad \forall (s,r) \in L, p \in P, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.43)$$

4.10. PROCEDIMENTO PARA GERAÇÃO DE LIMITES INFERIORES

Esse procedimento se baseia na obtenção de limites individuais para cada parcela que compõe a função objetivo do problema. Ele é dividido em duas partes, a primeira delas, denominada procedimento de envio, obtém um limitante inferior para o volume total bombeado e a segunda, denominada procedimento de interface, calcula um limitante inferior para o número total de interfaces. Além disso, foram propostas melhorias no cálculo desses limites, a partir de características inerentes a esse tipo de problema.

4.10.1 Procedimento de Envio

O procedimento de envio de produtos se fundamenta no fato de que o volume total enviado é maior ou igual a quantidade demandada (já incluída a produção do local) subtraída do volume inicial em estoque. Segue a notação completa utilizada para a definição do desse procedimento.

Conjuntos e índices	Descrição
$s \in A$	Conjunto de áreas operacionais (locais)
$p \in P$	Conjunto de produtos
$t = 1, 2, \dots, T$	Intervalos de tempo, horizonte de planejamento
Parâmetros	Descrição
$ A $	Número de áreas operacionais (locais)
$ P $	Número de produtos
T	Horizonte de planejamento
$Qd_{s,p,t}$	Volume demandado do produto p no local s no tempo t
$Qi_{s,p,0}$	Volume em estoque no local s do produto p , no tempo 0 (estoque inicial)
Variáveis	Descrição
$MQd_{s,p}$	Demanda agregada de produto p na base s .

$MDif_{s,p}$	Diferença entre estoque inicial e demanda agregada de produto p na base s .
$MQmin_{s,p}$	Volume mínimo necessário de produto p na base s .
δ	Limite inferior do volume total enviado

Esse algoritmo é descrito abaixo no Quadro 1.

Quadro 1: Procedimento de Envio

<p>Início Procedimento_de_Envio</p> <p>Para todo $s \in A, p \in P$ faça:</p> $MQd_{s,p} = \sum_{t=1}^T Qd_{s,p,t}$ $MDif_{s,p} = MQd_{s,p} - \sum_{t=1}^T Qi_{s,p,0}$ $MQmin_{s,p} = \max(0, MDif_{s,p}).$ <p>Fim-Para</p> <p>Retorne</p> $\delta = \sum_s \sum_p MQmin_{s,p}$ <p>Fim_Procedimento_de_Envio</p>

4.10.2 Procedimento de Interface

O procedimento de interface se baseia no fato de que a necessidade de envio de um produto diferente daquele que se encontra no primeiro trecho do duto implica necessariamente na existência de uma interface. Essa necessidade pode ser avaliada em função da demanda de cada produto em cada local, do estoque inicial e do estoque máximo de cada produto.

Esse procedimento se baseia no cálculo da quantidade $\varphi_{s,p}$, que contabiliza a quantidade disponível de produto p após o atendimento da demanda no local s . Se essa quantidade for maior que o estoque máximo de p no local s ($Qmax_{s,p}$), será necessário enviar uma quantidade de produto p para alguma outra área operacional, para que não se exceda o estoque máximo. Esse procedimento gerará pelo menos uma interface (interface de violação de estoque), se todos os dutos que possuem s como extremidade de origem contiverem um produto diferente de p em seu primeiro trecho. Por outro lado, se a quantidade $\varphi_{s,p}$ for menor do que zero, significa que a demanda de produto p é superior à quantidade disponível na área

operacional s , o que implica a necessidade de recebimento desse produto a partir de algum outro local, o que pode gerar interfaces (interfaces para atendimento da demanda). Na Figura 4.7 a área hipotética 1 possui $\varphi_{1,Y} > Q_{max_{1,Y}}$. Dessa forma, ela deve enviar produto Y para outra área operacional (área 2). Como o duto $1 \rightarrow 2$ possui produto X no primeiro trecho, haverá a formação de uma interface obrigatória. Por outro lado, temos que $\varphi_{1,Z} < 0$. Assim, a área 1 deve receber produto Z de outra base (área 3). Como o duto $3 \rightarrow 1$ possui produto X no primeiro trecho, novamente haverá a formação de uma interface obrigatória.

Figura 4.7: Aplicação do procedimento de interface em uma área hipotética (área 1)

	Produto X	Produto Y	Produto Z
$\varphi_{1,p}$	20	10	-15
$Q_{max_{1,p}}$	30	5	20
	Produto no primeiro trecho		
Duto $1 \rightarrow 2$	X		
Duto $3 \rightarrow 1$	X		

O funcionamento do procedimento de interface está atrelado, portanto, a contabilização de dois tipos de interfaces obrigatórias. Dessa forma, uma possível não contabilização de interfaces de violação significaria dizer que em alguma área operacional foi permitido que os níveis de estoque fossem maiores que o limite máximo – o que não poderia ocorrer, porque não atenderia as restrições (4.3a) e (4.3b) do modelo. De maneira similar, a não contabilização de interfaces relativas ao atendimento da demanda, implicaria no fato de que em alguma área operacional foi permitido o não atendimento da demanda – o que novamente não poderia acontecer, pois também não atenderia as restrições (4.3a) e (4.3b).

Segue a notação completa utilizada para a definição desse procedimento.

Conjuntos e índices	Descrição
$s \in A$	Conjunto de áreas operacionais (locais)
$A_p \subseteq A$	Subconjunto de áreas operacionais que demandam o produto p
$p \in P$	Conjunto de produtos
$(s, s'), (d_1, d_2) \in L$	Conjunto de dutos
$LD_{s,p}$	Conjunto dos dutos que possuem a área s como extremidade de origem e que contém o produto p no seu primeiro trecho
$z \in R$	Conjunto de rotas
$zp \in 2^{ R }$	Combinação de rotas (não-cíclicas) capaz de atender a demanda de produto p em todas as áreas pertencentes a A_p

$t = 1, 2, \dots, T$	Intervalos de tempo, horizonte de planejamento
Parâmetros	Descrição
$ A $	Número de áreas operacionais (locais)
$ P $	Número de produtos
T	Horizonte de planejamento
$Qi_{s,p,0}$	Volume em estoque no local s do produto p , no tempo 0 (estoque inicial somado com o conteúdo dos dutos que tem a área s como destino)
$Xp_{s,s',1,p,0}$	Se o primeiro trecho do duto (s, s') contém produto p no instante inicial
Variáveis	Descrição
$MQd_{s,p}$	Demanda agregada de produto p na base s
$MQp_{s,p}$	Produção agregada de produto p na base s
$\varphi_{s,p}$	Déficit ou excesso de produto p na base s
$\sigma_{s,p}$	Se existe uma interface associada ao excesso de estoque de produto p na base s
ε_{zp}	Quantidade de interfaces associadas à combinação de rotas zp
ε_p	Combinação de rotas com menor quantidade de interfaces
η	Limite inferior da quantidade de interfaces

Esse algoritmo é descrito abaixo no Quadro 2.

Quadro 2: Procedimento de interface

Início Procedimento_de_Interface

Para cada área s ($s \in A$) faça:

Para cada produto p ($p \in P$) faça:

$$MQp_{s,p} = \sum_{t=1}^T Qp_{s,p,t}$$

$$MQd_{s,p} = \sum_{t=1}^T Qd_{s,p,t}$$

$$\varphi_{s,p} = MQp_{s,p} - MQd_{s,p} + Qi_{s,p,0}$$

Se existe t ($1 \leq t \leq T$) tal que $\varphi_{s,p} > Qmax_{s,p,t}$ então:

Se existe um duto (s, s') tal que $Xp_{s,s',1,p,0} = 1$ então:

$$\sigma_{s,p} = 0$$

Caso contrário

$$\sigma_{s,p} = 1$$

Fim-Se

Fim-Se

$$A_p := \emptyset$$

Para todo $s (s \in A)$ tal que $\varphi_{s,p} < 0$ efetue:

$$A_p := A_p \cup \{s\}$$

Fim-Para

Para toda combinação de rotas (não-cíclicas) zp efetue:

Procedimento Calcula_Interface(zp)

Fim-Para

$$\varepsilon_p := \min_{zp} \{\varepsilon_{zp}\}$$

Fim-Para

Fim-Para

Retorne $\left(\eta = \sum_p \varepsilon_p + \sum_s \sum_p \sigma_{s,p} \right)$

Procedimento Calcula_Interface (zp)

$$\varepsilon_{zp} := 0$$

Para todo duto (d_1, d_2) pertencente à combinação de rotas zp efetue:

Se $Xp_{d_1, d_2, 1, p, 0} = 0$ então:

$$\varepsilon_{zp} := \varepsilon_{zp} + 1$$

Fim-Se

Para todo $s (s \in A)$ tal que $\sigma_{s,p} = 1$ efetue

Se existe algum duto $(d_3, d_4) \in L - LD_{s,p}$

$$\varepsilon_{zp} := \varepsilon_{zp} - 1$$

Fim-Se

Fim-Para

Fim-Para

Retorne (ε_{zp})

Fim Procedimento_de_Interface

A partir dos laços do procedimento de interface verifica-se que sua complexidade é $O(|A|^3 * |P| * (L!) * |L|)$. Apesar de sua complexidade exponencial, o sucesso de sua implantação, no âmbito desse trabalho, está atrelado a esparcidade da matriz de adjacência da

rede de dutos considerada: composta por 8 dutos e 8 áreas operacionais. Um exemplo de aplicação do procedimento de interface pode ser visualizado no Apêndice C.

4.10.3 Refinamento dos limites inferiores

Nessa seção é provado que a soma do número de interfaces obtidas pelo procedimento de interface com o valor obtido da relaxação de Programação Linear do modelo desenvolvido, gera limites inferiores para o problema inteiro, desde que sejam satisfeitas algumas condições. Esse resultado é descrito no Teorema 1, que faz uso da Proposição 1 em sua demonstração.

Proposição 1: Considere os seguintes problemas P_1 e P_2 definidos como segue:

$$P_1: \begin{array}{l} \text{Min } c^T x + 0^T \sum y \\ Ax + By = b \\ x, y \geq 0 \end{array}, \quad P_2: \begin{array}{l} \text{Min } c^T x + L \sum y \\ Ax + By = b \\ \sum y \geq W \\ x, y \geq 0 \end{array}, \quad \text{onde } L \text{ e } W \text{ são números inteiros maiores que}$$

zero. Suponha que x^* e $y^* = 0$ seja uma solução do problema P_1 . Suponha ainda que o valor da função objetivo desse problema valha LB . Então um limite inferior para a solução ótima do problema P_2 é dado por $l = LB + L^*W$.

Prova: Suponha, por absurdo, que l não fosse um limite inferior de P_2 . Então existiriam z^* e s^* tais que: $Az^* + Bs^* = b$, $\sum s^* \geq W$, $z^* \geq 0$, $s^* \geq 0$ e $\alpha < l$, onde α é o valor ótimo da função objetivo nesse ponto, que é dado por $\alpha = c^T z^* + L \sum s^* = c^T z^* + L^*W + L^*h$, onde $L^*h \geq 0$.

Se $\alpha < l$ então $c^T z^* + L^*W + L^*h < LB + L^*W$ e, portanto, $c^T z^* < LB = c^T x^*$. Além disso, a solução (z^*, s^*) seria viável para problema P_1 . Isso leva a uma contradição, pois por hipótese, x^* e $y^* = 0$ formam uma solução ótima de P_1 .

Teorema 1: A soma do número de interfaces obtidas pelo procedimento de interface com o valor obtido da relaxação de Programação Linear para o problema gera limites inferiores para o problema modelado no âmbito desse trabalho, desde que o problema linear possua como uma solução ótima $X_{s,r,p,t} \in \{0,1\}$ e $X_{c,s,r,p',t} = 0$, $\forall (s,r) \in L, p, p' \in P, t = 1, 2, \dots, T$.

Prova: Inicialmente considere $c^T x = W_Q \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t=1..T} Q_{L,s,r} X_{s,r,p,t}$ e

$L \sum y = W_I \sum_{(s,r) \in L} \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{t=1..T} X_{c,s,r,p',t}$ sujeito as restrições do problema exceto as restrições de

integralidade. Como os valores dos ponderadores são sempre maiores ou iguais a zero e o procedimento de interface, desenvolvida neste trabalho, fornece um limite inferior η para o número de interfaces, temos que são satisfeitas as hipóteses necessárias para a aplicação da proposição anterior aos seguintes problemas:

$$P_1: \begin{array}{l} \text{Min } c^T x + W_2 \sum y \\ Ax + By = b \\ x, y \geq 0 \end{array} \qquad P_2: \begin{array}{l} \text{Min } c^T x + W_2 \sum y \\ Ax + By = b \\ \sum y \geq \eta \\ x, y \geq 0 \end{array}$$

Se por hipótese o primeiro problema tem solução ótima x^* e $y=0$, então pela proposição anterior essa solução também será ótima para o problema P_2 , pois $W_2 > 0$. Nesse caso, pela proposição anterior $l = LB + L * \eta$ é um limite inferior do problema P_2 . Inserindo a restrição de integralidade ao modelo matemático tem-se que l continuará sendo um limite inferior desse novo problema inteiro, o que completa a prova.

A hipótese de que a relaxação linear possua as variáveis de interface nulas tem sua validade dependente dos valores atribuídos aos pesos W_0 e W_1 . Entretanto, ao longo deste trabalho, ela foi válida em todas as instâncias testadas. O Quadro 3 apresenta o algoritmo para cálculo dos limites inferiores do problema.

Quadro 3: Procedimento para cálculo dos limites inferiores do problema

```

Início Procedimento_Geração_de_Limites_Inferiores
 $\eta := 0$ 
 $l := 0$ 
 $\eta :=$  Procedimento_de_Interface
 $LB :=$  Procedimento_Resolve_Relaxação_Linear_do_Problema
  Se a solução ótima obtida satisfaz as hipóteses do Teorema 1 faça:
     $l = \eta + LB$ 
  Caso contrário
     $\delta :=$  Procedimento_de_Envio
     $l = \eta + \delta$ 
  Fim-se
Retorne ( $l$ )

```

4.11. HEURÍSTICA PARA FIXAÇÃO DOS SENTIDOS DOS DUTOS

Visando reduzir o porte do modelo matemático gerado quando os sentidos dos dutos não estão fixados *a priori*, foi proposta ainda uma heurística simples de fixação dos sentidos dos dutos, a qual é descrita no Quadro 4. A heurística se baseia no fato de que se uma área operacional demanda um determinado produto e sua produção e estoque inicial são insuficientes para atender essa demanda, então ela precisa recebê-lo através de alguma rota. Dessa forma, os dutos que operam em apenas um único sentido em todas as rotas que participam devem ter esses sentidos fixados em “1”, isto é, poderão ser utilizados enquanto os sentidos reversos são fixados em zero. Além disso, se uma área operacional tiver uma quantidade maior que seu estoque máximo e se conectar a apenas um único duto, então o sentido desse duto também deve ser fixado. Segue a notação completa utilizada para a definição da heurística de fixação dos sentidos dos dutos.

Conjuntos e índices	Descrição
$s \in A$	Conjunto de áreas operacionais (locais)
$A_p \subseteq A$	Subconjunto de áreas operacionais que demandam o produto p
$p \in P$	Conjunto de produtos
$(s, s'), (d_1, d_2) \in L$	Conjunto de dutos
$LD_{s,p}$	Conjunto dos dutos que possuem a área s como extremidade de origem e que contém o produto p no seu primeiro trecho.
$z \in R$	Conjunto de rotas
$t = 1, 2, \dots, T$	Intervalos de tempo, horizonte de planejamento
Parâmetros	Descrição
$ A $	Número de áreas operacionais (locais)
$ P $	Número de produtos
T	Horizonte de planejamento
$Q_{i,s,p,0}$	Volume em estoque no local s do produto p , no tempo 0 (estoque inicial)
$Q_{\max,s,p,t}$	Volume máximo do produto p que pode ser estocado na área operacional s no tempo t
$X_{p,s,s',1,p,0}$	Se o primeiro trecho do duto (s, s') contém produto p no instante inicial
Variáveis	Descrição
$MQd_{s,p}$	Demanda agregada de produto p na base s
$MQp_{s,p}$	Produção agregada de produto p na base s

O algoritmo de fixação dos sentidos dos dutos no Quadro 4.

Quadro 4: Heurística de Fixação dos Sentidos dos dutos (HFS)

Início Heurística_de_Fixação_dos_Sentidos

Para cada área s ($s \in A$) faça:

Para cada produto p ($p \in P$) faça:

$$MQp_{s,p} = \sum_{t=1}^T Qp_{s,p,t}$$

$$MQd_{s,p} = \sum_{t=1}^T Qd_{s,p,t}$$

$$\varphi_{s,p} = MQp_{s,p} - MQd_{s,p} + Qi_{s,p,0}$$

Se $\varphi_{s,p} < 0$ então:

Dentre todas as rotas que podem atender a demanda de produto p na área s , selecionar os dutos (s, s') que operam exclusivamente em um único sentido em todas as rotas que participam

$$\text{sentido}(s, s') = 1$$

Fim-Se

Se existe t ($1 \leq t \leq T$) tal que $\varphi_{s,p} > Qmax_{s,p,t}$ então:

Se a área s se conectar a apenas uma única área w então:

$$\text{sentido}(s, w) = 1$$

Fim-Se

Fim-Para

Fim-Para

Fim Heurística_de_Fixação_dos_Sentidos

4.12. HEURÍSTICA PARA PÓS-PROCESSAMENTO DAS SOLUÇÕES

O modelo de programação linear inteira proposto para o problema quando resolvido através da técnica de *branch-and-bound*. Esse método é exato e, portanto, possui garantia de obtenção da solução ótima. Entretanto, o tempo para encontrá-la pode ser demasiadamente

longo, ou ainda pode exigir uma quantidade de memória excessiva. Nesse contexto, uma possibilidade é executar o algoritmo durante um tempo predeterminado e reter a melhor solução obtida neste tempo. Esta solução assim obtida não necessariamente é ótima, portanto ela eventualmente pode ser melhorada através de um algoritmo de pós-processamento. A ideia básica do algoritmo é agrupar as bateladas de um mesmo tipo de produto, visando diminuir o número total de interfaces.

Por exemplo, suponha que em um horizonte de 5 horas, um duto conectando as áreas X e Y seja aquele com a maior quantidade de interfaces na rede e que ele envie produtos na sequência 1-2-1-3-1. Esta solução gera exatamente quatro interfaces que foram destacadas em negrito na Figura 4.8. Após a aplicação da heurística de pós-processamento, os produtos do tipo “1” foram agrupados de modo que sejam enviadas três bateladas consecutivas desse produto. A solução pós-processada produz apenas duas interfaces.

Figura 4.8: Exemplo de aplicação da heurística de pós-processamento

		Número de interfaces				
		1	2	3	4	5
duto ($X \rightarrow Y$) (antes)	4	1	2	1	3	1
duto ($X \rightarrow Y$) (depois)	2	1	1	1	3	2

Apesar de existir a possibilidade de não serem geradas soluções viáveis devido à violação de restrições como as de estocagem ou de atendimento da demanda, esse algoritmo de pós-processamento requer um baixo tempo computacional é bastante simples. A ideia é que após a obtenção de uma solução viável pelo modelo matemático se rode novamente o modelo considerando a fixação de um grande número de variáveis. Dessa forma, na segunda rodada o modelo, com menor porte, tentará agrupar bateladas de modo a obter soluções com menores quantidades de interfaces. Na pior das hipóteses será obtida a mesma solução alcançada na primeira vez que o modelo foi rodado. Para realizar a fixação das variáveis, observa-se quais os dutos que possuem a maior quantidade de interfaces. Em seguida, roda-se novamente o modelo fixando todas as variáveis associadas aos demais dutos (com poucas interfaces) e deixando livres apenas aquelas relacionadas aos dutos com maior quantidade de interfaces. No âmbito desse trabalho, foi determinado empiricamente que os dutos que não teriam suas variáveis fixadas seriam aqueles que possuíssem as duas maiores quantidades de interfaces após a obtenção da primeira solução viável. Em síntese, a heurística fixa, para uma dada solução viável, as variáveis relativas aos dutos que apresentaram a menor quantidade de interfaces. Segue a notação completa utilizada para a definição da heurística de fixação dos sentidos dos dutos.

Conjuntos e índices	Descrição
$(s, r) \in L$	Conjunto de dutos
$(s^*, r^*) \in L^* \subset L$	Conjunto de dutos com as maiores quantidades de interface (duas)
$p \in P$	Conjunto de produtos
$t = 1, 2, \dots, T$	Intervalos de tempo, horizonte de planejamento
Parâmetros Binários	Descrição
$Xr_{s,r,p,t} = 1$	Se o local r recebe o produto p , vindo do local s , no tempo t na solução viável inicial (obtido após a resolução do modelo matemático antes da aplicação da heurística)
$Xs_{s,r,p,t} = 1$	Se o local s envia o produto p , para o local r , no tempo t na solução viável inicial (obtido após a resolução do modelo matemático antes da aplicação da heurística)
$Xc_{s,r,p,p',t} = 1$	Se há contaminação devido a interface entre os produtos p e p' , no duto (s, r) , no tempo t na solução viável inicial (obtido após a resolução do modelo matemático antes da aplicação da heurística)
$Xp_{s,r,l,p,t} = 1$	Se o trecho l do duto (s, r) contém produto p no tempo t na solução viável inicial (obtido após a resolução do modelo matemático antes da aplicação da heurística)
Variáveis Binárias	Descrição
$Xrn_{s,r,p,t} = 1$	Se o local r recebe o produto p , vindo do local s , no tempo t na nova solução viável obtida
$Xsn_{s,r,p,t} = 1$	Se o local s envia o produto p , para o local r , no tempo t na nova solução viável obtida
$Xcn_{s,r,p,p',t} = 1$	Se há contaminação devido a interface entre os produtos p e p' , no duto (s, r) , no tempo t na nova solução viável obtida
$Xpn_{s,r,l,p,t} = 1$	Se o trecho l do duto (s, r) contém produto p no tempo t na solução nova viável obtida

A descrição desse algoritmo se visualiza no Quadro 5.

Quadro 5: Heurística de Pós-Processamento (HPP)

Início Heurística_de_Pós-processamento

Procedimento Resolução_do_Modelo_Matemático para obter o valor dos parâmetros

$Xr_{s,r,p,t}$, $Xs_{s,r,p,t}$, $Xc_{s,r,p,p',t}$ e $Xp_{s,r,l,p,t}$ (solução viável)

Para todo duto $(s,r) \notin L^*$, $p \in P$, $t = 1, 2, \dots, T$ faça:

$$Xrn_{s,r,p,t} \leftarrow Xr_{s,r,p,t}$$

$$Xsn_{s,r,p,t} \leftarrow Xs_{s,r,p,t}$$

$$Xcn_{s,r,p,p',t} \leftarrow Xc_{s,r,p,p',t}$$

$$Xpn_{s,r,l,p,t} \leftarrow Xp_{s,r,l,p,t}$$

Fim-Faça

Procedimento Resolução_do_Modelo_Matemático (considerando as variáveis $Xrn_{s,r,p,t}$,

$Xsn_{s,r,p,t}$, $Xcn_{s,r,p,p',t}$ e $Xpn_{s,r,l,p,t}$ fixadas anteriormente)

Fim Heurística_de_Pós-processamento

5. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

“The final test of a theory is its capacity to solve the problems which originated it” – George B. Dantzig.

A Transpetro é a operadora logística da PETROBRAS. Ela é responsável pelas operações relativas ao transporte de óleo, derivados, biocombustíveis e gás natural entre diversos pontos do Brasil. De acordo com as informações disponibilizadas pela companhia em seu sítio na *internet*, são transportados anualmente 395 milhões de metros cúbicos de petróleo, derivados e álcool em uma estrutura de 7.179 mil quilômetros de oleodutos, 7.327 mil quilômetros gasodutos, 20 terminais terrestres 28 terminais aquaviários e uma frota de 58 navios petroleiros (TRANSPETRO, 2011). A rede de oleodutos da empresa está dividida em quatro Gerências Regionais, a saber, Sul, São Paulo, Centro-Oeste e Norte-Nordeste-Sudeste. Cada gerência é responsável pelos terminais terrestres e pelas estações de bombeamento situadas em sua área de atuação. As operações de transporte dutoviário são controladas remotamente e são de responsabilidade do Centro Nacional de Controle Operacional (CNCO), localizado na sede da Transpetro no Rio de Janeiro. A Gerência de São Paulo é responsável por três redes de dutos distintas que operam de maneira independente. Na Rede de Claros são transportados derivados de petróleo de coloração clara, baixa viscosidade e maior valor comercial, como por exemplo, o álcool etílico e os derivados leves do petróleo, como gasolina, nafta, diesel, gás liquefeito de petróleo (GLP) e querosene de aviação (QAv). Na Rede de Escuros são transportados derivados de coloração escura, grande viscosidade e menor valor comercial, como por exemplo, o óleo combustível marítimo (*bunker*), o gasóleo para craqueamento e o resíduo atmosférico. Além dessas redes, existe a Rede de abastecimento de cru, que é responsável pela distribuição de petróleo para as refinarias. No âmbito desse trabalho, todos os testes realizados consideram instâncias que se baseiam na Rede de Escuros. Eles foram divididos em seis experimentos, que serão descritos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Descrição dos seis experimentos realizados

Experimento	Atividades realizadas
Primeiro	<ul style="list-style-type: none">✓ Construção de três instâncias (base), que servem de referência para a construção das demais instâncias;✓ Avaliação de <i>performance</i> e uma descrição detalhada de cada solução por meio Gráficos de Gantt;✓ Avaliação da heurística de pós-processamento e da heurística para determinação de limites inferiores.
Segundo	<ul style="list-style-type: none">✓ Avaliação sobre a possibilidade de mudanças nos sentidos dos dutos permitirem a

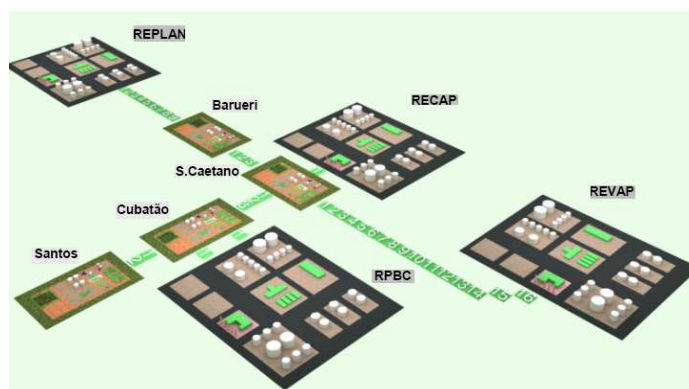
		obtenção de soluções melhores que as obtidas em cada instância-base.
Terceiro	✓	Inserção de outras restrições no modelo matemático que não foram utilizadas nas instâncias-base;
Quarto	✓	Avaliação de funções objetivo diferentes daquelas utilizadas nas instâncias-base;
Quinto	✓	Avaliação da redução da demanda de óleo combustível para zero;
	✓	Simulação de existência de um valor mínimo para estoque de segurança;
Sexto	✓	Avaliação da existência de parâmetros incertos na função objetivo por meio de otimização robusta;

5.1 PRIMEIRO EXPERIMENTO: TESTES COM INSTÂNCIAS-BASE

Neste experimento foram realizados testes com três instâncias-base que serviram de referência para a construção das instâncias que foram utilizadas nas etapas subsequentes deste trabalho. Incluída, nesta etapa está a avaliação da heurística de pós-processamento e da heurística para determinação de limites inferiores. Nesta etapa as restrições utilizadas no modelo matemático foram as restrições de balanço volumétrico (4.3a e 4.3b), as restrições de envio, recebimento e deslocamento de produtos nos trechos (4.4b, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10), as restrições de interface (4.11a), as restrições de produtos nos trechos (4.12) e as restrições que indicam que as variáveis utilizadas no modelo são binárias (4.35, 4.36, 4.37 e 4.38). A função objetivo utilizada minimiza o volume total bombeado e a quantidade total de interfaces (4.1).

Devido à natureza fortemente aplicada do modelo, uma instância requer uma grande quantidade de informações e não existem instâncias de teste disponíveis na literatura. A alternativa adotada então foi usar as instâncias construídas por Alves (2007) as quais se baseiam em uma rede real de dutos brasileiros (Rede de Escuros) que transporta cinco tipos de derivados de petróleo: gasóleo para craqueamento, óleo leve de reciclo (*Light Cycle Oil – LCO*), óleo combustível tipos A e B, óleo combustível marítimo (*bunker*) e óleo combustível tipo exportação. Para estas instâncias é conhecida a solução real praticada pelo operador da rede. A rede é composta por oito dutos e oito áreas operacionais sendo quatro refinarias (RECAP, REPLAN, REVAP e RPBC) e quatro terminais (Barueri, São Caetano, Cubatão e Santos), conforme ilustrado na Figura 5.1.

Figura 5.1: Rede de dutos



Para a definição de uma instância do problema são necessárias informações sobre o número de áreas, a existência de dutos conectando cada par de áreas, bem como o volume de cada um deles, a quantidade de produtos transportados, as condições da rede no instante inicial do horizonte de programação (estoque inicial nos tanques e conteúdo inicial dos dutos), capacidades mínimas e máximas de armazenamento dos tanques, produção e a demanda de cada área, o horizonte de programação e os ponderadores usados em cada uma das parcelas da função objetivo do modelo. Além disso, em função da modelagem utilizada é necessário definir o tamanho do período de tempo a ser considerado na discretização do horizonte de programação, o qual por sua vez irá determinar o número máximo de trechos e o volume do lote de produto em cada duto.

As instâncias foram construídas a partir das informações contidas em um relatório do bombeamento realizado na Rede de Escuros durante todo o mês de julho de 2002, e de outro relatório com os dados de capacidade dos tanques e com o planejamento mensal de produção e demanda nas áreas, feito no início do mês de julho. A partir desses relatórios, foram definidas com base no relatório de planejamento mensal, as condições iniciais da rede (estoque nos tanques e conteúdo dos dutos), as capacidades mínima e máxima dos tanques, e as produções e demandas das áreas no horizonte de tempo considerado - de tal forma que a programação fosse viável. A diferença entre essas instâncias é que as condições iniciais do sistema dutoviário juntamente com os valores de produção para o horizonte de planejamento são mais próximos dos valores de demanda para a primeira instância do que para a segunda; assim, a primeira instância é dita mais “justa” do que a segunda. A terceira instância, apesar de muito parecida com a segunda, teve os sentidos de dois dutos invertido. Dessa forma, as três instâncias-base se diferenciam basicamente pelos dados relativos à produção, demanda, estoque inicial, estoque máximo dos produtos em cada base e sentidos dos dutos, o quais foram escolhidos de acordo com o sentido de operação mais utilizado, que é o de escoamento

dos produtos para o Terminal Santos, para serem exportados. O horizonte de planejamento considerado foi de 7 dias discretizado em períodos de 4 horas, resultando em um total de 42 períodos de tempo. Os estoques mínimos requeridos de todos os produtos em todas as áreas foram considerados iguais a zero. A Tabela 5.2 disponibiliza as informações necessárias para definição das instâncias-base e associa cada informação ao seu respectivo parâmetro no modelo matemático. O Apêndice D detalha os valores de cada parâmetro.

Tabela 5.2: Informações necessárias e parâmetros utilizados para definição de uma instância

Informações sobre áreas operacionais			
Quantidade	Limites de armazenamento	Produção	Demanda
$ A $	$Q_{\min}(s,p)$ $Q_{\max}(s,p)$	$Qp_{(s,p,t)}$	$Qd_{(s,p,t)}$
Informações sobre produtos transportados e horizonte de planejamento			
Produtos		Horizonte	
$ P $		T	
Informações sobre os dutos			
Máximo de trechos	Existência de conexão entre áreas	Número de lotes	Volume de cada lote
L_{\max}	$XL_{(s,r)}$	$KL_{(s,r)}$	$QL_{(s,r)}$
Informações sobre as condições da rede no instante inicial			
estoque inicial		conteúdos dos trechos	
$Qi_{(s,p,0)}$		$Xp_{(s,r,l,p,0)}$	
Informações sobre os ponderadores usados na função objetivo			
Bombeamento		Interface	
W_Q		W_I	

Nos experimentos realizados nas instâncias-base se destacam dois objetivos distintos: o primeiro deles visa avaliar a performance computacional da modelagem proposta quando comparada com a solução praticada pelo operador especializado e com as soluções obtidas por Pereira (2008) e Alves (2007); o segundo objetivo é o de fornecer *insights* ao operador da rede de dutos ao descrever detalhadamente os resultados obtidos em cada instância.

5.1.1 Análise de performance da modelagem nas instâncias-base

O modelo matemático e a heurística de pós-processamento foram implementados na linguagem Mosel e resolvidos pelo PLIM Solver XPRESS-MP mediante uso da técnica *cut-and-branch*, a qual consiste na inserção de cortes apenas no nodo raiz da árvore de *branch-and-bound*. Esses cortes são inseridos automaticamente pelo PLIM Solver durante sua execução. Nas duas primeiras instâncias testadas, foram inseridos cortes de Gomory e de

mochila em um total, respectivamente, de 208 e 149 cortes. Na terceira instância, foram introduzidos 1186 cortes de mochila. Os experimentos computacionais foram realizados em um computador Intel Core 2 Duo 2.66GHz com 8GB de memória RAM. O valor estabelecido para o parâmetro b utilizado na heurística de pós-processamento, em cada uma das instâncias, foi igual a 2. O tempo limite de teste da heurística foi de 1800 segundos enquanto o tempo de teste do modelo PLIM foi de 3,5 horas.

Pereira (2008) propôs uma formulação de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para o mesmo problema tratado por Alves (2007). Entretanto, a formulação proposta por Pereira (2008) não faz uso das restrições de produtos nos trechos nem de *Knapsack Cascading* e, nesse ínterim, não conseguiu obter nenhuma solução viável para nenhuma das três instâncias aqui estudadas. A nova formulação proposta, com o uso da estrutura *Knapsack Cascading* no modelo PLIM, de fato, melhorou significativamente o desempenho do algoritmo *branch-and-bound*, permitindo que fossem encontradas 15 soluções viáveis durante a resolução da primeira instância, 23 durante a resolução da segunda e 9 durante a terceira, como se pode verificar na Tabela 5.3. É de se notar ainda que após o pré-processamento do PLIM Solver, em todas as três instâncias, houve uma redução de 16% no número de variáveis e de 8% no número de restrições. A heurística de pós-processamento conseguiu melhorar, na terceira instância, a solução obtida após a execução do modelo PLIM em 25%. A melhor solução obtida na primeira, segunda e terceira instâncias foram alcançadas respectivamente após, cerca de 15 minutos de execução do algoritmo, na primeira instância, duas horas na segunda e 3 horas na terceira. Os limites inferiores obtidos ao longo da busca na árvore de *branch-and-bound* (relaxações lineares) após o término da execução do algoritmo são de baixa qualidade, pois todos os *gaps* são de pelo menos 72% em todas as instâncias. Entretanto, quando se compara a solução obtida com a solução praticada pelo operador especializado em cada instância, percebem-se diferenças significativas, que chegam a 47% na primeira instância, 39% na segunda e 30% na terceira. Essa dificuldade de obtenção de boas soluções viáveis por parte do operador é evidenciada na quantidade de nós visitados e de nós ativos na árvore de *branch-and-bound*, onde se percebe que, nas três instâncias pelo menos 85% dos nós visitados estavam ativos, mesmo após 3,5 horas de execução. A execução do algoritmo por um período de 24 trouxe melhorias significativas apenas para a primeira instância.

Tabela 5.3: Resultados computacionais para as três instâncias testadas após a resolução do modelo PLIM e da aplicação da Heurística de Pós-Processamento (HPP)

Resultados obtidos	Instância		
	1	2	3
Função Objetivo	838.040	965.440	1.314.400
Volume total bombeado	138.040	165.440	214.400
Número de interfaces	7	8	11
Tempo para encontrar a melhor solução (s)	915	6.985	13.641
Melhor Limite Alcançado (PL)	234.443	253.560	228.140
GAP (%)	72	73	86
Número de Variáveis (APPS)*	30.571	30.653	30.571
Número de Restrições (APPS)	14.322	14.322	14.322
Número de elementos não nulos na matriz (APPS)	250.524	250.688	250.524
Número de Variáveis (DPPS)**	25542	25544	25542
Número de Restrições (DPPS)	13.096	13.086	13.097
Número de elementos não nulos na matriz (DPPS)	134764	135004	134938
Quantidade de soluções viáveis encontradas	15	23	9
Melhoria após HPP (%)	0	0	25
Solução real praticada pelo operador	1.592.320	1.588.120	1.726.720
Tempo Limite (s)	12.600	12.600	12.600
Tempo de execução da heurística	1.800	1.800	1.800
Número de nós visitados	46.000	60.000	63.000
Número de nós ativos	41.812	51.351	56.185
Limite inferior calculado via heurística	638.040	765.440	1.014.400
GAP em relação ao limite inferior da melhor solução em obtida em 4 horas (%)	23	20	22
Melhor solução obtida em 24 horas de execução	738.040	962.560	1.313.800
GAP em relação ao limite inferior da melhor solução em obtida em 24 horas	13	20	22

*APPS: antes do pré-processamento do PLIM -SOLVER

**DPPS: depois do pré-processamento do PLIM -SOLVER

Foram realizados novos testes, com permissão da autora, do AG proposto por Alves (2007). Em cada uma das três instâncias-base foram efetuados 60 testes cada um deles com duração em torno de 17 minutos. Conforme se percebe da Tabela 5.4, na primeira instância, foi encontrada, em um dos testes, uma solução de péssima qualidade (vide a maior solução

obtida). Isso influenciou na obtenção de um valor para o desvio padrão e, de fato, o que impactou na obtenção de um valor médio da função objetivo de 1.507.376 enquanto o valor mediano foi de 990.080. Apesar de ter sido encontrada, em um dos testes, uma solução cuja função objetivo é cerca de 10% melhor que a obtida pelo modelo MIP a diferença entre a mediana das soluções e a solução obtida pelo modelo MIP é aproximadamente 15%. Na segunda instância, a solução encontrada pelo modelo MIP está muito próxima da mediana dos testes realizados com o AG, cerca de 2% abaixo da média desses resultados e 12% abaixo da melhor solução obtida dentre os 60 testes. Na terceira instância, foram obtidas soluções piores pelo AG. A diferença entre a melhor solução obtida pelo AG nessa instância e a solução do modelo MIP é de 5%, alcança 18% se a comparação for feita com a média dos resultados e chega a 23% quando se faz uma comparação com a pior solução obtida.

Tabela 5.4: Comparação dos resultados obtidos pelo AG com os modelo proposto nas três instâncias-base

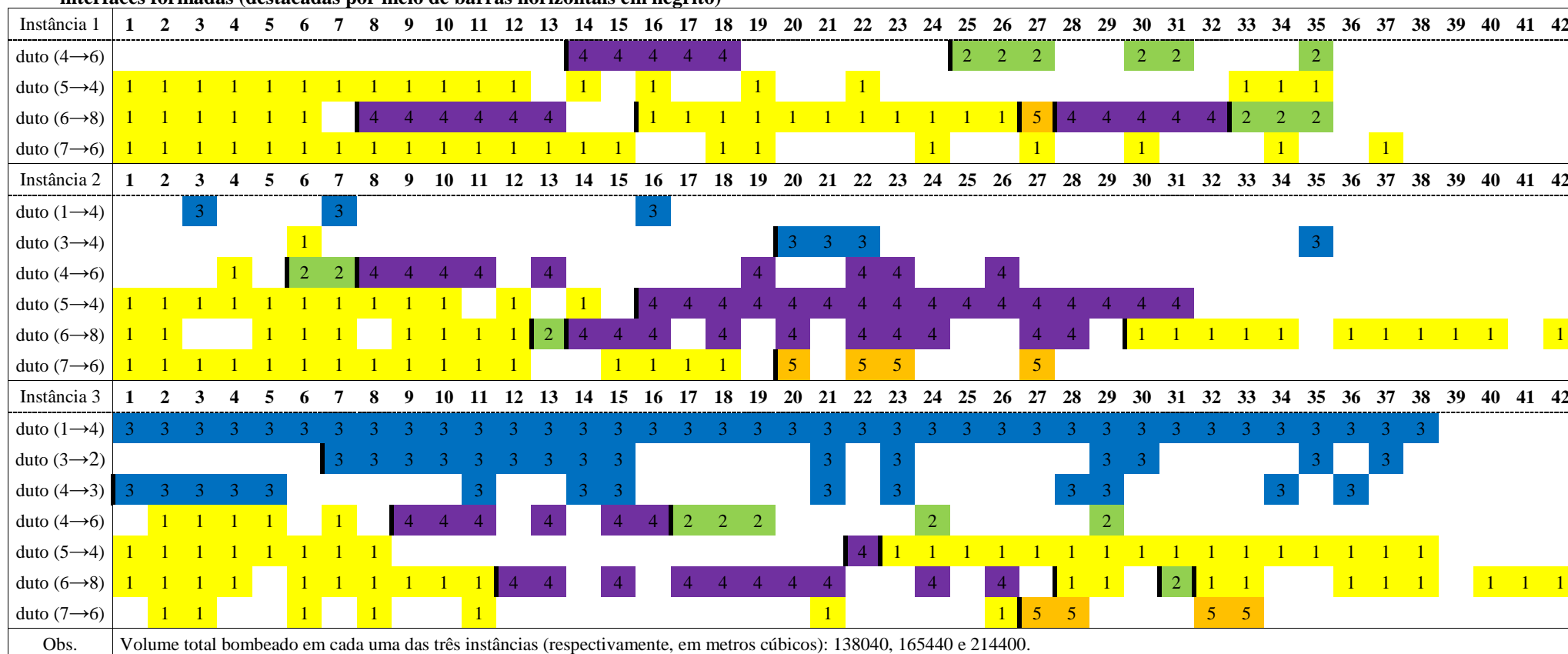
	inst1	inst2	inst3
Média	1.507.376	946.467	1.486.724
Mediana	990.080	964.920	1.477.560
Desvio padrão	1.066.985	51.917	59.695
Contagem	60	60	60
Maior	4.225.320	1.095.360	1.580.560
Menor	761.880	860.760	1.287.120
Amplitude	3.463.440	234.600	293.440
Modelo MIP	838.040	965.440	1.214.400

5.1.2 Descrição detalhada de uma solução

Para cada uma das instâncias, podem ser construídos Gráficos de Gantt com o intuito de sintetizar graficamente os resultados obtidos para uma melhor análise do tomador de decisão. Na primeira instância, por exemplo, a solução encontrada indica que devem ser bombeados $138.040 m^3$ que são responsáveis pela formação de 7 interfaces, as quais foram destacadas por meio de barras verticais em negrito. Duas delas ocorrem, conforme se pode verificar no Gráfico 5.1, na conexão entre São Caetano e Cubatão após o envio de *bunker* no 14º período de tempo e de óleo combustível no 25º período. Nesse duto, foram enviadas 11 bateladas durante o horizonte de planejamento (42 períodos de tempo de quatro horas), o que totaliza uma taxa de ocupação de apenas 26%. No duto que liga Cubatão a Santos aparecem 5 interfaces. Elas ocorrem nos períodos 8, 16, 27, 28 e 33 após o envio de *bunker*, óleo combustível para exportação, gásóleo para craqueamento, bunker e óleo combustível. O óleo combustível de exportação foi o produto mais movimentado ao longo da rede. Note-se ainda que as conexões RECAP-São Caetano, Barueri-REPLAN, São Caetano-Barueri, Cubatão-RPBC não foram utilizadas e que na segunda metade do horizonte de planejamento as

conexões entre São Caetano-Cubatão e REVAP-São Caetano tiveram elevada taxa de ociosidade. Esse cenário permite que o gestor avalie possíveis aumentos na demanda dos produtos ou se é interessante fazer o aluguel dos dutos ociosos para empresas concorrentes. Na segunda instância foram geradas 8 interfaces, das quais 3 delas ocorreram na conexão entre Cubatão e o porto de Santos (nos tempos 13, 14 e 30 após o envio respectivamente de óleo combustível, *bunker* e óleo combustível de exportação) e 2 na ligação entre São Caetano e Cubatão (nos tempos 6 e 8 após o envio respectivamente de óleo combustível e *bunker*). Além disso, foi bombeado um total de 165.440 metros cúbicos, com predomínio no envio de óleo combustível de exportação e *bunker*. Na terceira instância foram geradas 11 interfaces, das quais 4 delas ocorreram na conexão entre Cubatão e o porto de Santos (nos tempos 12, 28, 31 e 32 após o envio respectivamente de *bunker*, óleo combustível de exportação, óleo combustível e óleo combustível de exportação). Nessa instância, quase todos os dutos foram utilizados e foram bombeados 214.400 metros cúbicos de produto, com um claro predomínio de envio de LCO.

Gráfico 5.1: Gráfico de Gantt representando, para todas as três instâncias, os produtos enviados em cada duto ao longo do horizonte de planejamento bem como as interfaces formadas (destacadas por meio de barras horizontais em negrito)



Legenda

Produtos	Dutos		Dutos	
óleo combustível de exportação	duto (1→4)	RECAP → São Caetano	duto (6→7)	Cubatão → RPBC
óleo combustível	duto (2→3)	REPLAN → Barueri	duto (6→8)	Cubatão → Santos
LCO	duto (3→4)	Barueri → São Caetano	duto (7→6)	RPBC → Cubatão
bunker	duto (4→6)	São Caetano → Cubatão	duto (3→2)	Barueri → REPLAN
gasóleo para craqueamento	duto (5→4)	REVAP → São Caetano	duto (3→4)	São Caetano → Barueri

Na primeira instância, como se constata do Gráfico 5.2, os estoques de LCO na RECAP, de óleo combustível de exportação na REPLAN e de *bunker* na REVAP tiveram aumento significativo em função da produção desses produtos (vide APÊNDICE E) nessas refinarias que não foram enviadas para nenhuma outra área operacional. O decréscimo no estoque de óleo combustível de exportação na RPBC ocorre para que haja o atendimento da demanda nos terminais de Cubatão e Santos. Nas áreas operacionais onde os níveis de estoque de um determinado produto se mantiveram constantes, não houve bombeamento deste produto e esses locais permaneceram apenas com o volume inicial de produto em estoque. O decréscimo no volume estocado no terminal de São Caetano ocorre para que ocorra o atendimento das demandas em Cubatão e em Santos. Em um primeiro momento os estoques em Cubatão se elevam, mas diminuem devido ao atendimento da demanda de seu mercado consumidor local e da demanda no Terminal de Santos. O atendimento da demanda do mercado consumidor de Santos faz com que ao final do horizonte de planejamento o volume em estoque seja muito baixo. Na segunda instância, conforme se visualiza no Gráfico 5.3, diferentemente do que ocorreu na primeira instância houve um aumento no estoque de bunker na REVAP até o 16º sexto período de tempo seguido de um decréscimo até o período 32 (que chegou a níveis próximos de zero) e de um novo aumento. Nessa área operacional também se verifica uma pequena redução nos volumes estocados de gasóleo para craqueamento, que ocorre em função do atendimento da demanda desse produto no terminal de Santos. A redução dos níveis de estoque de LCO em Barueri ocorreu para que fosse atendida a demanda desse produto em São Caetano, o que justifica os níveis baixos de estoque de produto também nesta última área operacional. No terminal de Santos se percebe baixos níveis de estoque nos quatro produtos que esse terminal movimentou, uma vez que parte significativa dos estoques foram utilizados para o atendimento do mercado consumidor local. Na terceira instância houve uma redução significativa nos estoques de LCO na RECAP em função da demanda desse produto em Barueri e São Caetano, o que justifica os baixos níveis de estoque desse produto encontrados ao final do horizonte de planejamento nessas duas áreas operacionais, os quais podem ser constatados no Gráfico 5.4. O estoque de óleo combustível de exportação sofreu acréscimos e decréscimos em função do contrabalanceamento da produção dessa refinaria com a demanda desse produto nos terminais de São Caetano e Santos. Além disso, o atendimento das demandas de gasóleo para craqueamento foi

feita exclusivamente pelos estoques iniciais de cada área operacional, uma vez que não houve produção desse produto em nenhum período de tempo.

Gráfico 5.2: Valores obtidos na primeira instância-base para os estoques em cada período de tempo na RECAP (A), REPLAN (B), Cubatão (C), REVAP (D), RPBC(E), Santos (F), Barueri (G) e São Caetano (H).

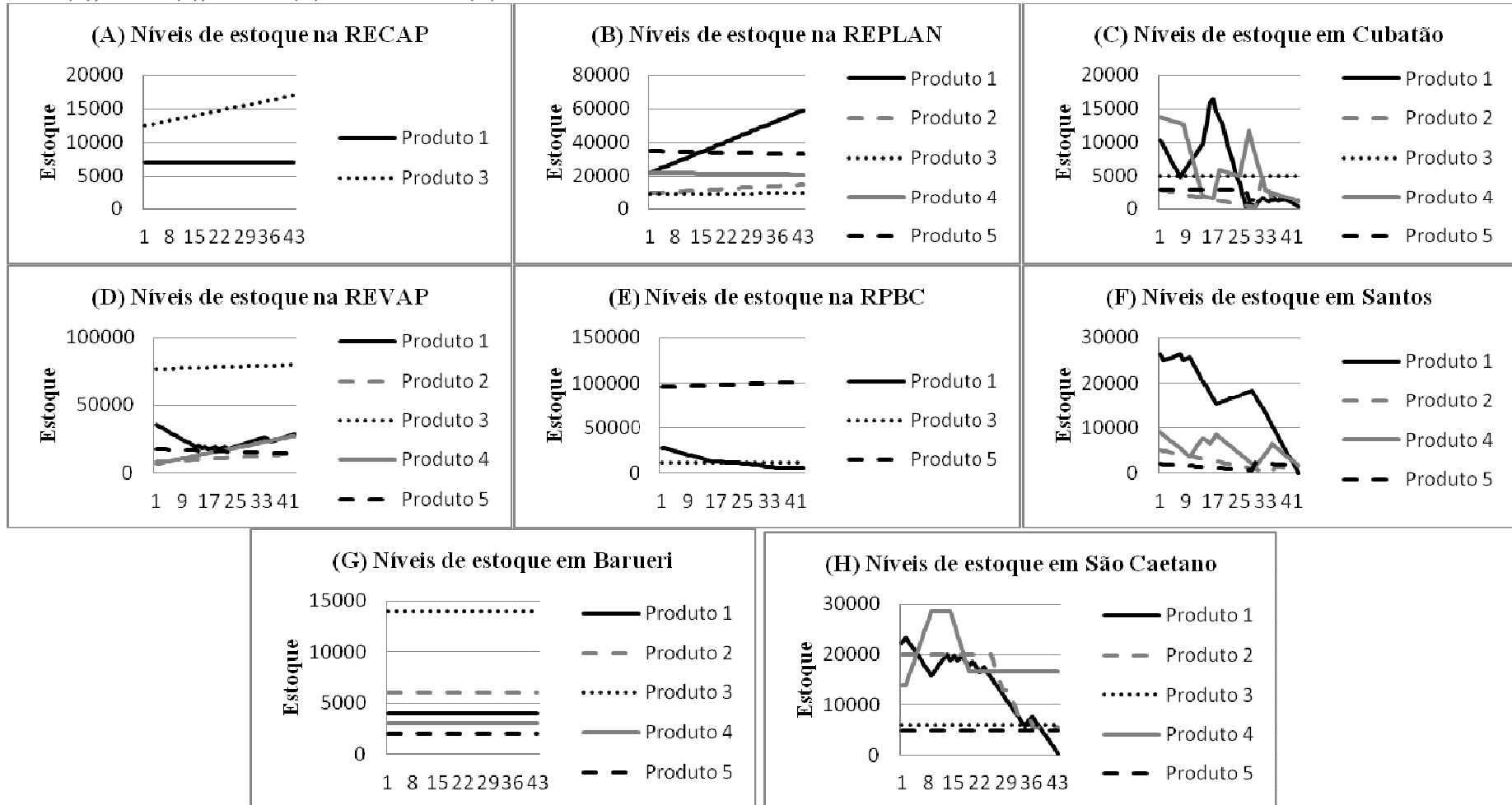


Gráfico 5.3: Valores obtidos na segunda instância-base para os estoques em cada período de tempo na RECAP (A), REPLAN (B), Cubatão (C), REVAP (D), RPBC(E), Santos (F), Barueri (G) e São Caetano (H).

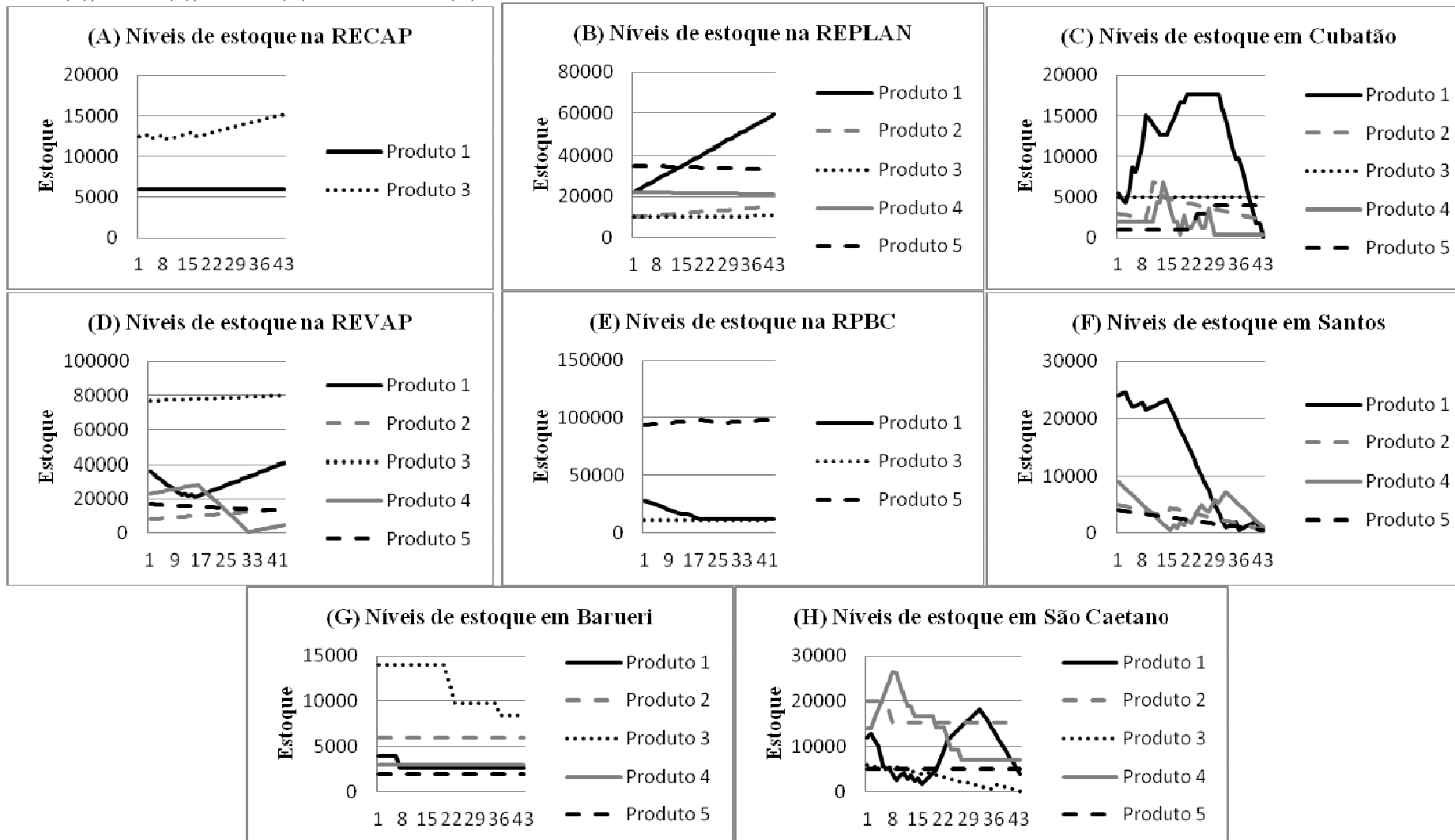
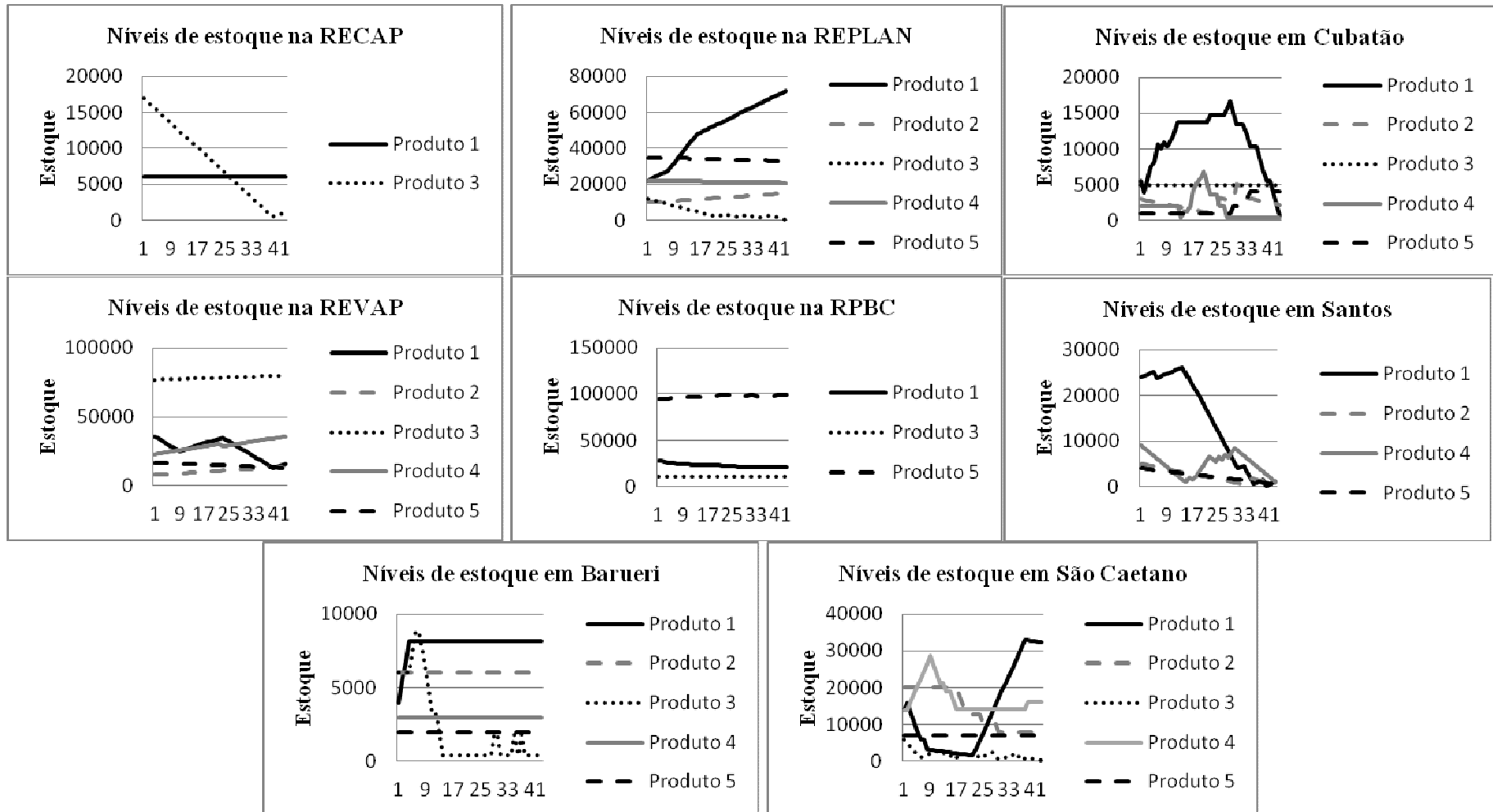


Gráfico 5.4: Valores obtidos na terceira instância-base para os estoques em cada período de tempo na RECAP (A), REPLAN (B), Cubatão (C), REVAP (D), RPBC(E), Santos (F), Barueri (G) e São Caetano (H).



5.2 SEGUNDO EXPERIMENTO: MUDANÇA DE SENTIDO NOS DUTOS

Neste experimento foi avaliado se uma mudança nos sentidos dos dutos das instâncias-base poderia conduzir a melhores soluções, que as obtidas na etapa anterior.

5.2.1 Modificações em relação as instâncias-base

Para realizar essa avaliação foi feita uma substituição das restrições de envio, recebimento e deslocamento de produtos nos trechos (4.7), (4.8), (4.10) e (4.11), respectivamente pelas restrições (4.7s), (4.8s), (4.10s) e (4.11s). Além destas, é preciso inserir as restrições (4.13), (4.14) e (4.40) ao modelo matemático utilizado na primeira etapa. Nestas três últimas restrições, faz-se uso de um grupo adicional de variáveis binárias $Xdir_{s,r}$ que indicam o sentido escolhido para bombeamento de produtos em cada duto. Os parâmetros utilizados na segunda etapa são essencialmente os mesmos utilizados na primeira, com alterações apenas no parâmetro $XL_{s,r}$ para que se considere a possibilidade de envio no sentido reverso.

5.2.2 Resultados obtidos

Na Tabela 5.5 depreende-se que a possibilidade de escolha desses sentidos implica em um modelo com cerca de 59300 variáveis e 27400 restrições. Esse número é praticamente o dobro do número de variáveis e restrições do modelo onde essa particularidade não é considerada, conforme se visualizou na primeira etapa dos experimentos. Foi possível encontrar soluções melhores que as obtidas na primeira etapa, entretanto isso não ocorreu efetivamente pelo uso de sentidos diferentes daqueles utilizados nas instâncias-base, uma vez que nos sentidos modificados não houve bombeamento. Essa divergência ocorre porque, em função da complexidade do problema, o modelo não encontra a solução ótima. Consequentemente, é possível que se obtenha soluções viáveis diferentes dependendo da forma como foi feita a pesquisa de soluções na árvore de *branch-and-bound*. Dessa forma, os sentidos fixados a priori pelo tomador de decisão provavelmente são os sentidos ótimos de operação dos dutos para as instâncias testadas. Entretanto, esse tipo de análise se revela bastante útil, pois pode revelar outras possibilidades utilização de sentidos de dutos em outras instâncias que considerem, por exemplo, mudanças nos parâmetros utilizados para estoques,

demandas ou produção. Além disso, com o uso da heurística de fixação dos dutos (preprocessamento) foi possível encontrar soluções melhores que as obtidas sem preprocessamento na segunda e terceira instâncias.

Tabela 5.5: Resultados computacionais para as três instâncias testadas após a resolução do modelo PLIM considerando a escolha de sentidos de operação

	Instâncias testadas (sem preprocessamento)			Instâncias testadas (com preprocessamento)		
	1	2	3	1	2	3
Função Objetivo	739.360	962.760	1.688.880	839.280	867.080	1.499.040
Tempo para encontrar a melhor solução (s)	13491	12.642	13.752	12.801	13.494	13.906
Número de Variáveis (APPS)*	59.318	59.318	59.318	59.321	59.321	59.322
Número de Restrições (APPS)	27.398	27.398	27.398	27.398	27.398	27.398
Número de elementos não nulos na matriz (APPS)	478.786	478.783	478.786	478.789	478.789	478.790
Sentidos modificados	3→2 4→1	3→2	nenhum	nenhum	nenhum	nenhum
Houve bombeamento nos sentidos modificados?	não	não	não	não	não	não
Função Objetivo (instâncias-base)	838.040	965.440	1.214.400	838.040	965.440	1.214.400

5.3 TERCEIRO EXPERIMENTO: INSERÇÃO DE OUTROS GRUPOS DE RESTRIÇÕES

Neste experimento, a partir das instâncias-base, foram construídas outras instâncias que contemplam um conjunto de particularidades inseridas no modelo matemático a critério do gestor.

5.3.1 Modificações em relação as instâncias-base

Essa modificação é feita pela inserção de novas restrições acrescentado-se restrições disponíveis na seção (5.5) de “Modelagem de situações específicas”. Foram avaliadas a penalização do número de paradas nos dutos, a existência de manutenções programadas, a existência de restrições de envio e recebimento, a existência de restrições pulmão, a existência de uma taxa mínima de bombeamento nos dutos, a

existência de um número mínimo de bateladas bombeadas se houver bombeamento e a existência de um número mínimo de bateladas consecutivas bombeadas se houver bombeamento.

A penalização do número de paradas foi realizada considerando-se o parâmetro de penalização $W_{STO} = 10^8$. Além disso, foi utilizada a função objetivo (4.1c) e inseridas variáveis binárias $Xsto_{s,r,t}$ que contabilizam cada parada realizada em cada duto. Nesse caso adicionou-se a modelo utilizado na primeira etapa apenas a restrição (4.39)

A existência de manutenção programadas foi modelada, em todas as três instâncias, apenas no duto que conecta o terminal de Cubatão ao porto de Santos tendo início no período 16 e término no período 20. Desta forma foram inseridas no modelo utilizado na primeira etapa as restrições (4.18) e (4.19) considerando o parâmetro $Mpr_{6,8} = 1$ e o conjunto $\Omega_{6,8} = \{16,17,18,19,20\}$.

As restrições de envio e recebimento foram consideradas para todos os produtos e em todos os períodos de tempo mediante a inserção da restrição (4.20). Similiarmente a modelagem das existências de restrições pulmão e feita pela adição da restrição (4.21) no modelo utilizado na primeira etapa.

A existência de uma taxa mínima de bombeamento foi modelada pela inserção da restrição (4.22) no modelo usado na primeira etapa. Foi considerada uma taxa igual a 33%, isto é, $Tx_{s,r} = 33\%$.

A existência de um número mínimo de bateladas em caso de bombeamento foi modelada pela inserção das restrições (4.23) e (4.24). Nessa instância são inseridas variáveis binárias $Xsmin_{(s,r,p)}$ e um parâmetro que constabiliza o valor mínimo da quantidade de bateladas ($Mbat_{(s,r,p)} = 4$). Além disso, foi inserida a restrição (4.40) ao modelo matemático utilizado na primeira etapa.

Para modelagem da existência de um número mínimo de bateladas consecutivas em caso de bombeamento foi utilizada as restrições (4.30), (4.31), (4.32), (4.33), (4.34). Além disso, são inseridas as variáveis $Xb1_{(s,r,p,t)}$, $Xb2_{(s,r,p,t)}$ e $Xb3_{(s,r,p,t)}$ e um parâmetro que constabiliza o valor mínimo da quantidade de bateladas ($Mbat_{(s,r,p)} = 4$). Visando garantir que essas novas variáveis inseridas no modelo sejam binárias, foram inseridas as restrições (4.42), (4.43), (4.44).

5.3.2 Resultados obtidos

Conforme se visualiza na Tabela 5.6, a penalização do número de paradas implicou em um aumento significativo na função objetivo em relação as instâncias-base. Isto ocorreu para que não existisse nenhuma parada nos dutos - uma vez que a penalização utilizada foi muito elevada – e teve como consequência um aumento na taxa média de ocupação dos dutos e da quantidade de interfaces formadas. Nas instâncias que consideram a existência de períodos de manutenção programada constata-se, na primeira delas, que foi obtida a mesma solução encontrada na instância-base correspondente, o que significa que o período de manutenção programada não afeta a quantidade enviada de produtos nos dutos que ficaram em manutenção. Na segunda instância foi possível encontrar uma solução melhor do que a solução obtida na instância base. Novamente, esse tipo de divergência ocorre porque, em função da complexidade do problema, o modelo não encontra a solução ótima. Conseqüentemente, é possível que se obtenha soluções viáveis diferentes dependendo da forma como foi feita a pesquisa de soluções na árvore de *branch-and-bound*. Entretanto verifica-se um aumento significativo da função objetivo da terceira instância. A inserção de restrições de envio e recebimento resultou em valores de função objetivo piores que aqueles obtidos nas três instâncias-base, sendo que na terceira delas houve um aumento significativo (superior a 170%). Comportamento similar a esse, também é verificado quando se insere restrições pulmão, exceto na segunda instância, cujo valor da função objetivo foi ligeiramente menor. A existência de uma taxa mínima de bombeamento implica que nenhum duto poderá ficar ocioso e conseqüentemente incrementa os valores da função objetivo. Entretanto, esse aumento depende da quantidade obrigatória de bombeamento, uma vez que, esses valores são em geral utilizados nos limites mínimos, pois a função objetivo visa minimizar a quantidade total bombeada e a quantidade de total interfaces. Nas instâncias testadas evidenciou-se que o envio de bateladas consecutivas conduziu a melhores valores de função objetivo do que as instâncias em que se considera a possibilidade de envio não consecutivo. Isso tem sua razão calcada na formação de uma menor quantidade de interfaces quando o envio de um mesmo produto é feito de maneira consecutiva.

5.4 QUARTO EXPERIMENTO: AVALIAÇÃO DE OUTRAS FUNÇÕES OBJETIVO

Neste experimento foram avaliadas funções objetivo diferentes da função considerada nos trabalhos de Alves (2007) e Pereira (2008), isto é, diferentes daquela utilizada nas instâncias-base.

5.4.1 Modificações em relação as instâncias-base

Na primeira etapa a função objetivo utilizada no modelo matemático (4.1) minimiza a soma do volume total bombeado com a quantidade total de interfaces. Na quarta etapa, por sua vez, considera-se a possibilidade de otimização de outras funções escolhidas a critério do tomador de decisão. Dessa forma, foram avaliadas as seguintes funções objetivo: (4.1b), (4.1c), (4.1d), (4.1e), (4.1f), (4.1g) e (4.1h).

5.4.2 Resultados obtidos

Conforme se percebe na Tabela 5.7, quando se minimiza exclusivamente a quantidade total bombeada foi possível encontrar a solução ótima em duas das três instâncias testadas, entretanto o número de interfaces foi bastante elevado. Na função objetivo que considera a maximização do volume total bombeado, obteve-se uma taxa de ocupação dos dutos de 97% em duas instâncias e de 99% na terceira instância, o que culminou em números bastante elevados de interfaces e bombeamentos no horário de pico. A minimização exclusiva do volume bombeado no horário de pico resultou em um único envio nesse horário na primeira instância, dois envios na segunda e quatro bombeamentos na terceira instância. Entretanto, os volumes bombeados são maiores nestas instâncias do que naquelas onde se considera a minimização do volume bombeado no horário normal e horário de pico. Ressalte-se que quando se considera funções objetivo onde existe uma parcela relativa a número de interfaces, não foi possível encontrar a solução ótima. Esse resultado evidencia uma das conclusões de Milidiú e Liporace (2003) que mostraram que é NP-Completo o problema de transporte de derivados de petróleo em um oleoduto quando se considera restrições de interface. Uma implicação imediata desse resultado é que o planejamento de uma rede de dutos considerando restrições de interface é bastante difícil.

Tabela 5.6: Resultados computacionais para três instâncias testadas a partir da inserção de diferentes tipos de restrições no modelo matemático

	Paradas nos dutos			Manutenção programada			Envio e recebimento			Pulmão		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Função Objetivo	1.202.080	1792.880	3.049.280	838.040	862.920	2.112.920	950.240	1.269.800	3.636.400	838.680	958.160	3.399.080
Número de interfaces	10	15	27	7	7	19	8	11	34	7	8	31
Volume bombeado	202.080	292.880	349.280	138.040	162.920	212.920	150.240	169.800	236.400	138.680	158.160	299.080
Tempo médio de ocupação dos dutos não-ociosos (%)	80	67	69	50	47	47	42	48	50	41	38	66
Número de paradas	0	0	0	23	20	25	19	17	32	15	21	24
Número de dutos ociosos	5	2	0	4	3	1	3	2	1	3	2	1
	Taxa mínima de bombeamento			Mínimo bateladas			Mínimo de bateladas consecutivas			Instância-base		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Função Objetivo	1.100.920	1.218.800	1.528.880	1.060.840	1.704.520	3.277.160	959.680	1.163.880	1.929.760	838.040	965.440	1.314.400
Número de interfaces	9	10	13	9	15	30	8	10	17	7	8	11
Volume bombeado	200.920	218.800	228.880	160.840	204.520	277.160	159.680	163.880	229.760	138.040	165.440	214.400
Taxa média de ocupação dos dutos não-ociosos (%)	41	38	48	54	48	52	38	22	46	50	39	51
Número de paradas	51	41	33	22	18	35	14	22	24	16	26	32
Números de dutos ociosos	0	0	0	4	2	0	2	2	0	4	2	1

Tabela 5.7: Resultados computacionais para três instâncias testadas a partir de modificações na função objetivo das três instâncias-base

	Min-bomb			Max-bomb			Min-bomb-pico			Min-bomb-pico-interf		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Função Objetivo	141.240	167.880	161.880	472.260	477.160	476.960	151.800	176.720	179.000	745.200	972.240	1.837.520
Número de interfaces	26	27	42	171	175	177	22	27	32	6	8	16
Volume bombeado	141.240	167.880	161.880	472.260	477.160	476.960	147.640	165.200	165.080	141.040	163.920	194.640
Tempo médio de ocupação dos dutos não-ociosos (%)	33	32	35	97	97	99	42	41	43	51	48	44
Número de bombeamentos em horário de pico	12	13	15	54	55	55	1	4	4	1	2	10
Número de dutos ociosos	2	1	1	0	0	0	2	2	2	4	3	1
Obteve solução ótima?	sim	sim	sim	sim	Sim	sim	sim	sim	sim	não	não	não
Tempo de execução (s)	47	59	14400	2	3	13	6	55	14400	14400	14400	14400
	Min-interf			Min-pico			Min-bomb-interf (instância base)					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
Função Objetivo	9	11	21	2080	4160	6160	838.040	965.440	1.314.400			
Número de interfaces	9	11	21	44	55	69	7	8	11			
Volume bombeado	197.360	215.160	242.360	220.240	230.040	282.040	138.040	165.440	214.400			
Taxa média de ocupação dos dutos	39	42	50	38	43	57	50	39	51			
Número de bombeamentos em horário de pico	15	19	21	1	2	4	13	14	27			
Números de dutos ociosos	1	1	1	0	0	0	4	2	1			
Obteve solução ótima?	não	não	Não	Sim	Sim	sim	não	não	não			
Tempo de execução (s)	14400	14400	14400	8	424	3091	14400	14400	14400			

5.5 QUINTO EXPERIMENTO: SUBSTITUIÇÃO DO ÓLEO COMBUSTÍVEL E ESTOQUE MÍNIMO DE SEGURANÇA

Neste experimento foram realizadas simulações de dois cenários distintos. No primeiro deles considerou-se a redução da demanda de óleo combustível para zero em função de sua substituição por gás natural; e, no outro cenário considera-se a existência de um valor mínimo para estoque de segurança.

5.5.1 Modificações em relação as instâncias-base

O primeiro cenário implica apenas em uma modificação do parâmetro que contabiliza a quantidade demanda de produto em cada duto em cada período de tempo ($Qd_{(s,p,t)}$). Desta forma as demandas associada ao óleo combustível serão nulas. O segundo cenário implica em uma modificação no valor do estoque mínimo $Qmin_{s,p}$ para que esse parâmetro seja diferente de zero. Para obtenção dos novos dos valores do estoque mínimo de segurança foi utilizada a resolução (ainda em vigor) número 3 de 1981 do antigo Conselho Nacional de Petróleo (CNP), atual Agência Nacional do Petróleo. Esta resolução dispõe sobre o armazenamento mínimo e estoque de segurança de petróleo e seus derivados. Sua metodologia de cálculo é reproduzida no APÊNDICE F.

5.5.2 Resultados obtidos

Conforme se depreende da Tabela 5.8, uma eventual substituição do óleo combustível por gás natural impactaria significativamente na programação da rede de dutos. Em termos de função objetivo existiria uma redução de custos de 36% na primeira instância, 12% na segunda e 33% na terceira, que ocorre principalmente pela redução da quantidade de interfaces, em função de se ter um produto a menos para se transportar. Houve ainda uma redução da taxa média de ocupação dos dutos, o que significa uma possibilidade real de incremento da demanda dos demais produtos transportados ou ainda o aluguel de dutos ociosos e daqueles em períodos em que não estiverem bombeando produto. Por outro lado, a imposição da manutenção de um estoque de segurança por parte da agência reguladora implicou em aumentos na função objetivo, respectivamente de 1, 24 e 62% nas três instâncias testadas. Isso ocorre, pois para que se tenha tal estoque, o mais provável é o envio de produto para os locais onde

o estoque seja insuficiente, o que implica em um possível aumento na quantidade de interfaces e do volume total bombeado e com consequente incremento na taxa média de ocupação dos dutos. A Tabela 5.9 exibe os estoques em cada área operacional ao final do horizonte de planejamento. A existência, por exemplo, de uma possível redução da demanda de óleo combustível resultante de sua substituição pelo gás natural implicaria que os valores dos estoques finais desse produto nas refinarias REPLAN e REVAP seriam reduzidos, quando comparados com as instâncias-base. Além disso, esses valores seriam aumentados no porto de Santos em função da existência de um estoque inicial desse produto nessa base sem, entretanto, existência de uma demanda. Similarmente, uma eventual necessidade de se garantir estoques mínimos de segurança implicariam em um aumento na quantidade de LCO estocada ao final do horizonte de planejamento no terminal de São Caetano na segunda e terceira instância, mas seriam reduzidas as quantidades estocadas óleo combustível em Barueri nessas duas instâncias. Neste contexto, esse conjunto de informações obtidas após a execução do modelo matemático permite ao gestor que avalie os impactos de mudanças na programação da rede, bem como a existência de gargalos, ociosidades e estoques insuficientes para atendimento da legislação em vigor.

Tabela 5.8: Resultados computacionais considerando estoques mínimos de segurança e substituição do óleo combustível

	Est. mínimo de segurança			Subst. Óleo combustível			Instância-base		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Função Objetivo	846.920	1.281.040	2.129.400	532.240	859.600	878.480	838.040	965.440	1.314.400
Interfaces	7	11	19	4	7	7	7	8	11
Volume bombeado	146.920	181.040	229.400	132.240	159.600	178.480	138.040	165.440	214.400
Taxa média de bombeamento nos dutos	54	51	51	49	34	45	50	39	51
Número de dutos ociosos	4	3	1	4	1	1	4	2	1

Tabela 5.9: Resultados computacionais considerando estoques mínimos de segurança e substituição do óleo combustível (em milhares de metros cúbicos) do estoque ao final do horizonte de planejamento

	RECAP			REPLAN			Barueri			São Caetano			REVAP			Cubatão			RPBC			Santos		
Oléo exp. (A)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Subst. (1)	7	6	6	59.1	56.4	71.7	4	1.2	8.2	0.2	0	7.7	28	51.4	49.3	0.2	0.7	0.3	2	9	19	0	1	1
Inst.-base (2)	7	6	6	59.1	59.1	71.7	4	2.6	8.2	0.2	3.8	32.3	28	41	16	0.4	0.1	0.7	5	12	21	0	1	1
Est. seg. (3)	7	6	6	59.1	59.1	71.7	4	2.6	8.2	2.3	2.1	25.1	26	11.9	24.4	1.2	0.1	0.1	2	7	20	3.2	2.6	2.6
O. comb. (B)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Subst. (1)	--	--	--	10	10	10	6	1.8	6	20	20	20	8	8	8	3	3	3	--	--	--	5	5	5
Inst.-base (2)	--	--	--	15	15	15	6	6	6	5.6	15.2	8	14	14	14	1.4	2.2	2.1	--	--	--	0.6	0.6	0.6
Est. seg. (3)	--	--	--	15	15	17.8	6	1.8	0.4	8	8	8.6	14	14	7.7	2.1	2.1	0.5	--	--	--	0.6	0.6	0.6
LCO (C)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Subst. (1)	17	14.6	1.2	10	10.5	0.4	14	14	0.4	6	1.4	0.2	80	44.6	80	5	5	5	11	11	11	--	--	--
Inst.-base (2)	17	15	1.2	10	10.5	0.4	14	8.4	0.4	6	0.1	0.2	80	80	80	5	5	5	11	11	11	--	--	--
Est. seg. (3)	17	17	9	10	10.5	8.8	14	9.8	0.4	6	1.2	0.8	80	8	80	5	5	5	11	11	11	--	--	--
Bunker (D)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Subst. (1)	--	--	--	21	21	21	3	3	3	9.3	9	7	27.1	36	31.7	1.2	0.4	0.4	--	--	--	1.6	1	1
Inst.-base (2)	--	--	--	21	21	21	3	3	3	16.5	7	16.2	27.1	4.7	36	1.1	0.4	0.4	--	--	--	1.6	1	1
Est. seg. (3)	--	--	--	21	21	21	3	3	3	16.5	28.7	11.7	27.1	23.4	36	1.1	0.4	2.8	--	--	--	1.6	1	1
G. craq. (E)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Subst. (1)	--	--	--	33	33	33	2	2	2	5	5	7	14	13	13	1.4	4	4	101	99	99	1.6	0.5	0.5
Inst.-base (2)	--	--	--	33	33	33	2	2	2	5	5	7	14	13	13	1.4	4	4	100	99	99	1.6	0.5	0.5
Est. seg. (3)	--	--	--	33	33	33	2	2	0.6	5	5	0.7	14	13	11	0.2	5	4	97	99	99	1.6	0.5	0.5

Legenda:

Produtos:

(A) óleo combustível de exportação (B) óleo combustível (C) LCO (D) Bunker (E) Gasóleo para craqueamento

Instâncias:

(1) Substituição do óleo combustível (2) Instância-base (3) Estoque de segurança

5.6 SEXTO EXPERIMENTO: PARÂMETROS ROBUSTOS NA FUNÇÃO OBJETIVO

Neste experimento foi considerada a uma possível existência de incertezas associadas aos parâmetros (W_0 e W_i) da função objetivo das instâncias-base. Dessa forma foram realizadas simulações fixando, em todas as três instâncias e para todos os parâmetros, \hat{a}_{ij} igual a 0,5, considerando diferentes níveis de proteção $\Gamma_i \in \{100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 5796\}$. O valor de Γ_i igual a $|J_i| = 5796$ é aquele que produz nestes experimentos a maior proteção possível em relação a violação da restrição e é, portanto, equivalente ao modelo de Soyster (1973). A escolha do valor de \hat{a}_{ij} foi fixada de maneira arbitrária em função da indisponibilidade de dados. Esses valores podem ser obtidos, do ponto de vista prático, por meio da experiência do gestor, a qual poderia ser utilizada para definir os limites mínimos e máximos de variação de cada parâmetro. Outra maneira, seria por intermédio de uma análise estatística de um conjunto de séries temporais contendo os valores de cada parâmetro em um determinado horizonte de tempo.

Em todos os testes a função objetivo foi inserida no modelo como restrição e avaliou-se a violação desta restrição em particular.

5.6.1 Resultados obtidos

Em todas as instâncias, percebe-se que quanto maior o fator de proteção gama, menor a probabilidade de violação das restrições. Entretanto, conforme se verifica na Tabela 5.10, a sequência dos valores de função objetivo não é monótona crescente, porque as soluções obtidas em cada teste não são ótimas. O gestor deve considerar aquelas soluções que produzem os maiores valores de função objetivo dentro de níveis admissíveis de violação. Desta forma, na primeira instância a solução obtida quando $\Gamma_i = 5000$ se mostra bastante adequada, pois produz o melhor valor de função objetivo e apresenta baixa probabilidade de que os valores reais dos parâmetros incertos façam com que a função objetivo exceda esse valor. Assim, mesmo que 5000 coeficientes da função objetivo variem $\pm 0,5$, a solução obtida permanecerá viável e não excederá o valor de 738.686. De modo semelhante, na segunda e terceira instâncias essas soluções são obtidas, respectivamente, quando $\Gamma_i = 1000$ e $\Gamma_i = 500$. Na segunda instância,

mesmo que 1000 coeficientes da função objetivo variem $\pm 0,5$, a solução obtida permanecerá viável e não excederá o valor de 969.175; enquanto na terceira instância a variação de 500 coeficientes nesse mesmo intervalo não fará com que a função objetivo seja maior que 1.289.757.

Tabela 5.10: Resultados computacionais considerando incertezas nos valores da função objetivo em um tempo computacional de 4 horas

Gama	Função objetivo em cada instância			Limite superior para a probabilidade violação da restrição
	1	2	3	
100	742.687	1.070.210	2.177.610	$9,67 * 10^{-2}$
200	739.460	1.370.580	2.310.714	$4,47 * 10^{-3}$
300	744.287	1.281.017	2.053.418	$4,27 * 10^{-5}$
500	1.051.966	1.503.304	1.289.757	$2,71 * 10^{-11}$
1000	1.150.210	969.175	1.988.193	$7,99 * 10^{-40}$
2000	841.047	1.174.337	1.499.955	$2,24 * 10^{-155}$
5000	738.686	1.166.096	1.802.757	$> 10^{-999}$
5796	848.729	1.070.616	2.004.114	$> 10^{-999}$

5.7 SUMÁRIO DOS EXPERIMENTOS

A Tabela 5.11 exibe um resumo dos principais resultados obtidos em cada experimento.

Tabela 5.11: Síntese dos resultados obtidos nos seis experimentos realizados

Experimento	Resultados obtidos
Primeiro	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Modelo PLIM proposto, com o uso da estrutura <i>Knapsack Cascading</i>, permitiu a obtenção de soluções viáveis para as três instâncias-base – o que não foi alcançado pela formulação anterior proposta por Pereira (2008); ✓ Pré-processamento do PLIM <i>Solver</i> permitiu que, em todas as três instâncias, houvesse uma redução de 16% no número de variáveis e de 8% no número de restrições; ✓ A heurística de pós-processamento conseguiu melhorar, na terceira instância, a solução obtida após a execução do modelo PLIM em 25%. ✓ A melhor solução obtida na primeira, segunda e terceira instâncias foram alcançadas respectivamente após, cerca de 15 minutos de execução do algoritmo, na primeira instância, duas horas na segunda e três horas na terceira; ✓ Uma comparação entre a solução obtida pelo modelo e a praticada pelo operador especializado em cada instância, indica a existência de diferenças significativas em relação ao valor obtido para a função objetivo, que chegam a 47% na primeira instância, 39% na segunda e 30% na terceira;
Segundo	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Foram encontradas soluções melhores que as obtidas no primeiro experimento, entretanto isso não ocorreu efetivamente pelo uso de sentidos diferentes daqueles utilizados nas instâncias-base, uma vez que nos sentidos modificados não houve bombeamento.

	<ul style="list-style-type: none"> ✓ A rede considerada opera, provavelmente, segundo o sentido ótimo de operação de seus dutos. ✓ Com o uso da heurística de fixação dos dutos (preprocessamento) foi possível encontrar soluções melhores que as obtidas sem preprocessamento na segunda e terceira instâncias.
Terceiro	<ul style="list-style-type: none"> ✓ A penalização do número de paradas implicou em um aumento significativo na função objetivo em relação as instâncias-base; ✓ Nas instâncias que consideram a existência de períodos de manutenção programada constata-se, na primeira delas, que foi obtida a mesma solução encontrada na instância-base correspondente, o que significa que o período de manutenção programada não afeta a quantidade enviada de produtos nos dutos que ficaram em manutenção. Na segunda instância foi possível encontrar uma solução melhor do que a solução obtida na instância base. Entretanto verifica-se um aumento significativo da função objetivo da terceira instância. ✓ A inserção de restrições de envio e recebimento resultou em valores de função objetivo piores que aqueles obtidos nas três instâncias-base, sendo que na terceira delas houve um aumento significativo (superior a 170%). Comportamento similar a esse, também é verificado quando se insere restrições pulmão, exceto na segunda instância, cujo valor da função objetivo foi ligeiramente menor. ✓ A existência de uma taxa mínima de bombeamento implica que nenhum duto poderá ficar ocioso e conseqüentemente incrementa os valores da função objetivo. Entretanto, esse aumento depende da quantidade obrigatória de bombeamento, uma vez que, esses valores são em geral utilizados nos limites mínimos, pois a função objetivo visa minimizar a quantidade total bombeada e a quantidade de total interfaces. Nas instâncias testadas evidenciou-se que o envio de bateladas consecutivas conduziu a melhores valores de função objetivo do que as instâncias em que se considera a possibilidade de envio não consecutivo.
Quarto	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Quando se minimiza exclusivamente a quantidade total bombeada foi possível encontrar a solução ótima em duas das três instâncias testadas, entretanto o número de interfaces foi bastante elevado. ✓ Na função objetivo que considera a maximização do volume total bombeado, obteve-se uma taxa de ocupação dos dutos de 97% em duas instâncias e de 99% na terceira instância, o que culminou em números bastante elevados de interfaces e bombeamentos no horário de pico. ✓ A minimização exclusiva do volume bombeado no horário de pico resultou em um único envio nesse horário na primeira instância, dois envios na segunda e quatro bombeamentos na terceira instância. Entretanto, os volumes bombeados são maiores nestas instâncias do que naquelas onde se considera a minimização do volume bombeado no horário normal e horário de pico. ✓ Quando se considera funções objetivo onde existe uma parcela relativa a número de interfaces, não foi possível encontrar a solução ótima.
Quinto	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Uma eventual substituição do óleo combustível por gás natural impactaria significativamente na programação da rede de dutos. Em termos de função objetivo existiria uma redução de custos de 36% na primeira instância, 12% na segunda e 33% na terceira, que ocorre principalmente pela redução da quantidade de interfaces, em função de se ter um produto a menos para se transportar. Houve ainda uma redução da taxa média de ocupação dos dutos, o que significa uma possibilidade real de incremento da demanda dos demais produtos transportados ou ainda o aluguel de dutos ociosos e daqueles em períodos em que não estiverem bombeando produto. ✓ A imposição da manutenção de um estoque de segurança por parte da agência reguladora implicou em aumentos na função objetivo, respectivamente de 1, 24 e 62% nas três instâncias testadas. Isso ocorre, pois para que se tenha tal estoque, o mais provável é o envio de produto para os locais onde o estoque seja insuficiente, o que implica em um possível aumento na quantidade de interfaces e do volume total bombeado e com conseqüente incremento na taxa média de ocupação dos dutos. ✓ A existência de uma possível redução da demanda de óleo combustível resultante de sua substituição pelo gás natural implicaria que os valores dos estoques finais desse produto nas refinarias REPLAN e REVAP seriam reduzidos, quando comparados com as instâncias-base. Além disso, esses valores seriam aumentados no porto de Santos em função da existência de um estoque inicial desse produto nessa base sem, entretanto, existência de uma demanda.

	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Uma eventual necessidade de se garantir estoques mínimos de segurança implicariam em um aumento na quantidade de LCO estocada ao final do horizonte de planejamento no terminal de São Caetano na segunda e terceira instância, mas seriam reduzidas as quantidades estocadas óleo combustível em Barueri nessas duas instâncias.
Sexto	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Em todas as instâncias, percebe-se que quanto maior o fator de proteção gama, menor a probabilidade de violação das restrições. ✓ A sequência dos valores de função objetivo não é monótona crescente, porque as soluções obtidas em cada teste não são ótimas. ✓ Na primeira instância a solução obtida quando $\Gamma_i = 5000$ se mostra bastante adequada, pois produz o melhor valor de função objetivo e apresenta baixa probabilidade de que os valores reais dos parâmetros incertos façam com que a função objetivo exceda esse valor. Assim, mesmo que 5000 coeficientes da função objetivo variem $\pm 0,5$, a solução obtida permanecerá viável e não excederá o valor de 738.686. ✓ Na segunda e terceira instâncias essas soluções são obtidas, respectivamente, quando $\Gamma_i = 1000$ e $\Gamma_i = 500$. Na segunda instância, mesmo que 1000 coeficientes da função objetivo variem $\pm 0,5$, a solução obtida permanecerá viável e não excederá o valor de 969.175; enquanto na terceira instância a variação de 500 coeficientes nesse mesmo intervalo não fará com que a função objetivo seja maior que 1.289.757.

6. FERRAMENTA DE VISUALIZAÇÃO GRÁFICA

“A técnica que não seduz é um guerreiro espartano que não motiva exército. Os professores – Leônidas contemporâneos – vivem diariamente esse desafio” – Erito Marques

Neste trabalho foi construída uma ferramenta para visualização dos resultados obtidos, a qual foi denominada VISDUT. Para seu desenvolvimento, inicialmente foram feitos estudos preliminares em 3D utilizando a técnica de *Box Modeling* com o objetivo de realizar a criação do desenho da rede de dutos. Essa técnica permite que um modelo seja criado a partir de modificações de uma forma primitiva, geralmente um cubo. Neste estágio, percebeu-se que a dificuldade de programação e de criação da realidade aumentada, aliada a falta de tempo e de recursos materiais constituiriam importantes obstáculos para a realização de um projeto dessa magnitude. Nesse contexto, optou-se por pela utilização da técnica de desenho isométrico, a qual foi desenvolvida no *software* AutoCAD. Após o término dessa etapa, o arquivo cad gerado, para que pudesse receber os elementos da programação em *Action Script* (Flash), foi exportado em formato Portable Document Format (PDF). O arquivo pdf foi aberto no *software* Corel Draw e em seguida exportado para o *software* Adobe Illustrator (AI). Esse passo foi necessário, pois a exportação direta do AutoCad para o AI apresentava algumas falhas após a conversão, as quais inviabilizavam a construção da etapa interativa. Após a criação da imagem da topologia da rede, o restante do desenvolvimento foi realizada em *Action Script* (AS).

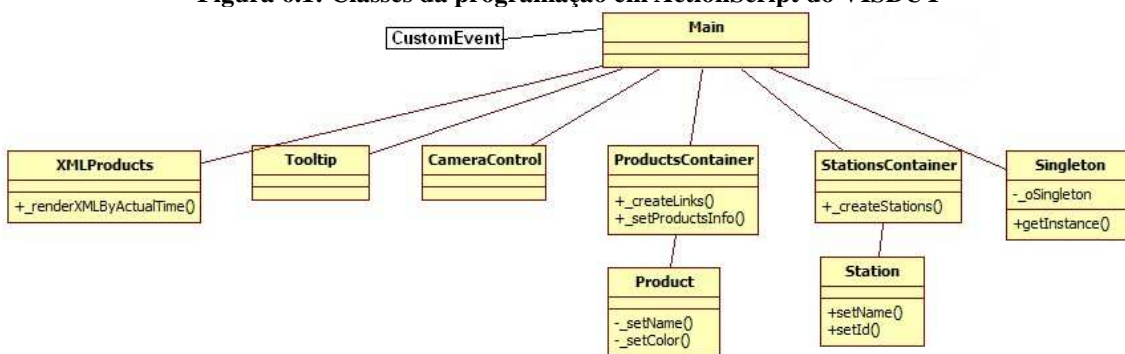
De acordo com o Guia de Referência da MACROMEDIA (2005), o *ActionScript* é a linguagem de *script* do *Flash*. Ela adiciona interatividade a um filme. Pode-se, por exemplo, configurar um filme de forma que eventos do usuário, como cliques, botões e uso de teclas ativem *scripts* que informem ao filme uma ação a ser executada. O *ActionScript* é uma linguagem de *script* orientada a objetos. Isso significa que as ações⁴ controlam os objetos quando ocorre algum evento. Nos *scripts* orientados a objetos, organiza-se esses objetos em grupos denominados classes. Além disso, pode-se usar as classes pré-definidas e/ou criar suas próprias classes. Ao criar uma classe, o

⁴ As ações são comandos que informam a um filme que faça algo enquanto é reproduzido.

programador define todas as propriedades (características) e todos os métodos (comportamentos) de todos objetos que ela criar, exatamente como os objetos reais são definidos. Nessa linguagem, o conceito de função é bastante útil, ele fornece um meio de agrupar, com um único nome, que é como um nome de atalho, um grupo de ações a serem executadas. Define-se um método como uma função associada a uma classe específica.

Para o desenvolvimento da programação do VISDUT em *ActionScript*, inicialmente os relatórios .csv gerados após a execução do pacote de otimização foram convertidos no formato PHP, a partir do qual foi gerado um XML para leitura dos dados a respeito da rede dutoviária. Isso foi necessário, porque esse XML dinâmico depende da instância que tenha sido rodada no XPRESS-MP. O programa em *ActionScript* é composto por 10 classes, conforme se verifica na Figura 6.1. A descrição detalhada de cada classe é dada no APÊNDICE G.

Figura 6.1: Classes da programação em ActionScript do VISDUT



O VISDUT permite que o programador visualize quais produtos estão sendo enviados em cada período de tempo em cada duto da rede. Ele possui em sua parte superior um contador que indica o período de tempo considerado. Caso o usuário queira, ele pode digitar um tempo específico para que seja exibida a configuração em cada duto; caso contrário, o tempo será incrementado a cada segundo. Além disso, o usuário tem a opção de avançar ou pausar caso lhe seja conveniente. Os retângulos menores indicam os terminais enquanto os maiores representam as refinarias. O usuário pode facilmente verificar os nomes de cada um deles, bastando passar com o *mouse* sobre qualquer um deles, que seu respectivo nome será exibido. Cada duto é dividido em trechos e cada trecho é preenchido por uma cor que indica o produto contido dentro do duto. O gasóleo para craqueamento foi representado na cor marrom, LCO na cor azul,

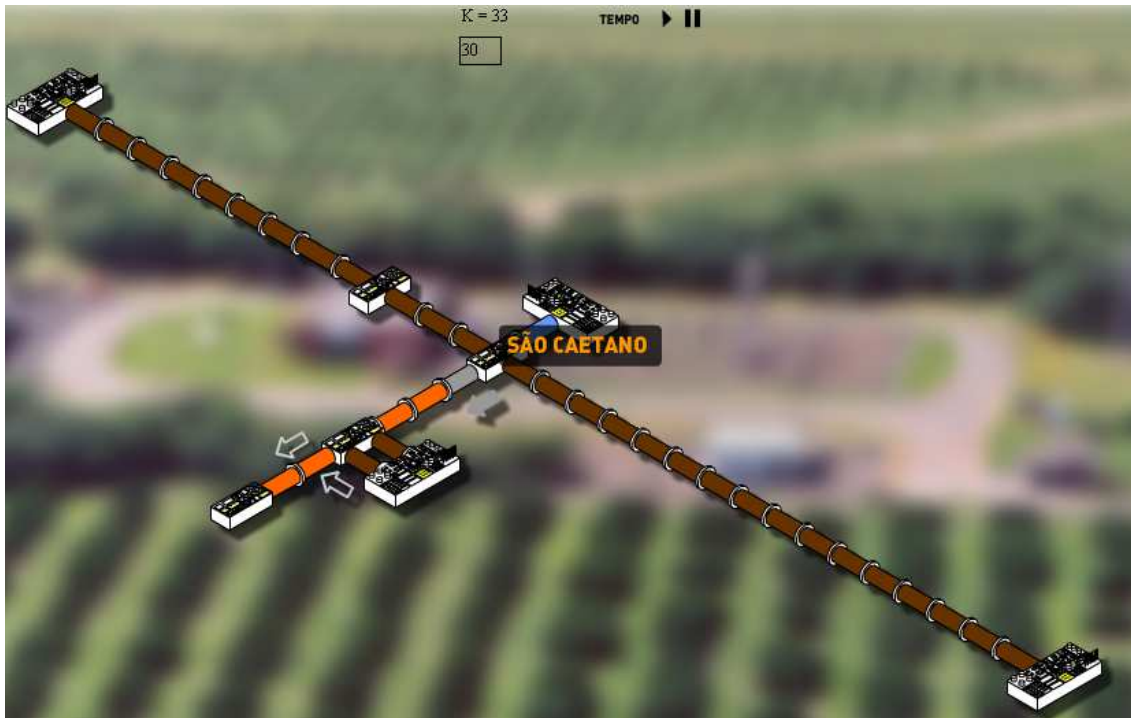
bunker na cor laranja, óleo combustível de exportação marrom claro e óleo combustível cinza escuro. Essas particularidades são exibidas na Figura 6.2.

Figura 6.2: Ferramenta de visualização gráfica dos dutos (VISDUT)



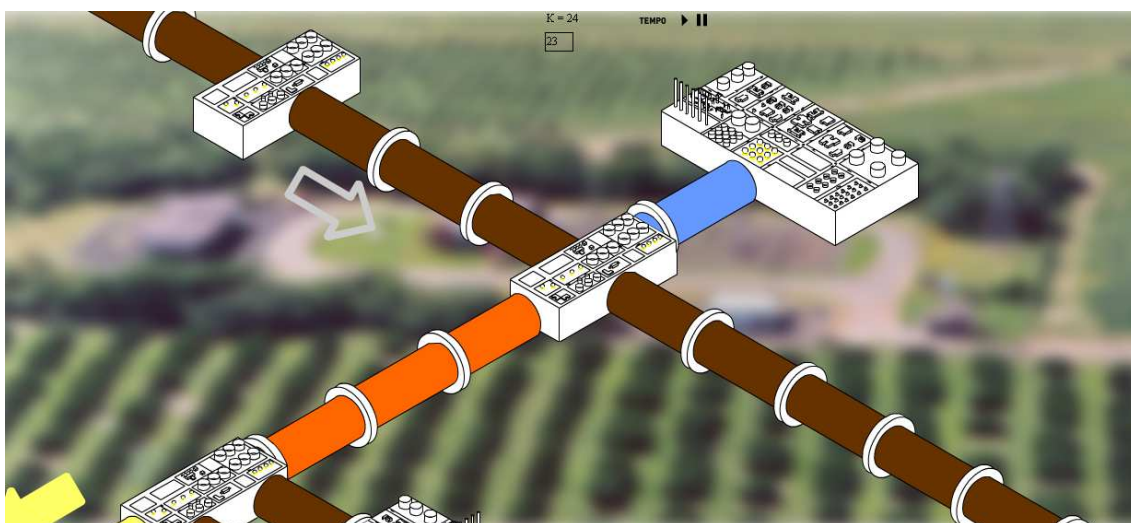
A ocorrência de uma seta cinza nas proximidades de uma refinaria ou terminal indica que houve envio de um produto. Quando essa seta estiver totalmente hachurada com a cor do produto enviado, significa que houve uma contaminação (interface) entre o produto enviado e aquele contido no primeiro trecho do duto por ocasião do envio. Essa situação é exibida na Figura 6.3, após o envio de óleo combustível do terminal de São Caetano para o terminal de Cubatão no tempo 33. Essa interface foi representada por uma seta hachurada na cor cinza.

Figura 6.3: Visualização da ocorrência de interfaces no VISDUT



Além disso, o usuário conta com a possibilidade aumentar o *zoom* em uma área de interesse, bastando, para tal, apenas um duplo clique. Nesse caso, o usuário pode, exemplo, acompanhar a movimentação em um duto particular, conforme se visualiza na Figura 6.4. Uma apresentação completa do VISDUT pode ser encontrada em <http://www.youtube.com/watch?v=I2ywGpPsfWY>.

Figura 6.4: Exemplo de zoom em áreas de interesse



7. CONCLUSÕES

“De fato, se desejamos escapar à crença de que esse mundo assim apresentado é verdadeiro, e não queremos admitir a permanência de sua percepção enganosa, devemos considerar a existência de pelo menos três mundos num só. O primeiro seria o mundo tal como nos fazem vê-lo: a globalização como fábula; o segundo seria o mundo tal como ele é: a globalização como perversidade; e o terceiro o mundo como ele pode ser: uma outra globalização” – Milton Santos

Neste trabalho foi apresentado um modelo matemático para obtenção de soluções viáveis para problemas de transporte em rede de dutos. Ele possui uma estrutura particular denominada *Knapsack Cascading* e foi testado em três instâncias reais de uma rede multiproduto composta por 4 terminais, 4 refinarias e 8 dutos unidirecionais, considerando-se um horizonte de planejamento de uma semana. A modelagem proposta permitiu que fossem encontradas soluções viáveis, as quais no modelo anterior proposto por Pereira (2008) não foram possíveis nem mesmo após um tempo de execução de 24 horas. Além disso, os resultados obtidos nas três instâncias indicaram um ganho significativo em relação as soluções praticadas pelo operador técnico responsável pela programação, chegando a 47% na primeira instância. Foi desenvolvida também uma heurística de pós-processamento, a qual é baseada em Programação Linear Inteira. Basicamente, ela consiste em fixar os produtos enviados nos dutos com menor quantidade de interfaces e rodar novamente o modelo matemático. A ideia é diminuir o número de interfaces nos dutos com maior quantidade de interfaces. Ela foi testada por um período de 30 minutos nas três instâncias e em uma delas conseguiu-se uma melhoria de 25%. A análise dos resultados obtidos fazendo uso de Gráficos de Gantt, permitem uma avaliação dos dutos com maior ocorrência de interfaces, a existência de ociosidades, bem como possíveis pontos onde a demanda pode ser aumentada ou se os dutos ociosos não poderiam ser alugados a empresas concorrentes.

Outra contribuição importante foi a de avaliação de possíveis mudanças nos sentidos dos dutos, as quais podem revelar outras possibilidades de utilização de sentidos de dutos, que podem não ser percebidas pela equipe técnica operacional. Principalmente, em outras instâncias que considerem, por exemplo, mudanças nos parâmetros utilizados para estoques, demandas ou produção. Além disso, com o uso da

heurística de fixação dos dutos (pré-processamento) foi possível melhorar o desempenho do algoritmo em algumas instâncias. De maneira similar, a possibilidade de inserção de outras particularidades no modelo matemático, a possibilidade de escolha de diferentes tipos de função objetivo e a inclusão de incerteza em alguns parâmetros dão ao gestor um maior controle sobre o processo e lhe permite realizar uma melhor programação. Os experimentos a respeito do estoque mínimo e sobre a substituição do estoque mínimo permitem que sejam vislumbradas possibilidades de atendimento de duas importantes demandas da sociedade. A primeira delas é de caráter legislativo e tem como objetivo o atendimento de limites de estoque impostos pela legislação em vigor. A segunda, tem um caráter social, visto que tal substituição visa reduzir os impactos relacionados ao consumo energético através do uso de energias ditas mais limpas.

Além disso, foram feitos experimentos considerando a existência de alguns parâmetros estocásticos – nesse caso, foi aplicado em problemas de programação de redes de dutos, de modo pioneiro, o modelo de otimização robusta proposto por Bertsimas e Sim (2004). A ferramenta computacional desenvolvida em *ActionScript* VISDUT se mostrou de grande valia com relação ao objetivo de proporcionar uma melhor visualização da programação obtida após a resolução do modelo matemático.

Trabalhos futuros devem incluir a indicação de caminhos para obtenção de soluções de qualidade em um tempo computacional aceitável em redes de dutos de maior porte. Além disso, outras situações particulares da dinâmica real de operação de uma rede podem ser modeladas, como hipóteses de densidades variáveis dos produtos quando bombeados ao longo de um duto e a possibilidade de reversões. Variações na densidade tornam, em geral, o modelo não linear, enquanto as reversões em dutos implicam em uma provável duplicação da quantidade de variáveis no modelo, mas permitem que se encontrem outras possibilidades de envio no sentido reverso que permitam reduzir ainda mais os custos logísticos. De maneira similar, as paradas em dutos quando associadas a probabilidade de falha em um determinado trecho ou incertezas associadas aos parâmetros considerados no modelo devem ser traduzidas no desenvolvimento de um modelo estocástico. Todas essas situações trazem no seu bojo o desafio de aumento na complexidade e porte do modelo matemático, e refletem indubitavelmente a relevância que esse tema vem adquirindo no debate contemporâneo a respeito da indústria petrolífera.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADOBE SYSTEMS, (2008) Programação do ADOBE *ActionScript* 3.0.

ALVES, V.R.F.M. (2007). Programação de transferência de derivados de petróleo em rede dutoviária usando algoritmo genético. Programa de Engenharia de Produção, Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ.

AMIRAGOV, K.A., NURIEV, F.S. (1970). Algorithm for operative control of pumping in a multiproduct pipeline. *Avtomatika i Telemekhanika*, 8, pp. 119-126.

ANP, (2009a). Resolução número 42 de 16.12.2009, DOU 17.12.2009, disponível em: <http://www.recap.com.br/pdfs/portarias/anp42.pdf>

ANP, (2009b). Anuário Estatístico Brasileiro de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis de 2009, disponível em <http://www.anp.gov.br/>.

ANP, (2010). Anuário Estatístico Brasileiro de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis de 2010, disponível em <http://www.anp.gov.br/>.

ASSIS, E.L.B. (2002) Otimização das operações de distribuição de uma malha dutoviária, Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo.

SOUZA FILHO, E. M., BAHIENSE, L., LIMA, L. S., FERREIRA FILHO, V. J. M. (2008). Exact and heuristic approach to multiproduct pipeline scheduling problem In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, João Pessoa. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.

BEN-TAL, A., NEMIROVISKY, A. (2000) Robust solutions of linear programming problem contaminated with uncertain data, *Mathematical Programming*, 88, 411-424.

BENZECRY, R.B. (2010). Otimização da movimentação de petróleo: aplicação ao sistema terminal duto refinaria. Departamento de Engenharia Industrial, Dissertação de Mestrado. PUC-RJ.

BERTSIMAS, D., SIMS, M. (2004) The price of robustness, *Operations Research*. 52, 35-53.

BOSCHETTO, S. N. (2006). Otimização da operações de terminais petrolíferos usando técnicas de pré-processamento, *Dissertação de Mestrado*, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

BOSCHETTO, S.N, FELIZARI, L.C, YAMAMOTO, L., MAGATÃO, L., NEVES-JR, F., ARRUDA, L.V.R., LÜDERS, R., RIBAS, P.C., BERNARDO, L.F.J. (2008) An integrated framework for operational scheduling of a real-world pipeline network, 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE.

BOSCHETTO, S.N, NEVES-JR, F., (2009) Modelos PLIM para temporização das operações de transferência e estocagem de derivados de petróleo em redes de dutos, 5^o Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás (PDPETRO).

BRACONI, V. M. (2002). Heurísticas multifluxo para roteamento de produtos em redes dutoviárias. Departamento de Informática Rio de Janeiro, RJ, Brasil., PUC-Rio. *Dissertação de Mestrado*.

CAFARO, D. C. e. CERDÁ., J. (2004). Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete PLIM formulation. *Computers & Chemical Engineering* v.28, n.10: pp.2053-2068.

CAFARO, D., CERDÁ, J. (2005) Multiperiod planning of multiproduct pipelines. *European Symposium on Computer Aided Process Engineering* - 15.

CAFARO, D. C., CERDÁ, J. (2008). Dynamics scheduling of multiproduct pipelines with multiples delivery dates. *Computers and Chemical Engineering*, 32, 728-753.

CAFARO, D., CERDÁ, J. (2009) Optimal scheduling of refined products pipelines with multiples sources, *Industrial Engineering Chemical Research*, 48, 6675-6689.

CAFARO, D.C., CERDÁ, J. (2010) Operational scheduling of refined products pipeline networks with simultaneous batch injections, *Computers and Chemical Engineering*, 34, 1687-1704.

CAMPONOGARA, E. (1995). A-Teams para um problema de transporte de derivados de petróleo. Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação. Campinas, SP, Brasil, UNICAMP. Dissertação de Mestrado.

CIRÉ, A.A. (2008) Modelos computacionais para o escalonamento de tarefas em rede de dutos, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, São Paulo.

CNP, Resolução nº 3, DE 13.1.1981 - 1.874ª SESSÃO ORDINÁRIA - DOU 4.2.1981. Dispõe sobre o armazenamento mínimo e o estoque de segurança de petróleo e de seus derivados, disponível em:

http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/folder_resolucoes/resolucoes_cnp/1981/rcnp%203%20-%201981.xml

CRANE, D. S., WAINWRIGHT, R.L. e SCHOENEFELD, D.A. (1999). Scheduling of multi-product fungible liquid pipelines using genetic algorithms. *Proceedings of the 1999 ACM Symposium on Applied Computing*, San Antonio, Texas, USA, March.

DE LA CRUZ, J. M., HERRAN-GONZÁLEZ, A., RISCO-MARTÍN, J.L. e ANDRÉSTORO, B. (2005). Hybrid heuristic and mathematical programming in oil pipelines networks: Use of immigrants. *Journal of Zhejiang University SCIENCE* v.6A, n.1: pp.9-19.

DE LA CRUZ, J. M., DE ANDRÉS-TORO, B., HERRAN, A., PORTA, E.B. e BLANCO, P.F. (2003). Multiobjective optimization of the transport in oil pipelines networks *Proceedings of the IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2003)*, Lisboa, Portugal, September.

FELIZARI, L. C. (2009) . Programação das operações de transporte de derivados de petróleo em redes de dutos. Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

FELIZARI, L.C., ARRUDA, L.V, LÜDERS, R., STEBEL, S.L. (2009) Sequencing batches in a real-world pipeline network using constraint programming, 10th International Symposium on Process Systems Engineering (PSE), v.27, 303-308.

HANE, C. A. e. RATLIFF, H.D. (1995). Sequencing inputs to multi-commodity pipelines. *Annals of Operations Research* v.57, n.1: pp.73-101.

HASSIMOTTO, M.K., (2007) Otimização da programação de curto prazo de um duto bidirecional de derivados de petróleo, Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo.

HERRÁN, A., De la CRUZ, J. M, De ANDRÉS, B. (2010). A mathematical model for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system. *Computers and Chemical Engineering*, 34, 401-413.

JITTAMAI, P. (2004). Analysis of oil-pipeline distribution of multiple products subject to delivery time-windows. College Station. Texas, USA., Texas A&M University. Ph.D. Thesis.

LEE, H., PINTO, J. M., GROSSMAN, I. E., PARK, S. Mixed-integer linear programming model for refinery short-term scheduling of crude oil unloading with inventory management. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v.35, n.5, p.1630 - 1641. 1996.

LIPORACE, F. D. S. (2005). Planejadores para transporte em polidutos. Departamento de Informática. Rio de Janeiro, RJ, Brasil., PUC-Rio. Tese de Doutorado.

LOPES, T. M. T., CIRÉ, A. A., de SOUZA, C. C., MOURA, A. V. (2010) A hybrid model for a multiproduct pipeline planning and scheduling problem. *Constraints* (Dordrecht), v. 15, p. 151-189.

KIRA, G., LARA, L.G., FELIZARI, L.C, STEBEL,S.L, BOSCHETTO, S.N, MAGATÃO, L., ARRUDA, L.V.R, BETTONI, L.M.M, FABRO, J.A, RIBAS, P.C. (2010) *Scheduling* das operações de transporte de derivados de petróleo em um poliduto com múltiplas sangrias, Rio Oil and Gas Conference.

MACROMEDIA, (2005) Guia de Referência do *ActionScript*.

MAGATÃO, L., ARRUDA, L.V.R. e NEVES-JR., F. (2004). A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline. *Computers & Chemical Engineering* v.28, n.1-2, pp.171-185.

MAGATÃO, L., ARRUDA, L.V.R, NEVES-JR, F. (2008) Um modelo híbrido (CLP-PLIM) para *scheduling* de operações em polidutos, *Pesquisa Operacional*, v. 28, n.3, 511-543.

MARCELLINO, F. J. M. (2006). Solução do problema de transporte de derivados de petróleo em oleodutos através de um modelo de satisfação de restrições distribuído com otimização. Área de Informática. São José dos Campos, SP, Brasil, Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Dissertação de Mestrado.

MÁS, R. (2001). Otimização de Programação de Suprimento de Petróleo. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo.

MÁS, R. e. PINTO, J.M. (2003). A mixed-integer optimization strategy for oil supply in distribution complexes. *Optimization and Engineering* v.4, n.1: pp.23-64.

MAZZEI, T. B. (2007). Um enfoque logístico para massificação do uso do gás natural. Projeto de Fim de Curso, Departamento de Engenharia de Industrial, Curso de Engenharia de Produção, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

NEVES-JR, F., MAGATÃO, L., BOSCHETTO, S.N, FELIZARI,L.C, CZAIKOWSKI, D.N, ROCHA, R., RIBAS, P.C. (2007) An efficient approach to the operational scheduling of a real-world pipeline network, 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE, v.24, 697-702, Amsterdam.

MILIDIÚ, R. L., PESSOA, A.A., BRACONI, V., LABER, E.S., REY, P.A. (2001). Um algoritmo Grasp para o problema de transporte de derivados de petróleo em oleodutos. Anais do XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Campos do Jordão, SP, Brasil.

MILIDIÚ, R. L., PESSOA, A.A. e LABER, E.S. (2002). Pipeline transportation of petroleum products with no due dates. Proceedings of 5th Latin American Symposium on Theoretical Informatics (LATIN 2002), Cancun, Mexico, April.

MILIDIÚ, R. L., LIPORACE, F.D.S. (2003). Planning of pipeline oil transportation with interface restrictions is a difficult problem. PUC-Rio, Inf.MCC56/03. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MILIDIÚ, R. L., PESSOA, A.A. e LABER, E.S. (2003). The complexity of makespan minimization for pipeline transportation. Theoretical Computer Science v.306, n.1-3: pp.339-351.

MILIDIÚ, R. L., LIPORACE, F.D.S. e LUCENA, C.J.P.D. (2003b) Pipesworld: planning pipeline transportation of petroleum derivatives. Proceedings of ICAPS'03 Workshop on the Competition: Impact, Organization, Evaluation, Benchmarks, Trento, Itália, June.

MIRHASSANI, S.A., GHORBANALIZADEH, M. (2008) The multiproduct pipeline scheduling system, Computers and Mathematics with Applications, 56, 891-897.

MIRHASSANI, S.A., JAHROMI, H.F. (2011) Scheduling multi-product tree-structure pipeline, Computers and Chemical Engineering, 35, 165-176.

MORI, F.M., LÜDERS, R., ARRUDA, L.V.R., YAMAMOTO, L., BONACIN, M.V, POLLI, H.L., AIRES, M.C., BERNARDO, L.F.J. (2007) Simulating the operational scheduling of real-world pipeline network, 17th European Symposium on computer Aided Process Engineering – ESCAPE.

MOURA, A. V., de SOUZA, C. C., CIRÉ, A. A., LOPES, T. M. T., (2008a) Planning and Scheduling the Operation of a Very Large Oil Pipeline Network. Proceedings of the 14th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, Sidney, Heidelberg : Springer, 2008. v. 5202. p. 36-51.

MOURA, A. V., de SOUZA, C. C., CIRÉ, A. A., LOPES, T. M. T., (2008b) Heuristics and Constraint Programming Hybridizations for a Real Pipeline Planning and Scheduling Problem. Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE-08), São Paulo, Brazil, p. 455-462.

MURTA, A. L. S., (2003) Subsídios para o Desenvolvimento de Estudos de Impactos Ambientais para o Transporte Dutoviário, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia – IME.

NEIRO, S. M. S. e. PINTO, J.M. (2004). A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains. Computers & Chemical Engineering v.28, n.6-7: pp.871-896.

PEREIRA, B.C. (2008). Programação de transferência de derivados de petróleo em rede dutoviária: uma análise exata via *branch-and-bound*. Programa de Engenharia de Produção, Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ.

PESSOA, A. A. (2003). Dois problemas de otimização em grafos: Transporte em redes de dutos e Busca com custos de acesso. Departamento de Informática. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, PUC-Rio. Tese de Doutorado.

PINTO, J. M., JOLY, M. e MORO, L.F.L. (2000). Planning and scheduling models for refinery operations. Computers & Chemical Engineering, v.24, n.9-10: pp. 2259-2276.

REJOWSKI JR., R. (2001). Programação de distribuição dutoviária de derivados de petróleo. Departamento de Engenharia Química. São Paulo, SP, Brasil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado.

REJOWSKI JR., R. e. PINTO, J.M. (2003). Scheduling of a multiproduct pipeline system. Computers & Chemical Engineering v.27, n.8-9: pp.1229-1246.

REJOWSKI JR., R. e. PINTO, J.M. (2004). Efficient PLIM formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling. Computers & Chemical Engineering v.28, n.8: pp.1511-1528.

REJOWSKI JR, R. (2007). Otimização da programação de operações dutoviárias: formulações eficientes e considerações hidráulicas. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo.

REJOWSKI JR., R., PINTO, J.M. (2008) . A continuous time representation for scheduling of pipeline systems with pumping yield rate constraints, *Computers & Chemical Engineering*, 32, pp. 1042–1066.

RELVAS, S., MATOS, H. A., BARBOSA-PÓVOA, A.P.F.D, FIALHO, J., PINHEIRO, A. S. (2006). Pipeline scheduling and inventory management of a multiproduct distribution oil system. *Industrial Engineering and Chemical Research*, 45, 7841-7855.

RELVAS, S., MATOS, H. A., BARBOSA-PÓVOA, A.P.F.D, FIALHO, J. (2007). Reactive scheduling framework for a multiproduct pipeline with inventory management. *Industrial Engineering and Chemical Research*, 46, 5659-5672.

RELVAS, S., MATOS, H.A, BARBOSA-PÓVOA, A.P.F.D, FIALHO, J. (2008). Oil products pipeline scheduling with tank farm inventory management. 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering - ESCAPE. .

RELVAS, S., BARBOSA-PÓVOA, A.P.F.D, MATOS, H. A. (2009). Heuristic batch sequencing on a multiproduct oil distribution system. *Computers and Chemical Engineering*, 33, 712-730.

ROCHA, R., (2010). Petroleum supply planning: models, reformulations and algorithms. Tese de doutorado, Departamento de Informática, Pontífice Universidade Católica do Rio de Janeiro.

SANCHÉZ, A. G. (2007). Programación del transporte de hidrocarburos por oleoductos mediante la combinación de técnicas metaheurísticas y simulación. Tese de doutorado, Universidade Politécnica de Madri.

SÁNCHEZ, A. G., MIER, M. O. (2005). Programación de oleoductos: presentación del problema y revisión de enfoques. In: Anales del IX Congreso de Ingeniería de Organización (CIO 2005), pp. 10, Gijón, Espanha, Setembro

SANGINETO, M. L. T. (2006). Um algoritmo genético para a programação de transferências em um poliduto. Programa de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. COPPE/UFRJ. Dissertação de Mestrado

SASIKUMAR, M., RAVI PRAKASH, P., PATIL, S.M. e RAMANI, S. (1997). Pipes: A heuristic search model for pipeline schedule generation. Knowledge-Based Systems v.10, n.3: pp.169-175.

SHAH, N. (1996). Mathematical programming techniques for crude oil scheduling. Computers & Chemical Engineering v.20, n.Supplement 2: pp.S1227-S1232.

SOUSA, C. J. N. (2010). Avaliação da capacidade logística de uma rede duto-rodoviária de distribuição de derivados de petróleo utilizando simulação por eventos discretos. Programa de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, COPPE/UFRJ. Dissertação de Mestrado.

SOUZA FILHO, E. M. (2007). Variable Neighborhood Search (VNS) aplicado ao problema de distribuição dutoviária. Programa de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, COPPE/UFRJ. Dissertação de Mestrado.

SOYSTER, A. L. (1973). Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. Operations Research, 21, 1154-1157.

TRANSPETRO, (2011). Atividades: O que fazemos, disponível em: <http://www.transpetro.com.br>

TECHO, R. e HOLBROOK, D.L. (1974). Computer Scheduling the World's Biggest Product Pipeline. Pipeline and Gas Journal, 4, 27.

VEIGA, S. L. (2006). Modelo hierarquizado para scheduling de suprimento de petróleo, Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

WESTPHAL, H. (2006). Algoritmo Genético aplicado à otimização multiobjectivo em redes de distribuição de petróleo e derivados. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

YAMAMOTO, L., ARRUDA, L. V. R., LIBERT, N., (2007a). Estudo comparativo de várias metaheurísticas aplicadas ao sequenciamento de bateladas em redes dutoviárias. In: XXXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, v. 1, pp. 1506-1517.

YAMAMOTO, L., ARRUDA, L. V. R., LIBERT, N., (2007b). Sequenciamento de bateladas em scheduling usando otimização multiobjectivo. 4º PDPETRO, Campinas, SP.

APÊNDICE A: Informações complementares com relação a literatura a respeito de programação dutoviária em um único duto

Autor(es)	Ano	Função objetivo	Outras informações
Amiragov e Nuriev	1970	Minimização das perdas devido a mistura de produtos (interfaces)	Uso de tempos críticos de fornecimento e limites máximos de bombeamento; bombeamento de três produtos distintos
Techo Holbrook	1974	Minimização da quantidade de interfaces	Uso de planilhas
Hane e Ratliff	1995	Minimização do número de vezes que o duto retorna à vazão normal	Uso de um conjunto de ordens de serviço cíclicas no tempo; considera custos de bombeamento
Shah	1996	Minimização da quantidade de material restante nos tanques	Considera quatro tipos de petróleo, duas torres de destilação, sete tanques na refinaria e oito tanques no porto.
Sasikumar <i>et al.</i>	1997	Uso de penalidades incorporadas à função heurística de avaliação, como o fornecimento dos produtos a todos os destinos e a minimização de paradas	Considera um sistema composto por uma refinaria e três destinos que transporta quatro tipos de produto com a utilização de um produto selante
Pinto <i>et al.</i>	2000	Otimização do gerenciamento de estoque de petróleo para uma refinaria, distribuição em uma refinaria com várias unidades de processamento e scheduling de produção de óleo combustível e asfalto	Considera custos de interface e o gerenciamento de operações de mistura, armazenamento e distribuição
Rejowski	2001	Minimização dos custos de estoque, bombeamento e de interface dos produtos	Considera uma refinaria que distribui gasolina, óleo diesel, GLP e querosene de aviação para cinco bases de distribuição. O modelo incorpora restrições de operação como balanço de massa, demanda de produtos, restrições de capacidade e restrições de sequenciamento de produtos
Rejowski	2003	Minimização dos custos de estoque, bombeamento e de interface dos produtos	Considera uma refinaria que distribui gasolina, óleo diesel, GLP e querosene de aviação para cinco bases de distribuição. O modelo incorpora restrições de operação como balanço de massa, demanda de produtos, restrições de capacidade e restrições de sequenciamento de produtos
Cafaro e Cerdá	2004	Minimização dos custos de estoque, de interface dos produtos e de bombeamento, podendo incluir custos mais altos de bombeamento nos períodos de pico.	Considera restrições, como balanço de massa, níveis permitidos nos tanques, restrições de sequenciamento de produtos e a inserção de selos para evitar interfaces não desejáveis.
Jittamai	2004	Minimização da violação das janelas de tempo	Prova de NP-Completo do problema tratado e geração aleatória de instâncias
Magatão <i>et al.</i>	2004	Minimização do custo operacional	Considera um oleoduto que gasolina, diesel, querosene, álcool e gás liquefeito de petróleo (GLP); foram inseridas as restrições de armazenamento, de sequências de bombeamento, de determinação da taxa de fluxo e outras restrições operacionais
Rejowski e Pinto	2004	Minimização dos custos de estoque, bombeamento e de interface dos produtos	Considera uma refinaria que distribui gasolina, óleo diesel, GLP e querosene de aviação para cinco bases de distribuição. O modelo incorpora restrições de operação como balanço de massa, demanda de produtos, restrições de capacidade e restrições de sequenciamento de produtos
Cafaro e Cerdá	2005	Minimização dos custos de estoque, bombeamento e de interface dos produtos	Considera um duto que envia quatro produtos distintos a cinco terminais; avalia a manutenção dos estoques em níveis aceitáveis
Relvas <i>et al.</i>	2006	Minimização do da quantidade de produtos transportados e da quantidade total de produto em estoque ao final do horizonte de planejamento	Explora a gestão de estoques no fim da cadeia para que o escalonamento incorpore, além das demandas do mercado, restrições de estocagem, como por exemplo, aquelas relacionadas ao período de liquidação de cada lote (<i>settling periods</i>)
Relvas <i>et al.</i>	2007	Minimização da diferença entre a quantidade	Contemplam a inserção de variáveis de fluxo, paradas

<i>al.</i>		total de produto transportado pelo duto e a quantidade total ofertada aos clientes e maximização do tempo total de bombeamento	nos dutos e situações imprevistas
Sangineto	2006	Minimização da energia	Considera um oleoduto que transporta cinco tipos de produtos, de uma refinaria a cinco terminais; foram utilizadas restrições de compatibilidade de produtos, de capacidade de armazenamento, atendimento a demanda e estocagem, além de custos de bombeamento, interface e estocagem.
Hassimoto	2007	Minimização dos custos de estoque, bombeamento e de interface dos produtos e penalização dos estoques fora de uma determinada faixa de operação	Considera restrições de balanço de materiais e restrições de negócio
Rejowski	2007	Minimização dos custos de estoque, bombeamento e de interface dos produtos e penalização na função objetivo dos estoques fora de uma determinada faixa de operação	Incorpora considerações hidráulicas
Souza Filho	2007	Minimização dos custos operacionais	Considera uma refinaria que transporta cinco produtos para cinco locais; contempla custos de bombeamento, de estocagem, de interface, de exceder a capacidade nas bases e de envio de produto no horário de pico e de não atendimento da demanda
Souza Filho <i>et al.</i>	2008	Minimização dos custos operacionais	Considera uma refinaria que transporta cinco produtos para cinco locais; contempla custos de bombeamento, de estocagem, de interface, de exceder a capacidade nas bases e de envio de produto no horário de pico e de não atendimento da demanda
Cafaro e Cerdá	2008	Minimização do custo total de operação	Considera um duto que envia quatro produtos distintos a cinco terminais; avalia a manutenção dos estoques em níveis aceitáveis
Magatão <i>et al.</i>	2008	Minimização do custo operacional	Uso de um módulo principal, um módulo para cálculo de janelas de tempo (pré-processamento), um módulo auxiliar (módulo de tancagem) e uma base de dados, a qual recebe as informações vindas dos demais blocos e as disponibiliza para o modelo principal
MirHassani e Ghorbanalizadeh	2008	Minimização do número total de interfaces	Foram conduzidos dois estudos de caso em consideram um duto ramificado, que transporta quatro ou três tipos de produtos distintos
Rejowski e Pinto	2008	Minimização dos custos de estoque, bombeamento e de interface dos produtos	Incorpora considerações hidráulicas
Relvas <i>et al.</i>	2008	Minimização do balanço entre produção e demanda nos tanques, maximização do uso do duto e maximização do produto cujo estoque final tem o menor valor	Explora a gestão de estoques no fim da cadeia para que o escalonamento incorpore, além das demandas do mercado, restrições de estocagem, como por exemplo, aquelas relacionadas ao período de liquidação de cada lote (<i>settling periods</i>); considera os tanques de maneira individualizada
Relvas <i>et al.</i>	2009	Maximização do tempo de bombeamento, do volume bombeado, do estoque final e do produto cujo estoque final tem o menor valor e minimização do balanço entre oferta e demanda	Explora a gestão de estoques no fim da cadeia para que o escalonamento incorpore, além das demandas do mercado, restrições de estocagem, como por exemplo, aquelas relacionadas ao período de liquidação de cada lote (<i>settling periods</i>)
Benzecry	2010	Minimização de custos operacionais	Considera restrições de capacidade, disponibilidade de petróleo, manutenção dos estoques e bombeio durante o horário de ponta
MirHassani e Jahomi	2011	Minimização dos custos de estoque, de interface dos produtos e de bombeamento, podendo incluir custos mais altos de bombeamento nos períodos de pico	Considera restrições, como balanço de massa, níveis permitidos nos tanques, restrições de sequenciamento de produtos e a inserção de selos para evitar interfaces não desejáveis

APÊNDICE B: Informações complementares com relação a literatura a respeito de programação dutoviária em redes de dutos

Autor(es)	Ano	Função objetivo	Outras informações
Camponogara	1995	Minimização de inviabilidade	Uso de estratégia de decomposição do problema em três problemas menores: a geração das operações de transporte (<i>jobs</i>), a escolha da rota entre a base produtora e a consumidora de cada <i>job</i> e a programação das operações ; uso de restrições de demanda, de capacidade e restrições de sequenciamento de produtos
Crane <i>et al.</i>	1999	Otimização de metas pré-determinadas para o nível de cada tanque de armazenagem	Considera uma rede de dutos com a topologia de uma árvore direcionada com oito terminais e dois produtos
Más e Más e Pinto	2001	Minimização de custos operacionais com penalização de interfaces	Considera o <i>scheduling</i> de curto prazo em complexos contendo portos, refinarias e uma infraestrutura de oleodutos unidirecionais capaz de transferir petróleo dos portos para as refinarias; testes foram feitos em um complexo contendo um porto, quatro refinarias e duas subestações, treze petroleiros, quatro píeres e quatorze tipos de petróleo
Milidiú <i>et al.</i>	2001	---	Uso de estratégia de decomposição do problema em três problemas menores: a geração das operações de transporte (<i>jobs</i>), a escolha da rota entre a base produtora e a consumidora de cada <i>job</i> e a programação das operações ; uso de restrições de demanda, de capacidade e restrições de sequenciamento de produtos
Assis	2002	Maximização da ocupação do sistema ou minimização das quantidades transportadas.	Considera uma rede composta por quatro refinarias e dez terminais, na qual são transportados gasolina, óleo diesel e querosene de aviação; uso de dutos bidirecionais
Braconi	2002	---	Considera uma rede de dutos bidirecionais; uso de restrições de sequenciamento de produtos, de capacidade de armazenamento dos tanques
Milidiú <i>et al.</i>	2002	Minimização de uma função de custo de operações ou minimização do <i>makespan</i>	Obtenção de resultados teóricos
De la Cruz <i>et al.</i>	2003	Minimização do número de interfaces e do tempo final para realizar a entrega de todas as demandas com penalização de restrições	Considera uma rede que transporta quatro tipos de produtos de dois terminais fontes para três terminais de destino, passando por dois terminais intermediários; apenas um duto da rede é bidirecional; são considerados prazos de entrega para as demandas e restrições de capacidade e de colisão nos dutos bidirecionais.
Más e Más e Pinto	2003	Minimização de custos operacionais com penalização de interfaces	Considera o <i>scheduling</i> de curto prazo em complexos contendo portos, refinarias e uma infraestrutura de oleodutos unidirecionais capaz de transferir petróleo dos portos para as refinarias; testes foram feitos em um complexo contendo um porto, quatro refinarias e duas subestações, treze petroleiros, quatro píeres e quatorze tipos de petróleo
Milidiú <i>et al.</i>	2003	Minimização de uma função de custo de operações ou minimização do <i>makespan</i>	Obtenção de resultados teóricos
Pessoa	2003	Minimização de uma função de custo de operações ou minimização do <i>makespan</i>	Obtenção de resultados teóricos
Neiro e Pinto	2004	Maximização das receitas obtidas pela venda de produtos menos os custos relacionados à matéria-prima, operação, estocagem e transporte	Considera o planejamento de uma cadeia de suprimentos de petróleo que compreende terminais de petróleo, refinarias e centros de distribuição e uma rede de dutos unidirecionais para suprimento de petróleo e outra para distribuição de produtos.
De la Cruz <i>et al.</i>	2005	Minimização do número de interfaces e do tempo final para realizar a entrega de todas as demandas com penalização de restrições	Considera uma rede que transporta quatro tipos de produtos de dois terminais fontes para três terminais de destino, passando por dois terminais intermediários; apenas um duto da rede é bidirecional; são considerados prazos de entrega para as demandas e restrições de

Liporace	2005	Minimização do número de operações para o atendimento da demanda	capacidade e de colisão nos dutos bidirecionais. Elaboração de um novo domínio para o desenvolvimento de planejadores de propósito geral; obtenção de resultados teóricos; desenvolvimento de um aplicativo voltado para a solução do problema de planejamento de transporte em redes dutoviárias; foi considerada uma rede com 13 áreas, 25 dutos e 16 produtos; foram inseridas restrições de sequenciamento de produtos e de capacidade de armazenamento
Boschetto	2006	Maximização do lucro	Considera o <i>scheduling</i> de curto prazo em complexos contendo portos, refinarias e uma infraestrutura de oleodutos unidirecionais capaz de transferir petróleo dos portos para as refinarias; testes foram feitos em um complexo contendo um porto, quatro refinarias e duas subestações, treze petroleiros, quatro píeres e quatorze tipos de petróleo; eliminação de restrições redundantes, fixação de variáveis e redução do porte do modelo
Marcellino	2006	Minimização do custo total de transporte e de manutenção dos estoques dentro de limites de segurança	Obtenção dos fluxos de produtos em cada oleoduto durante todo o horizonte de tempo, e os estoques de produtos em cada área ao final deste período de tempo; geração aleatória de instâncias com diferentes níveis de complexidade e com base em dados históricos reais
Veiga	2006	Minimização de custos operacionais com penalização de interfaces	Considera o <i>scheduling</i> de curto prazo em complexos contendo portos, refinarias e uma infraestrutura de oleodutos unidirecionais capaz de transferir petróleo dos portos para as refinarias; testes foram feitos em um complexo contendo um porto, quatro refinarias e duas subestações, treze petroleiros, quatro píeres e quatorze tipos de petróleo
Westphal	2006	Minimização da quantidade enviada de bateladas; minimização da quantidade recebida de bateladas; minimização do tempo paraatendimento à demanda e minimização da fragmentação no envio de bateladas.	Considera uma rede que transporta quatro tipos de produtos e é composta por duas refinarias, cinco terminais e nove dutos - sendo apenas um deles birecional; foram consideradas restrições de quantidade mínima de batelada, atendimento a demanda, capacidade de tanques e restrições de envio e recebimento simultâneo na conexão que apresenta birecionalidade
Alves	2007	Minimização do número de interfaces e do custo de bombeamento	Considera uma rede que transporta cinco produtos e possui oito dutos, quatro refinarias e quatro terminais; foram consideradas restrições de atendimento a demanda e capacidade de armazenamento dos tanques
Mori <i>et al.</i>	2007	---	Considera uma composta por nove áreas, sendo três refinarias, um porto, cinco centros de distribuição e quinze dutos e transporta mais de dez produtos diferentes
Neves-Jr. <i>et al.</i>	2007	Minimização dos custos operacionais	Considera uma rede de dutos composta por quinze dutos - sendo três deles passíveis de reversão - três refinarias, um porto e cinco centros de distribuição; transportam mais de dez produtos diferentes; foram consideradas restrições operacionais relevantes, tais como composição das vazões ao longo das rotas de fluxo, alinhamentos locais, penalização por horossazonalidade, troca de turno, operações de reversão e pulmão
Sanchez	2007	---	Considera duas redes de dutos distintas, ambas representadas por um grafo em forma de árvore. A primeira delas transporta sete produtos e é composta por uma refinaria, seis terminais e seis dutos; a segunda também transporta sete produtos, mas é composta por uma refinaria, dez terminais e dez dutos. O modelo desenvolvido deve cumprir as metas estabelecidas em seis critérios, a saber, carências nos tanques, volume

				entregue nos tanques, número de interfaces proibidas, duração das interfaces, duração dos bloqueios e o custos das interfaces
Yamamoto	2007a	Priorização da entrega do produto no nó de demanda		Obtenção do sequenciamento de bateladas previamente geradas a partir do bloco de alocação de recursos
Yamamoto	2007b	Priorização da entrega do produto no nó de demanda		Avaliação do comportamento de diversas metaheurísticas no tocante a ordenação das bateladas
Boschetto <i>et al.</i>	2008	Minimização de violações nos intervalos de tempo (de início e fim das operações)		Considera uma rede de dutos composta por quinze dutos - sendo três deles passíveis de reversão - três refinarias, um porto e cinco centros de distribuição; transportam mais de dez produtos diferentes; foram consideradas restrições operacionais relevantes, tais como composição das vazões ao longo das rotas de fluxo, alinhamentos locais, penalização por horossazonalidade, troca de turno, operações de reversão e pulmão
Ciré	2008	---		Considera uma rede de dutos com 29 dutos e 14 nós que transporta cerca de 30 produtos
Moura <i>et al.</i>	2008a	---		Considera uma rede de dutos com 29 dutos e 14 nós que transporta cerca de 30 produtos
Moura <i>et al.</i>	2008b	---		Considera uma rede de dutos com 29 dutos e 14 nós que transporta cerca de 30 produtos
Pereira	2008	Minimização do número de interfaces e do custo de bombeamento		Considera uma rede que transporta cinco produtos e possui oito dutos, quatro refinarias e quatro terminais; foram consideradas restrições de atendimento a demanda e capacidade de armazenamento dos tanques
Boschetto e Neves-Jr	2009	Minimização do <i>makespan</i>		Considera uma rede de dutos composta por quinze dutos - sendo três deles passíveis de reversão - três refinarias, um porto e cinco centros de distribuição; transportam mais de dez produtos diferentes; foram consideradas restrições operacionais relevantes, tais como composição das vazões ao longo das rotas de fluxo, alinhamentos locais, penalização por horossazonalidade, troca de turno, operações de reversão e pulmão
Cafaro e Cerdá	2009	Minimização do custo total de operação		Considera um composto por 2 refinarias e 3 terminais que transporta 3 diferentes tipos de produto
Felizari <i>et al.</i>	2009	Minimização dos tempos associados às operações de bombeio e recebimento de produtos (<i>makespan</i>), tempos de parada em dutos, adiantamentos e atrasos de bombeio de produtos nas origens, adiantamentos e atrasos de recebimento de produtos nos destinos e violações dos períodos de troca de turnos		Considera uma rede de dutos composta por quinze dutos - sendo três deles passíveis de reversão - três refinarias, um porto e cinco centros de distribuição; transportam mais de dez produtos diferentes; foram consideradas restrições operacionais relevantes, tais como composição das vazões ao longo das rotas de fluxo, alinhamentos locais, penalização por horossazonalidade, troca de turno, operações de reversão e pulmão
Felizari	2009	Minimização dos tempos associados às operações de bombeio e recebimento de produtos (<i>makespan</i>), tempos de parada em dutos, adiantamentos e atrasos de bombeio de produtos nas origens, adiantamentos e atrasos de recebimento de produtos nos destinos e violações dos períodos de troca de turnos		Considera uma rede de dutos composta por quinze dutos - sendo três deles passíveis de reversão - três refinarias, um porto e cinco centros de distribuição; transportam mais de dez produtos diferentes; foram consideradas restrições operacionais relevantes, tais como composição das vazões ao longo das rotas de fluxo, alinhamentos locais, penalização por horossazonalidade, troca de turno, operações de reversão e pulmão
Cafaro e Cerdá	2010	Minimização do <i>makespan</i> e minimização do custo total das operações		Permite a injeção simultânea de bateladas; considera três redes distintas, onde cada nó da rede possui grau no máximo igual a 2.
Kira <i>et al.</i>	2010	Minimização ponderada das variáveis de violação dos limites de tancagem e do estoque meta		Considera uma rede composta por uma refinaria e cinco centros de distribuição; insere restrições de bombeio contínuo de produtos, além de evitar o chaveamento da rede em determinados órgãos e a consequente parada de trechos de duto
Lopes <i>et al.</i>	2010	---		Considera uma rede de dutos com 29 dutos e 14 nós que

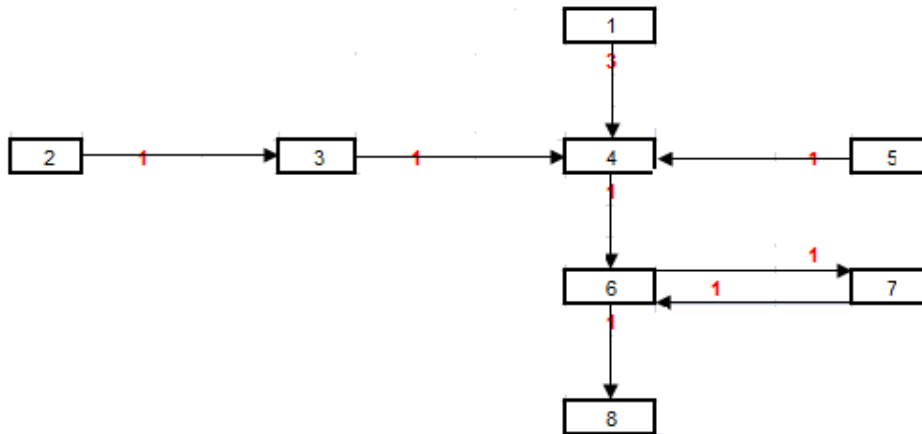
transporta cerca de 30 produtos

Herrán <i>et al.</i>	2010	Minimização dos custos de bombeamento, interface, estocagem e parada dos dutos	Existência de bombeamento em ambos os sentidos para os dutos bidirecionais
----------------------	------	--	--

APÊNDICE C: Exemplo de aplicação do procedimento de interface

Considere, a título de exemplo, uma rede que seja composta por oito áreas operacionais, oito dutos e que transporte dois produtos distintos (produto 1 e produto 3), conforme se visualiza na Figura C-I.

Figura C-I: Exemplo de uma rede de dutos composta por oito dutos e oito áreas operacionais*



* O rótulo dos arcos, em vermelho, destaca o produto contido no primeiro trecho de cada duto integrante da rede

Suponha que as demandas agregadas, produções, volumes iniciais, volumes mínimos e máximos de produto 3 em cada local sejam dados na Tabela C-I e sejam iguais em todos os períodos de tempo.

Tabela C-I: Produção agregada, demanda agregada, volumes iniciais, volumes mínimos e máximos de produto 3 (valores utilizados para demonstração do funcionamento da heurística)

Área operacional	$Q_{dagr_{s,p,t}}$	$Q_{pagr_{s,p,t}}$	$Q_{i_{s,p,0}}$	$Q_{min_{s,p,t}}$	$Q_{max_{s,p,t}}$
1	0	10	0	0	5
2	0	20	0	0	30
3	5	0	0	0	30
4	10	0	5	0	30
5	0	30	0	0	25
6	0	0	0	0	30
7	0	10	0	0	30
8	10	0	0	0	30

Segue a aplicação do procedimento ao exemplo supracitado, considerando o produto 3.

1) O cálculo de $\varphi_{s,3}, \forall s = 1, \dots, 8$ é dado na Tabela C-II.

Tabela C-II: Resultados obtidos para $\varphi_{s,3}, \forall s = 1, \dots, 8$

Equação	Resultado	Equação	Resultado
$\varphi_{1,3} = 10 - 0 + 0 - 0$	10	$\varphi_{5,3} = 30 - 0 + 0 - 0$	30
$\varphi_{2,3} = 20 - 0 + 0 - 0$	20	$\varphi_{6,3} = 0 - 0 + 0 - 0$	0
$\varphi_{3,3} = 0 - 5 + 0 - 0$	-5	$\varphi_{7,3} = 10 - 0 + 0 - 0$	10
$\varphi_{4,3} = 0 - 10 + 5 - 0$	-5	$\varphi_{8,3} = 0 - 10 + 0 - 0$	-10

2) Verificamos que $\varphi_{1,3} > Q_{max_{1,3}}$ e como $Xp_{1,4,1,3,0} = 1$ temos $\sigma_{1,3} = 0$.

3) Verificamos que $\varphi_{5,3} > Q_{max_{5,3}}$ e como $Xp_{5,4,1,3,0} = 0$ temos $\sigma_{5,3} = 1$.

4) Verifica-se que $\varphi_{s,3} < Q_{min_{s,3}}, \forall s = 3, 4, 8$ Logo $A_3 = \{3, 4, 8\}$.

5) A única rota que pode atender a demanda de produto 3 no local 3 é $2 \rightarrow 3$. A demanda de produto no local 4 pode ser atendida pelas seguintes rotas: $1 \rightarrow 4, 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ e $5 \rightarrow 4$. A demanda no local 8 pode ser atendida pelas seguintes rotas: $1 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 8, 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 8, 5 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 8$ e $7 \rightarrow 6 \rightarrow 8$. As combinações possíveis de rotas são dadas na Tabela C-III.

Tabela C-III: Possíveis combinações de rotas

Numeração	Combinação de rotas	Numeração	Combinação de rotas
1	$2 \rightarrow 3$	7	$2 \rightarrow 3$
	$1 \rightarrow 4$		$2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$
	$1 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 8$		$5 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 8$
2	$2 \rightarrow 3$	8	$2 \rightarrow 3$
	$1 \rightarrow 4$		$2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$
	$2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 8$		$7 \rightarrow 6 \rightarrow 8$
3	$2 \rightarrow 3$	9	$2 \rightarrow 3$
	$1 \rightarrow 4$		$5 \rightarrow 4$
	$5 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 8$		$1 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 8$
4	$2 \rightarrow 3$	10	$2 \rightarrow 3$
	$1 \rightarrow 4$		$5 \rightarrow 4$
	$7 \rightarrow 6 \rightarrow 8$		$2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 8$
5	$2 \rightarrow 3$	11	$2 \rightarrow 3$
	$2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$		$5 \rightarrow 4$
	$1 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 8$		$5 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 8$
6	$2 \rightarrow 3$	12	$2 \rightarrow 3$
	$2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$		$5 \rightarrow 4$
	$2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 8$		$7 \rightarrow 6 \rightarrow 8$

6) Cálculo do número de interfaces para a primeira combinação de rotas.

$$\varepsilon_{13} = 0$$

Essa combinação de rotas de número 1 é composta por 4 dutos, dentre os quais apenas $Xp_{1,4,1,3,0} = 1$. Assim temos $\varepsilon_{13} = 3$. Sabemos que $\sigma_{5,3} = 1$, mas não existe nenhum duto pertencente a primeira combinação de rotas que possua o duto 5 como extremidade de origem e dessa forma, o valor de ε_{13} permanece inalterado.

7) Cálculo do número de interfaces para a segunda combinação de rotas.

$$\varepsilon_{23} = 0$$

Essa combinação de rotas de número 2 é composta por 5 dutos, dentre os quais apenas $Xp_{1,4,1,3,0} = 1$. Assim temos, $\varepsilon_{23} = 4$. Sabemos que $\sigma_{5,3} = 1$, mas não existe nenhum duto pertencente a segunda combinação de rotas que possua o duto 5 como extremidade de origem e dessa forma, o valor de ε_{23} permanece inalterado.

8) Cálculo do número de interfaces para a terceira combinação de rotas.

$$\varepsilon_{33} = 0$$

Essa combinação de rotas de número 2 é composta por 5 dutos, dentre os quais apenas $Xp_{1,4,1,3,0} = 1$. Assim temos, $\varepsilon_{33} = 4$. Sabemos que $\sigma_{5,3} = 1$ e existe um duto pertencente a terceira combinação de rotas que possua o duto 5 como extremidade de origem e dessa forma, o valor de ε_{33} é alterado para 3 ($\varepsilon_{13} = 3$).

9) Cálculo do número de interfaces para a quarta combinação de rotas.

$$\varepsilon_{43} = 0$$

Essa combinação de rotas de número 4 é composta por 4 dutos, dentre os quais apenas $Xp_{1,4,1,3,0} = 1$. Assim temos, $\varepsilon_{43} = 3$. Sabemos que $\sigma_{5,3} = 1$, mas não existe nenhum duto pertencente a quarta combinação de rotas que possua o duto 5 como extremidade de origem e dessa forma, o valor de ε_{43} permanece inalterado.

10) Cálculo do número de interfaces para a quinta combinação de rotas.

$$\varepsilon_{53} = 0$$

Essa combinação de rotas de número 5 é composta por 5 dutos, dentre os quais apenas $Xp_{1,4,1,3,0} = 1$. Assim temos, $\varepsilon_{53} = 4$. Sabemos que $\sigma_{5,3} = 1$, mas não existe nenhum duto pertencente a quinta combinação de rotas que possua o duto 5 como extremidade de origem e dessa forma, o valor de ε_{53} permanece inalterado.

11) Cálculo do número de interfaces para a sexta combinação de rotas.

$$\varepsilon_{63} = 0$$

Essa combinação de rotas de número 6 é composta por 4 dutos, mas em nenhum deles existe produto 3 no primeiro trecho . Assim temos $\varepsilon_{63} = 4$. Sabemos que $\sigma_{5,3} = 1$, mas não existe nenhum duto pertencente a sexta combinação de rotas que possua o duto 5 como extremidade de origem e dessa forma, o valor de ε_{63} permanece inalterado.

12) Cálculo do número de interfaces para a sétima combinação de rotas.

$$\varepsilon_{73} = 0$$

Essa combinação de rotas de número 7 é composta por 5 dutos, mas em nenhum deles existe produto 3 no primeiro trecho . Assim temos $\varepsilon_{73} = 5$. Sabemos que $\sigma_{5,3} = 1$, mas não existe nenhum duto pertencente a sétima combinação de rotas que possua o duto 5 como extremidade de origem e dessa forma, o valor de ε_{73} permanece inalterado.

13) Cálculo do número de interfaces para a oitava combinação de rotas.

$$\varepsilon_{83} = 0$$

Essa combinação de rotas de número 8 é composta por 4 dutos, mas em nenhum deles existe produto 3 no primeiro trecho . Assim temos $\varepsilon_{83} = 4$. Sabemos que $\sigma_{5,3} = 1$, mas não existe nenhum duto pertencente a oitava combinação de rotas que possua o duto 5 como extremidade de origem e dessa forma, o valor de ε_{83} permanece inalterado.

14) Cálculo do número de interfaces para a nona combinação de rotas.

$$\varepsilon_{93} = 0$$

Essa combinação de rotas de número 9 é composta por 5 dutos, dentre os quais apenas $Xp_{1,4,1,3,0} = 1$. Assim temos $\varepsilon_{93} = 4$. Sabemos que $\sigma_{5,3} = 1$ e existe um duto pertencente a nona combinação de rotas que possui o duto 5 como extremidade de origem e dessa forma, o valor de ε_{93} é alterado para 3 ($\varepsilon_{93} = 3$).

15) Cálculo do número de interfaces para a décima combinação de rotas.

$$\varepsilon_{103} = 0$$

Essa combinação de rotas de número 10 é composta por 5 dutos, mas em nenhum deles existe produto 3 no primeiro trecho. Assim temos $\varepsilon_{103} = 5$. Sabemos que $\sigma_{5,3} = 1$ e existe um duto pertencente a nona combinação de rotas que possui o duto 5 como extremidade de origem e dessa forma, o valor de ε_{103} é alterado para 4 ($\varepsilon_{103} = 4$).

16) Cálculo do número de interfaces para a décima primeira combinação de rotas.

$$\varepsilon_{113} = 0$$

Essa combinação de rotas de número 10 é composta por 4 dutos, mas em nenhum deles existe produto 3 no primeiro trecho. Assim temos $\varepsilon_{113} = 4$. Sabemos que $\sigma_{5,3} = 1$ e existe um duto pertencente a nona combinação de rotas que possui o duto 5 como extremidade de origem e dessa forma, o valor de ε_{113} é alterado para 3 ($\varepsilon_{113} = 3$).

16) Cálculo do número de interfaces para a décima segunda combinação de rotas.

$$\varepsilon_{123} = 0$$

Essa combinação de rotas de número 10 é composta por 4 dutos, mas em nenhum deles existe produto 3 no primeiro trecho. Assim temos $\varepsilon_{123} = 4$. Sabemos que $\sigma_{5,3} = 1$ e existe um duto pertencente a nona combinação de rotas que possui o duto 5 como extremidade de origem e dessa forma, o valor de ε_{123} é alterado para 3 ($\varepsilon_{123} = 3$).

$$17) \varepsilon_3 = \min\{\varepsilon_{13}, \varepsilon_{23}, \dots, \varepsilon_{123}\} = 3$$

18) Dessa forma o total de interfaces relacionadas ao produto 3 é dado por:

$$\eta_3 = \varepsilon_3 + \sigma_{5,3} = 4$$

19) O processo anterior deve ser repetido para o outro produto transportado ao longo da rede (produto 1) para obtenção do número de interfaces η_1 . O limite mínimo de interfaces para o problema será dado por $\eta = \eta_1 + \eta_3$.

APÊNDICE D: Valores dos parâmetros utilizados nas três instâncias

Tabela D-I (valores utilizados nas três instâncias)

$ A $	8
$ P $	5
$Lmax$	16
T	42
W_Q	1
W_I	100000

Tabela D-II: $KL_{(s,r)}$ (valores utilizados nas três instâncias)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	9	9	0	0
3	0	0	0	0	9	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	3	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela D-III: $Qp_{(s,p,t)}$ (em cada uma das três instâncias)

	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	880.95	880.95	880.95	119.05	119.05
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	714.29	714.29	714.29	142.86	142.86
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0

Tabela D-IV: $Qd_{(s,p,t)}$ (em cada uma das três instâncias)

	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	1071.43	1309.52	119.05	0	0
5	0	0	0	0	0
6	309.52	0	0	95.24	95.24
7	0	0	0	0	0
8	1309.52	1309.52	1309.52	142.86	142.86

Tabela D-V: $XL_{(s,r)}$ (em cada uma das três instâncias)

	1	2	3	4	5	6	7	8													
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela D-VI: $QL_{(s,r)}$ (valores em centenas para em cada uma das três instâncias)

	1	2	3	4	5	6	7	8													
1	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	14	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	14	0	0	0	14	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	24	24	24	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20.8	20.8	20.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	10	16	16	16
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	10	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela D-VII: $Q \max_{(s,p)}$ (valores em milhares para cada uma das três instâncias)

	1	2	3	4	5										
1	8	8	8	0	0	0	18	18	20	0	0	0	0	0	0
2	111	111	111	20	20	20	44	44	44	42	42	42	82	82	82
3	15	15	15	12	12	12	14	14	14	15	15	15	8	8	8
4	50	50	50	23	23	23	17	17	17	46	46	46	18	18	18
5	119	119	119	15	15	15	153	153	153	37	37	37	88	88	88
6	30	30	30	11	11	11	6	6	6	20	20	20	10	10	10
7	70	70	70	0	0	0	29	29	29	0	0	0	120	100	100
8	56	56	56	20	20	20	0	0	0	29	29	29	10	10	10

Tabela D-VIII: $Qi_{(s,p,0)}$ (valores em milhares para cada uma das três instâncias)

	1	2	3	4	5										
1	7	6	6	0	0	0	12.5	12.5	17	0	0	0	0	0	0
2	22.2	22.2	22.2	10	10	10	9.5	10	12	22	22	22	35	35	35
3	4	4	4	6	6	6	14	14	6	3	3	3	2	2	2
4	22.36	12	14	20	20	20	6	6	6	14	14	14	5	5	7
5	35.52	36	36	8	8	8	77	77	77	6.62	23	23	17.5	17	17
6	10.4	5.5	5.5	3	3	3	5	5	5	13.8	2	2	3	1	1
7	28	28	28	0	0	0	11	11	11	0	0	0	95.5	94	94
8	24.6	24	24	5	5	5	0	0	0	9	9	9	19.5	4	4

Tabela D-IX: Conteúdo inicial de cada trecho dos dutos

$Xp_{(2,3,l,p,0)} = \begin{cases} 1, \forall p = 1, l = 1..9 \\ 0, cc \end{cases}$	$Xp_{(3,4,l,p,0)} = \begin{cases} 1, \forall p = 1, l = 1..3 \\ 0, cc \end{cases}$
$Xp_{(1,4,l,p,0)} = \begin{cases} 1, \forall p = 3, l = 1 \\ 0, cc \end{cases}$	$Xp_{(5,4,l,p,0)} = \begin{cases} 1, \forall p = 1, l = 1..8 \\ 1, \forall p = 4, l = 9..15 \\ 1, \forall p = 1, l = 16 \\ 0, cc \end{cases}$
$Xp_{(4,6,l,p,0)} = \begin{cases} 1, \forall p = 1, l = 1..3 \\ 0, cc \end{cases}$	$Xp_{(6,8,l,p,0)} = \begin{cases} 1, \forall p = 1, l = 1..2 \\ 0, cc \end{cases}$
$Xp_{(7,6,l,p,0)} = \begin{cases} 1, \forall p = 1, l = 1 \\ 0, cc \end{cases}$	$Xp_{(6,7,l,p,0)} = \begin{cases} 1, \forall p = 1, l = 1 \\ 0, cc \end{cases}$
$Xp_{(3,2,l,p,0)} = \begin{cases} 1, \forall p = 1, l = 1..9 \\ 0, cc \end{cases}$	$Xp_{(4,3,l,p,0)} = \begin{cases} 1, \forall p = 1, l = 1..3 \\ 0, cc \end{cases}$

APÊNDICE E: Valores dos estoques iniciais, produção e demanda de cada produto em cada área operacional nas três instâncias-base

Produção/Demanda de cada produto (inst1)						Produção/Demanda de cada produto (inst2)						Produção/Demanda de cada produto (inst3)					
Área	1	2	3	4	5	Área	1	2	3	4	5	Área	1	2	3	4	5
1	0	0	107,14	0	0	1	0	0	107,14	0	0	1	0	0	166,67	0	0
2	880,95	119,05	11,9	[23,81]	[47,62]	2	880,95	119,05	11,9	[23,81]	[47,62]	2	880,95	119,05	[476,19]	[23,81]	[47,62]
3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
4	[1071,43]	0	0	0	0	4	[1309,52]	0	[214,29]	0	0	4	[119,05]	0	[214,29]	0	0
5	714,29	142,86	71,43	488,1	[83,33]	5	714,29	142,86	71,43	357,14	[95,24]	5	714,29	142,86	71,43	357,14	[95,24]
6	[309,52]	[95,24]	0	[166,67]	0	6	0	[95,24]	0	0	0	6	0	[95,24]	0	0	0
7	0	0	0	0	130,9	7	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0
8	[1309,52]	[142,86]	0	[595,24]	[47,62]	8	[1309,52]	[142,86]	0	[571,43]	[83,33]	8	[1309,52]	[142,86]	0	[571,43]	[83,33]

Volume inicial de cada produto						Volume inicial de cada produto						Volume inicial de cada produto					
Área	1	2	3	4	5	Área	1	2	3	4	5	Área	1	2	3	4	5
1	7000	0	12500	0	0	1	6000	0	12500	0	0	1	6000	0	17000	0	0
2	22000	10000	9500	22000	35000	2	22200	10000	10000	22000	35000	2	22200	10000	12000	22000	35000
3	4000	6000	14000	3000	2000	3	4000	6000	14000	3000	2000	3	4000	6000	6000	3000	2000
4	22360	20000	6000	14000	5000	4	12000	20000	6000	14000	5000	4	14000	20000	6000	14000	7000
5	35520	8000	77000	6620	17500	5	36000	8000	77000	23000	17000	5	36000	8000	77000	23000	17000
6	10400	3000	5000	13800	3000	6	5500	3000	5000	2000	1000	6	5500	3000	5000	2000	1000
7	28000	0	11000	0	95500	7	28000	0	11000	0	94000	7	28000	0	11000	0	94000
8	24600	5000	0	9000	1950	8	24000	5000	0	9000	4000	8	24000	5000	0	9000	4000

[] : demanda

APÊNDICE F: Extrato da resolução número 3 de 1981 do CNP sobre a metodologia para cálculo dos valores dos estoques de segurança

Considere as seguintes simbologias e definições:

- a) Demanda média diária da base (**D**): média das saídas do produto numa base estudada, em determinado período.
- b) Tempo médio entre duas chegadas consecutivas do produto (**T**): para determinado período, significa a média dos intervalos de tempo entre chegadas do produto.
- c) Tempo máximo entre duas chegadas consecutivas do produto (**TM**): para determinado período, significa o maior intervalo de tempo decorrido entre duas chegadas consecutivas do produto, por método de entrega.
- d) Estoque operacional (**EOP**): estoque provável resultante de composição, de demanda média diária e do tempo médio entre duas chegadas consecutivas do produto.
- e) Desvio padrão de demanda (**DPD**): representa uma medida das variações diárias de demanda do produto, em relação à sua demanda média diária numa base.
- f) Desvio padrão do tempo médio entre duas chegadas consecutivas do produto (**DPT**): representa uma medida das variações de intervalos de tempo entre duas chegadas consecutivas do produto, em relação ao tempo médio definido no item b.
- g) Desvio padrão do estoque operacional (**DPEOP**): representa uma medida das variações dos estoques operacionais.
- h) Estoque médio (**EM**): estoque médio do produto a ser mantido na base estudada, num determinado período, em função da demanda, do desvio padrão da demanda e dos tempos médio e máximo entre chegadas do produto.
- i) Estoque de segurança (**E**): representa a menor quantidade do produto que deve ser mantido numa base.
- l) Parâmetro de proteção (**K**): variável matemática resultante da composição do estoque operacional e do seu desvio padrão.
- m) Coeficiente de proteção do estoque médio (**KEM**): extraídos da tabela fornecida pelo CNP e anexa à Resolução a partir do parâmetro de proteção (k)
- n) Fator de correção do estoque médio e armazenamento mínimo (**FC**): resultante da composição matemática do tempo médio entre duas chegadas consecutivas do produto, seu desvio padrão e suas constantes.

As distribuidoras de petróleo devem fornecer **D** e **DPD** relativos ao Ano (**A + 3**). A ANP deverá fornecer **T** e **TM** relativos ao Ano (**A + 3**). As fórmulas para cálculo do estoque mínimo de segurança considerando o abastecimento por duto são as seguintes:

- Cálculo do desvio padrão do tempo médio entre duas chegadas consecutivas do produto (**DPT**)

$$DPT = \frac{TM - T}{3} \quad (C.1)$$

- Cálculo do estoque operacional (**EOP**)

$$EOP = D * T \quad (C.2)$$

- Cálculo do desvio padrão do estoque operacional (**DPEOP**)

$$DPEOP = DPT \sqrt{T * DPD^2 + D^2} \quad (C.3)$$

- Cálculo do parâmetro de proteção (**K**)

$$K = \frac{DPEOP}{EOP} \quad (C.4)$$

A partir dos valores obtidos para K verifica-se na Tabela G-I quais são os valores correspondentes de coeficiente de proteção do estoque médio (**KEM**) e do coeficiente de armazenamento mínimo (**KA**).

Tabela G-I: Valores do coeficiente de proteção do estoque médio (KEM) em função do parâmetro de proteção (K)

K	KEM	K	KEM
0,1	0,7	1,1	3,0
0,2	0,9	1,2	3,2
0,3	1,1	1,3	3,4
0,4	1,3	1,4	3,7
0,5	1,5	1,5	3,9
0,6	1,7	1,6	4,2
0,7	2,0	1,7	4,4
0,8	2,2	1,8	4,6
0,9	2,4	1,9	4,8
1,0	2,7	2,0	5,0

- Cálculo do fator de correção (**FC**)

$$FC = 0,8 - 0,1 * \left(\frac{DPT}{T} \right)^2 \quad (C.5)$$

- Cálculo estoque médio (**EM**)

$$EM = EOP * KEM * FC \quad (C.6)$$

- Cálculo do estoque de segurança (**E**)

$$E = EM - \frac{EOP}{2} \quad (C.7)$$

A título de exemplo, considere uma área operacional r pertencente a uma rede de dutos cujo abastecimento seja feito por um oleoduto e que possuam uma demanda D de um produto p . Considere ainda que a demanda (D) seja de 600 metros cúbicos, o desvio padrão da demanda seja de 240 metros cúbicos e o tempo médio e máximo entre duas chegadas consecutivas de produto sejam respectivamente de 3 e 6 dias. Utilizando as equações anteriores temos:

- Cálculo do desvio padrão do tempo médio entre duas chegadas consecutivas do produto (**DPT**)

$$DPT = \frac{TM - T}{3} = \frac{6 - 3}{3} = 1$$

- Cálculo do estoque operacional (**EOP**)

$$EOP = D * T = 600 * 3 = 1800$$

- Cálculo do desvio padrão do estoque operacional (**DPEOP**)

$$DPEOP = DPT * \sqrt{T * DPD^2 + D^2} = 1 * \sqrt{3 * 240^2 + 600^2} = 730$$

- Cálculo do parâmetro de proteção (**K**)

$$K = \frac{DPEOP}{EOP} = \frac{730}{1800} = 0,4$$

- A partir da Tabela G-I tem-se que:

$$KEM = 1,3$$

- Cálculo do fator de correção (**FC**)

$$FC = 0,8 - 0,1 * \left(\frac{DPT}{T} \right)^2 = 0,8 - 0,1 * \left(\frac{1}{3} \right)^2 \sim 0,8$$

- Cálculo estoque médio (**EM**)

$$EM = EOP * KEM * FC = 1800 * 1,3 * 0,8 = 1872$$

- Cálculo do estoque de segurança (**E**)

$$E = EM - \frac{EOP}{2} = 1872 - \frac{1800}{2} = 972$$

Neste caso o valor do parâmetro $Qd_{(r,p,t)} = 972m^3$. Esse valor deverá ser utilizado como um dado de entrada do modelo matemático. Esse cálculo deve ser realizado de maneira similar para todas áreas operacionais considerando todos os produtos que são transportados na rede em questão.

APÊNDICE G: Descrição das classes utilizadas no VISDUT

Classe Main.as

Esta é classe principal do projeto. Ela instancia todas as demais classes.

Métodos principais:

_configApp() → carrega o XML e o layout do projeto.

_initApp() → instancia as outras classes.

Classe CameraControl.as

Esta classe controla o *zoom* da câmera. Nela define-se que um duplo clique no *mouse* aumenta o *zoom* nos dutos e um duplo clique novamente permite que se saia do *zoom*.

Métodos principais:

_onDoubleClickImage() → executa as funções ao clicar duas vezes na imagem.

Classe CustomEvent.as

Essa classe é utilizada para disparar um evento ao carregar o XML.

Classe ProductsContainer.as

Esta classe contém as informações de todos os produtos em cada duto do projeto no instante inicial. Ela consulta o XML obtido a partir do arquivo .csv e monta as informações de acordo com os dados.

Métodos principais:

_createLinks() → cria os dutos com as informações do XML (nome e cor).

_getColorProductById(id) → retorna qual a cor do produto que possui o ID informado.

_getProductNameById(id) → retorna qual o nome do produto que possui o ID informado.

Classe Product.as

Esta classe contém todos os produtos em cada duto do projeto nos demais instantes, bem como suas informações de nome e cor.

Métodos principais:

_updateInfos(name, color) → chama os dois próximos métodos abaixo.

_setName(name) → atribui um novo nome ao produto.

_setColor(color) → atribui uma nova cor ao produto.

Classe Singleton.as

A classe Singleton é utilizada para salvar informações que todas as classes vão precisar para se comunicar. Ela é o centro do projeto, onde fica as principais referências das classes.

Métodos principais:

setProductsInfo(stretch, position, productId, envia) → chama o método *setProductsInfo* na classe *ProductsContainer*. Este mesmo método chama o *updateInfos* na *Product* para atualizar as informações do product.

GetProductById() → chama o método *getProductById*() na classe *ProductsContainer* para pegar um produto pelo seu ID.

Classe StationsContainer.as

Essa classe contém todas as *stations* (estações) do projeto.

Métodos principais:

_defineNameStations() → define um array de stations. Ex:

_arrNameStations = ["RECAP", "REPLAN", ...];

_createStations() → instancia as *stations* de acordo com o array acima.

Classe Station.as

Essa classe grava o ID e o nome da *Station*.

Métodos principais:

_setName() → Atribui um novo nome para a *station*.

_setId() → Atribui um novo ID para a *station*.

Classe Tooltip.as

Esta classe que exibe o *tooltip* ao passar o mouse por cima de algum objeto.

Métodos principais:

registerTooltip() → Ao chamar este método, o *tooltip* é exibido de acordo com a posição do mouse.

Classe XMLProduct.as

Esta classe carrega o XML gerado pelo PHP a partir das informações do arquivo .csv gerado pelo pacote de otimização.

Métodos principais:

_renderXMLByActualTime() → Pega o tempo atual do projeto e seta todas as informações, de acordo com o .csv. Ele disponibiliza informações sobre os produtos enviados e as interfaces. Este método se

comunica com a Singleton para acessar as outras classes, como Products e ProductsContainer.