

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

SUELEN NEVES BOSCHETTO

**OTIMIZAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE TRANSFERÊNCIA E
ESTOCAGEM EM REDE DE DUTOS**

TESE DE DOUTORADO

CURITIBA

2011

SUELEN NEVES BOSCHETTO

**OTIMIZAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE TRANSFERÊNCIA E
ESTOCAGEM EM REDE DE DUTOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Doutor em Ciências” – Área de Concentração: Informática Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Neves Junior

CURITIBA

2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

B724o Boschetto, Suelen Neves
Otimização das operações de transferência e estocagem em rede de dutos / Suelen Neves Boschetto. — 2011.
245 p. : il. ; 30 cm

Orientador: Flávio Neves Junior

Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.
Área de concentração: Informática Industrial, Curitiba, 2011.

Bibliografia: f. 209-215

1. Programação linear. 2. Programação (Matemática). 3. Petróleo – Derivados – Transferência. 4. Petróleo – Transporte. 5. Oleodutos de petróleo. 6. Modelo PLIM. 7. Indústria petrolífera. 8. Planejamento da produção. 9. Engenharia elétrica – Teses. I. Neves Junior, Flávio, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

Título da Tese Nº. 61

“ Otimização das Operações de Transferência e Estocagem em Rede de Dutos ”

por

Suelen Neves Boschetto

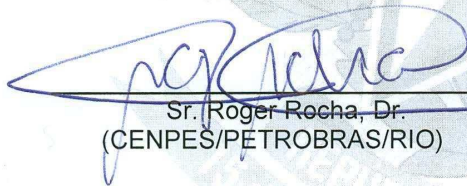
Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Informática Industrial, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Curitiba, às 09h do dia 04 de fevereiro de 2011. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:



Prof. Flávio Neves Junior, Dr.
(Presidente – UTFPR)



Profª Ana Paula Ferreira D. Barbosa Póvoa, Dr
(IST/LISBOA)



Sr. Roger Rocha, Dr.
(CENPES/PETROBRAS/RIO)



Profª. Neida Maria Patias Volpi, Dr.
(UFPR)



Prof. Ricardo Lüders, Dr.
(UTFPR)

Visto da coordenação:



Prof. Fábio Kurt Schneider, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

Para meu noivo Leandro.

AGRADECIMENTOS

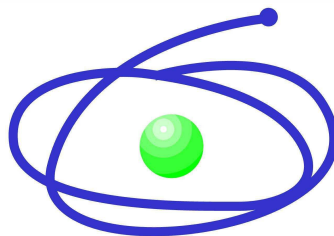
Ao meu orientador Prof. Flávio Neves Junior pela oportunidade de fazer parte do laboratório LASCA, pelo incentivo e orientação durante a realização do meu trabalho, e pelo exemplo de dedicação.

À Prof. Ana Paula Barbosa Póvoa, e Susana Relvas, por terem me acolhido no Instituto Superior Técnico em Lisboa, dando contínuo suporte e sugestões para o desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos, Felizari, Bettoni, Helton, William, Sérgio, Kira, Lucas, Camila, e a todos os colegas e professores que fazem parte do laboratório LASCA pelo aprendizado, discussões e convivência.

Aos meus pais, aos meus irmãos e a toda minha família pelo grande amor, carinho, apoio, paciência e compreensão.

Gostaria de agradecer em especial ao Leandro pelo constante apoio, incentivo, auxílio, compreensão e amor dedicados durante todo o período de estudos.



C A P E S

Este trabalho recebeu o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e do CTPetro/Financiadora de Estudos e Projetos através do programa de desenvolvimento de recursos humanos para o setor de petróleo e gás natural - UTFPR/PRH10, e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES), para o Estágio no Exterior - PDEE (Sanduíche).

RESUMO

BOSCHETTO, S. N. Otimização das Operações de Transferência e Estocagem em Rede de Dutos. 245 f. Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de estruturas de otimização para auxílio na tomada de decisão de atividades de planejamento e *scheduling* em dutos. Dois problemas são estudados: (i) O primeiro envolve um duto que interliga uma refinaria até um parque de tancagem operando o transporte de diversos produtos. Visto que a resolução de todo o problema em um único modelo de otimização tornou-se inviável devido a complexidade computacional, uma abordagem de solução alternativa é proposta para a obtenção do *scheduling* do duto, utilizando apenas modelos PLIM (Programação Linear Inteira Mista). O primeiro modelo proposto obtém a sequência de envio dos produtos e seus respectivos volumes. Fixando-se essas variáveis, o segundo modelo PLIM, já presente na literatura, é capaz de obter o *scheduling* final do duto em poucos segundos. Além disso, a qualidade da solução obtida através do sequenciamento PLIM mostrou-se superior ao sequenciamento heurístico previamente apresentado na literatura; (ii) O segundo é composto por uma rede com 30 dutos que interliga diversas áreas incluindo 4 refinarias, 2 terminais portuários, 2 clientes finais e 6 terminais de distribuição que recebem ou enviam diversos produtos derivados de petróleo. A rede em estudo possui características particulares que devem ser tratadas como, por exemplo, restrições locais, pulmão, reversão de fluxo, horossazonalidade e troca de turno dos operadores. Além disso, os dutos são compartilhados por diferentes produtos que utilizam rotas distintas. Dessa forma, paradas de bombeio devem ser avaliadas. Considerando-se que a complexidade da rede de dutos é sensivelmente maior que a realização do *scheduling* de um único duto, a decomposição desse problema se torna imprescindível. Detalhes do *scheduling* da rede devem ser obtidos, incluindo sequência de bombeamento em cada nó, volume das bateladas, restrições de tancagem e distribuição no tempo, sempre respeitando uma série de restrições operacionais. Dessa forma, a carga computacional para a determinação de um *scheduling* de curto prazo (*short-term scheduling*) com o cenário considerado é relevante. São propostos três modelos PLIM para esse problema: modelo de planejamento, modelo de alocação e sequenciamento e, finalmente, o modelo de temporização. A saída de um modelo PLIM é utilizada como entrada para outras estruturas e/ou modelos PLIM que são utilizados de forma hierárquica para a obtenção da solução desejada. Muitas análises foram realizadas por intermédio das soluções obtidas, que são apresentadas em tempo computacionalmente reduzido para cenários da indústria petrolífera.

Palavras-chave: Programação Linear Inteira Mista, *scheduling*, rede de dutos

ABSTRACT

BOSCHETTO, S. N. Optimization of scheduling activities in a real-world pipeline network. 245 f. Thesis – Graduate School of Electrical Engineering and Computer Science, Federal University of Technology - Parana. Curitiba, 2011.

This work addresses the problem of developing optimization structures to aid the operational decision-making of planning and scheduling activities in real-world pipelines. Two problems are studied: (i) The first one contemplates a pipeline connecting a refinery and a depot. The pipeline transports various products. An alternative solution approach is proposed to obtain the pipeline scheduling, using only MILP (Mixed Integer Linear Programming) models. Since the resolution of the entire problem in a unique optimization model became too hard due to the high computational complexity, the problem decomposition is developed. The first proposed model provides the pumping product-sequence and its volume, respectively. Fixing these variables, the MILP model is able to obtain the final scheduling of the pipeline in few seconds. The quality of the solution obtained by the MILP sequencing model is better than a previous heuristic sequencing published. (ii) The second system is composed by a network with 30 pipelines that connect different areas including 4 refineries, 2 harbors, 2 final clients, and 6 distribution terminals. They receive or send many oil derivatives. The studied pipeline network has particular features to be processed as, for instance, local constraints, surge tank operation, flow reverse operation, seasonal costs, and work shifts. Also, the pipelines are shared by different products that use different routes. In this way, pumping stoppages should be evaluated. Considering that the pipeline network complexity is higher than the unique pipeline scheduling procedure, the problem decomposition becomes essential. Scheduling details must be given, including pumping sequence in each node, volume of batches, tankage constraints and timing issues, while always respecting a series of operational constraints. Moreover, the computational burden to determine a short-term scheduling for the considered scenario is a difficult task. Three MILP models are proposed to address this problem: planning model, allocation and sequencing model and, finally, the timing model. The output of a model is used as input to other structures and/or MILP models. These models are managed in a hierarchical manner to obtain the desired solution. Many insights have been derived from the obtained solutions, which are given in a reduced computational time for oil industrial-size scenarios.

Keywords: Mixed Integer Linear Programming, scheduling, pipeline network

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de Dutos	26
Figura 2 – Rede de dutos	28
Figura 3 – Formulações realizadas	33
Figura 4 – Cadeia de suprimentos integrada	42
Figura 5 – Representação do Tempo	45
Figura 6 – Esquema de transferência	57
Figura 7 – Possibilidades de envio	58
Figura 8 – Esquema de decomposição	59
Figura 9 – Poliduto da Companhia Logística de Combustíveis	69
Figura 10 – Sequência e volumes (uv) enviados para os meses da tabela 4	72
Figura 11 – Estrutura hierárquica dos modelos: único duto	73
Figura 12 – Grafo direcionado da rede de claros	79
Figura 13 – Exemplo de rota	82
Figura 14 – Exemplos de movimentações permitidas	83
Figura 15 – Limites de estoque agregados por área	84
Figura 16 – Operação de reversão	86
Figura 17 – Metodologia de solução proposta para a rede de dutos	89
Figura 18 – Estrutura de decomposição - Planejamento/ <i>Scheduling</i>	94
Figura 19 – Volume mensal total movimentado por cenário	103
Figura 20 – Utilização dos dutos para todos os cenários	104
Figura 21 – Modelo de alocação e sequenciamento PLIM	112
Figura 22 – Critérios para cálculo de trc_b , tec_b , trd_b e ted_b	127
Figura 23 – Exemplos de janelas de tempo	128
Figura 24 – Divisão das abordagens de sequenciamento utilizadas	132
Figura 25 – Exemplo de influência de bombeamento	134
Figura 26 – Modelo PLIM de temporização (agregado)	141
Figura 27 – Exemplo de parada no recebimento de uma batelada	142
Figura 28 – Exemplo de movimentos pelo bombeio da batelada 40	148
Figura 29 – Exemplo de reversão de fluxo	151
Figura 30 – Exemplo de pulmão	152
Figura 31 – Exemplo de pulmão - Caso 1: $part_{\bar{b},\bar{c}} \geq part_{b,c}$	153
Figura 32 – Exemplo de pulmão - Caso 2: $\sum part_{\bar{b},\bar{c}} \geq part_{b,c}$	154
Figura 33 – Exemplo de pulmão - Caso 3: $\sum_{\bar{c}} part_{\bar{b},\bar{c}} \geq \sum part_{b,c}$	154
Figura 34 – Casos a serem analisados durante período horossazonal	162
Figura 35 – Possibilidades de bombeamentos e recebimentos simultâneos	168
Figura 36 – Exemplo de quebra de batelada por restrição local	168
Figura 37 – Divisão do modelo de temporização	175
Figura 38 – Comparação das F.O.'s dos modelos agregado e decomposto (MHT)	178
Figura 39 – Comparação temporal dos modelos agregado e decomposto	178
Figura 40 – Comparação do tempo médio dos modelos agregado e decomposto	179
Figura 41 – Diagrama de Gantt de bombeamento	183

Figura 42 – Diagrama de Gantt de recebimento	184
Figura 43 – Diagrama de Gantt de bombeamento - 7 dias	185
Figura 44 – Rota da batelada 67	186
Figura 45 – Dutos por onde passa a batelada 67	186
Figura 46 – Estoque do produto 10 em diferentes áreas	187
Figura 47 – Estoque do produto 6 em diferentes áreas	188
Figura 48 – Estoque do produto 14 em diferentes áreas	188
Figura 49 – Estoque do produto 18 em diferentes áreas	189
Figura 50 – Estoque do produto 20 em diferentes áreas	190
Figura 51 – Estoque do produto 27 em diferentes áreas	190
Figura 52 – Estoque do produto 26 em diferentes áreas	191
Figura 53 – Estoque do produto 21 em diferentes áreas	192
Figura 54 – Estoque do produto 25 em diferentes áreas	192
Figura 55 – Estoque do produto 31 em diferentes áreas	193
Figura 56 – Estoque do produto 34 em diferentes áreas	194
Figura 57 – Estoque do produto 35 em diferentes áreas	194
Figura 58 – Taxa de utilização dos dutos (Final <i>versus</i> Planejada)	195
Figura 59 – Diagrama de Gantt: Batelada 80	196
Figura 60 – Exemplo de restrição local	197
Figura 61 – Exemplo de reversão de produtos no duto	198
Figura 62 – Exemplo de pulmão em duas áreas consecutivas	198
Figura 63 – Gráfico do produto 34 na área N13 (com pulmão e reversão)	199
Figura 64 – Exemplo de horossazonalidade	200
Figura 65 – Exemplo de bombeio após a troca de turno	201

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo de trabalhos relacionados ao <i>scheduling</i> de dutos	53
Tabela 2 – Dados comuns utilizados em todos os cenários	69
Tabela 3 – Resultados do modelo FBS para seis meses consecutivos	71
Tabela 4 – Resultados do modelo VBS para seis meses consecutivos	71
Tabela 5 – Resultados - VBS+RM com 3 diferentes cenários	74
Tabela 6 – Comparação dos métodos de decomposição	75
Tabela 7 – Volume (10^3 uv) e extensão (km) aproximados dos dutos	79
Tabela 8 – Áreas e produtos onde ocorrem operação pulmão	84
Tabela 9 – Grupos de produtos compatíveis para transporte sequencial no duto	87
Tabela 10 – Produtos pertencentes a cada grupo	87
Tabela 11 – Parâmetros γ e β	101
Tabela 12 – Resultados computacionais do Modelo de Planejamento	101
Tabela 13 – Resultados gerais do Modelo de Planejamento	102
Tabela 14 – Volume (uv) movimentado por produto e rota - Cenário C3	106
Tabela 15 – Dados: Tamanho de lotes mínimo e máximo (em uv)	120
Tabela 16 – Resultados do Modelo de Alocação/Sequenciamento	121
Tabela 17 – Sequência e volume das bateladas para 1 semana - Cenário C3	122
Tabela 18 – Diferença do volume planejado \times sequenciado (uv)	123
Tabela 19 – Tabela Bateladas - Cenário C3	130
Tabela 20 – Parâmetros determinados pela pré-análise - Cenário C3	135
Tabela 21 – Exemplo de parâmetros determinados pela pré-análise	147
Tabela 22 – Possibilidades de movimentos entre \bar{n} e n em um duto d	150
Tabela 23 – Variáveis binárias em casos de custo elétrico elevado	162
Tabela 24 – Resultados do Modelo de Temporização - sem horo. e troca	173
Tabela 25 – Resultados do Modelo de Temporização - 7 dias de horo. e troca	173
Tabela 26 – Resultados do Modelo de Temporização - 15 dias de horo. e troca	174
Tabela 27 – Resultados do Modelo de Temporização - 30 dias de horo. e troca	174
Tabela 28 – Restrições utilizadas nos modelos MRL e MHT	176
Tabela 29 – Resultados do MHT - 30 dias de horo. e troca	177

LISTA DE SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo
B&B	<i>Branch & Bound</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CLC	Companhia Logística de Combustíveis
CP	Capacidade máxima de estocagem
C _x	Cenário <i>x</i>
FBS	<i>Fixed Batch Size</i>
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
ID ⁰	Estoque inicial
MHT	Modelo com Horossazonalidade e Troca de Turno
MRL	Modelo com Restrições Locais
PB	Programação Binária
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro SA
PL	Programação Linear
PLI	Programação Linear Inteira
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PLR	Programação Lógica por Restrições
PM	Programação Matemática
PNLIM	Programação Não Linear Inteira Mista
PO	Pesquisa Operacional
PR	Programação por Restrições
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RM	<i>Relvas' Model</i>
SC	<i>Supply Chain</i>
SCM	<i>Supply Chain Management</i>
TOC	<i>Theory Of Constraints</i>
uv	unidade volumétrica
VBS	<i>Variable Batch Size</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	MOTIVAÇÃO	26
1.2	OBJETIVOS	28
1.3	CONTRIBUIÇÕES/PUBLICAÇÕES	29
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	33
2	REVISÃO DA LITERATURA	37
2.1	PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA	37
2.1.1	Programação Linear	38
2.1.2	Programação Linear Inteira Mista	40
2.2	CADEIA DE SUPRIMENTOS (<i>SUPPLY CHAIN</i>)	41
2.2.1	Planejamento (<i>Planning</i>)	42
2.2.2	<i>Scheduling</i>	43
2.3	REPRESENTAÇÃO TEMPORAL EM PROBLEMAS DE <i>SCHEDULING</i>	43
2.4	TRANSPORTE UTILIZANDO OLEODUTOS	45
2.5	OTIMIZAÇÃO APLICADA A TERMINAIS E DUTOS	46
2.6	CONCLUSÃO	53
3	TRANSFERÊNCIA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO - ÚNICO DUTO	55
3.1	INTRODUÇÃO	55
3.2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	56
3.3	METODOLOGIA DE DECOMPOSIÇÃO - ÚNICO DUTO	58
3.3.1	Modelo PLIM de sequenciamento	59
3.3.2	Modelo PLIM detalhado	60
3.4	NOTAÇÃO	61
3.5	MODELO COM LOTES FIXOS (FBS)	61
3.5.1	Função objetivo	61
3.5.2	Restrições do modelo FBS	62
3.6	MODELO COM LOTE VARIÁVEL (VBS)	66
3.6.1	Restrições VBS	66
3.7	RESULTADOS	69
3.7.1	Estudo de caso 1	70
	<i>Resultados computacionais do modelo FBS</i>	70
	<i>Resultados computacionais do modelo VBS</i>	71
3.7.2	Estudo de caso 2	72
3.7.3	Estudo de caso 3	75
3.8	CONCLUSÃO	76
4	TRANSFERÊNCIA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO - REDE DE DUTOS E SUA CARACTERIZAÇÃO	77
4.1	INTRODUÇÃO	77
4.2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	78
4.3	RESTRICÇÕES OPERACIONAIS	79
4.3.1	Restrições nos órgãos	82

4.3.2 Restrições nos dutos	85
4.4 METODOLOGIA DE SOLUÇÃO PROPOSTA	87
4.5 CONCLUSÃO	90
5 MODELO PLIM DE PLANEJAMENTO - PLANNING	91
5.1 INTRODUÇÃO	91
5.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS	92
5.3 NOTAÇÃO	95
5.4 FUNÇÃO OBJETIVO	95
5.5 RESTRIÇÕES	96
5.6 RESULTADOS OBTIDOS	100
5.7 CONCLUSÕES	107
6 ALOCAÇÃO E SEQUENCIAMENTO PLIM	109
6.1 INTRODUÇÃO	109
6.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS	109
6.3 NOTAÇÃO	112
6.4 FUNÇÃO OBJETIVO	112
6.5 RESTRIÇÕES	113
6.5.1 Restrições de balanço de massa	113
6.5.2 Restrições de sequenciamento	114
6.5.3 Restrições de inventário	114
6.5.4 Restrições temporais	117
6.6 RESULTADOS COMPUTACIONAIS	120
6.7 CONCLUSÕES	123
7 DEMAIS BLOCOS UTILIZADOS NA DECOMPOSIÇÃO	125
7.1 INTRODUÇÃO	125
7.2 ALOCAÇÃO DE RECURSOS HEURÍSTICA	125
7.2.1 Entrada de dados	126
7.2.2 Cálculo das bateladas - Janelas de tempo	126
7.3 SEQUENCIAMENTO/REORDENAÇÃO	131
7.3.1 Reordenação utilizando meta-heurísticas	132
7.3.2 Reordenação PLIM	133
7.4 PRÉ-ANÁLISE	133
7.5 CONCLUSÕES	136
8 MODELO PLIM DE TEMPORIZAÇÃO - SCHEDULING	139
8.1 INTRODUÇÃO	139
8.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS	139
8.3 NOTAÇÃO	143
8.4 FUNÇÃO OBJETIVO	143
8.5 RESTRIÇÕES GERAIS	144
8.5.1 Restrição de satisfação do horizonte	145
8.5.2 Restrições de sequenciamento	146
8.5.3 Restrições de pulmão	151
<i>Possibilidade de tancagem intermediária</i>	<i>154</i>
<i>Bombeio imediato</i>	<i>157</i>
8.5.4 Restrições horossazonais	159
8.5.5 Restrições para troca de turno	164
8.5.6 Restrições de inventário	164
8.6 RESTRIÇÕES ESPECÍFICAS DA REDE EM ESTUDO - RESTRIÇÕES LOCAIS ..	166
8.6.1 Limitações de bombeio e/ou recebimento em 2 dutos	170

8.6.2	Limitações de bombeio e/ou recebimento em 3 dutos	170
8.7	RESULTADOS	171
8.8	MODELO PLIM DE TEMPORIZAÇÃO DECOMPOSTO	175
8.8.1	Modelo PLIM com restrições locais (MRL)	175
8.8.2	Modelo PLIM com restrições horossazonais e troca de turno (MHT)	176
8.8.3	Resultados obtidos	176
8.9	COMPARAÇÃO: MODELO AGREGADO × DECOMPOSTO	177
8.10	CONCLUSÕES	179
9	RESULTADOS OBTIDOS PARA A REDE DE DUTOS	181
9.1	RESULTADOS GERAIS	182
9.2	RESULTADOS ESPECÍFICOS	195
9.2.1	Influências de bombeio - Pedacos	195
9.2.2	Restrições locais	196
9.2.3	Restrições de reversão e pulmão	197
9.2.4	Restrições de horossazonalidade	200
9.2.5	Restrições de troca de turno	201
9.3	CONCLUSÕES	202
10	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	203
10.1	CONCLUSÕES	203
10.2	TRABALHOS FUTUROS	206
	REFERÊNCIAS	209
	APÊNDICE A – DEFINIÇÕES - CAPÍTULO 3	217
A.1	NOMENCLATURA - SEÇÃO 3.5	217
A.2	NOMENCLATURA - SEÇÃO 3.6	218
A.3	DEFINIÇÃO DE CONJUNTOS DE ÍNDICES E PARÂMETROS	219
A.3.1	Definição do conjunto S	219
A.3.2	Definição do conjunto S'	221
	APÊNDICE B – DEFINIÇÕES - CAPÍTULO 5	223
B.1	NOMENCLATURA	223
B.2	DEFINIÇÃO DE CONJUNTOS DE ÍNDICES E PARÂMETROS	224
	APÊNDICE C – DEFINIÇÕES - CAPÍTULO 6	227
C.1	NOMENCLATURA	227
C.2	DEFINIÇÃO DE CONJUNTOS DE ÍNDICES	228
	APÊNDICE D – DEFINIÇÕES - CAPÍTULO 7	231
D.1	NOMENCLATURA	231
	APÊNDICE E – DEFINIÇÕES - CAPÍTULO 8	233
E.1	NOMENCLATURA	233
E.2	DEFINIÇÃO DE CONJUNTOS DE ÍNDICES E PARÂMETROS	236
E.2.1	Parâmetros obtidos pela alocação de recursos	237
E.2.2	Parâmetros obtidos pela pré-análise	237
E.2.3	Parâmetros/Conjuntos obtidos pelo pré-processamento	237
	ANEXO A – DADOS	243

1 INTRODUÇÃO

As empresas estão frequentemente buscando meios para organizar suas atividades e utilizar eficientemente seus recursos, visando melhor desempenho segundo critérios econômicos. Em especial, na indústria petrolífera, qualquer melhora na execução de tarefas gera ganhos consideráveis. É importante um cronograma eficiente (programação) para as operações industriais, sejam elas de produção, transporte, armazenamento ou outras.

O transporte de produtos na indústria petrolífera, desde sua origem até o consumo, pode ser realizado de diversas maneiras, tais como, transporte rodoviário, ferroviário, marítimo e dutoviário. Em particular, no território brasileiro é realizado grande parte do transporte de óleos ou derivados de petróleo utilizando dutos. A figura 1 apresenta a rede de dutos brasileira, conforme disponibilizado em Transpetro (2008).

O transporte de produtos derivados de petróleo através de dutos tem se mostrado um dos meios mais confiáveis e econômicos (SASIKUMAR *et al.*, 1997). Ele difere dos demais modais por fornecer um modo contínuo de distribuição, enquanto todos os outros não oferecem este modo de operação.

Assim, o crescente interesse pelas áreas de planejamento e programação da produção por parte da indústria petrolífera vem motivando o desenvolvimento de ferramentas de auxílio à tomada de decisões, em especial aquelas que empregam técnicas de otimização (PINTO *et al.*, 2000; MAGATÃO *et al.*, 2004; RELVAS *et al.*, 2006; NEVES-JR *et al.*, 2007b; CAFARO; CERDÁ, 2008a; REJOWSKI; PINTO, 2008). Além de visar a utilização dos recursos de uma forma mais eficiente, segura e lucrativa, estes problemas, muitas vezes, oferecem grandes desafios devido à sua dimensão e complexidade.

Embora sendo uma atividade fundamental, a programação relacionada à distribuição de produtos através de dutos ainda não dispõe de uma solução consolidada. O objetivo é obter um bom desempenho sem comprometer o nível de serviço oferecido aos clientes quanto aos aspectos de qualidade, quantidade e prazo de entrega dos produtos.

Baseado na descrição acima, este trabalho tem como foco propor abordagens para solu-



Figura 1 – Mapa de Dutos
Fonte: Transpetro (2008)

cionar problemas de transferência de derivados de petróleo utilizando polidutos. Na sequência, este capítulo traz uma breve descrição da motivação deste trabalho, objetivos e contribuições.

1.1 MOTIVAÇÃO

O sucesso de estratégias de otimização em engenharia de processos motiva constantemente o desejo de formular e resolver problemas de larga escala sobre um crescente conjunto de domínios (GROSSMANN; BIEGLER, 2004). Em particular, cadeias de suprimento de petróleo são redes complexas devido a diversos fatores. Por exemplo, pode-se citar a variabilidade de operações que é altamente dependente e influente no mundo econômico e a diversidade nos tipos de operações, tarefas e departamentos, além de sua grande extensão, tanto de maneira geo-

gráfica, quanto em termos numéricos (RELVAS, 2008). Desse modo, atividades de *scheduling* relacionados à distribuição de derivados de petróleo têm recebido grande interesse nos últimos anos.

A condução da programação de atividades em oleodutos requer a análise de um grande número de variáveis. Assim, uma solução que contemple todas as variáveis envolvidas, determinando uma boa política de condução da rede de dutos, não é uma tarefa trivial, nem mesmo para especialistas experientes. Na maioria das companhias de petróleo, as atividades de *scheduling* dos oleodutos são realizadas por especialistas (programadores), com base em sua experiência e através do uso de cálculos manuais. Conseqüentemente, muitas refinarias de petróleo desenvolvem ferramentas internas para lidar com a programação de suas operações (MORO; PINTO, 2004).

Além disso, estudos da literatura geralmente estão focados em topologias de dutos mais restritivas e menores, com um conjunto reduzido de restrições operacionais que, apesar de tornar o problema mais tratável, estão longe de representar problemas reais. Esta é uma consequência do grande número de restrições de sequenciamento e tempo envolvidos. Este problema é agravado quando topologias maiores e mais genéricas são consideradas. Para consolidar suas decisões, programadores normalmente procuram por indicadores confiáveis que possam ter influência direta com, por exemplo, políticas de tancagem e de produção de refinarias, ou mesmo políticas de carga/descarga de navios. Logo, há uma motivação em desenvolver modelos que auxiliem as atividades de *scheduling* de curto e médio prazos em dutos dentro da cadeia de abastecimento de petróleo.

Métodos eficientes são requeridos para determinar o *scheduling* detalhado de atividades operacionais nos oleodutos, pois estes são problemas complexos e altamente combinatoriais. Obter uma solução para este tipo de problema requer a análise de um grande número de alternativas, uma vez que o conjunto de soluções é grande (MENDEZ *et al.*, 2006).

Logo, há uma preocupação em dispor de um modelo que otimize as operações de transferência de petróleo ou derivados, obtendo soluções viáveis em escala de tempo compatível com as operações de refinarias ou portos. Frequentemente aparecem novos trabalhos nessa área, como resumido em Magatão *et al.* (2010).

Dentre esses trabalhos, muitos utilizam soluções modulares¹ para resolver problemas de otimização, com o intuito de encontrar boas soluções em uma escala de tempo cada vez menor, como por exemplo, Felizari *et al.* (2007), Más (2001) e Relvas *et al.* (2009).

¹As soluções dos problemas são obtidas através da decomposição do problema em vários sub-problemas que são resolvidos separadamente. Resultados de um sub-problema pode ser utilizado como dados de entrada para outro sub-problema.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver técnicas de otimização para auxílio à tomada de decisão para resolver o problema de transferência de derivados de petróleo utilizando polidutos, com base em modelos de programação matemática. Dessa forma, serão tratados dois problemas:

1. Transferência e estocagem de derivados de petróleo, utilizando um poliduto da empresa portuguesa Companhia Logística de Combustíveis (CLC);
2. Transferência e estocagem de derivados de petróleo, utilizando uma rede com vários polidutos. Nesse problema é tratado o sistema de distribuição de derivados da PETROBRAS (Petróleo Brasileiro SA), presente na região sudeste brasileira, conforme a figura 2.



Figura 2 – Rede de dutos

Dentre os objetivos específicos que contemplam ambos os problemas (único duto e rede de dutos), pode-se citar:

- Propor o desenvolvimento de modelos baseados em programação matemática que possuam características simples, utilizando estruturas pré-definidas (por exemplo, utilização de pré-processamento de dados e geração de conjuntos esparsos);
- Estudar e aplicar métodos e técnicas de programação matemática que visem diminuir o esforço computacional dos modelos de otimização. Um pré-processamento prévio juntamente com PLIM (Programação Linear Inteira Mista) mostrou-se eficiente em trabalhos apresentados recentemente na literatura como, por exemplo, em Felizari (2009);
- Do ponto de vista de complexidade, propor a divisão dos problemas em módulos para um melhor tratamento dos parâmetros e restrições, melhorando a representação da operação dos dutos.

Além dos objetivos já destacados, busca-se atingir outros objetivos para o problema que utiliza uma rede de dutos. Dentre eles, destacam-se:

- Propor modelos que permitam a solução de problemas com múltiplos dutos, tratando conjuntamente a programação de operações e o compartilhamento de recursos através de técnicas que visem reduzir o espaço de busca;
- Buscar uma evolução em relação aos trabalhos anteriormente desenvolvidos (FELIZARI, 2009) nos seguintes aspectos:
 - Ampliação do escopo (a rede atual envolve 14 áreas e 30 trechos de dutos);
 - Ampliação no número de produtos transportados (mais de 14 derivados de petróleo);
 - Detalhar perfis de inventários nos terminais e refinarias;
 - Maior precisão nos cálculos dos tempos de recebimento dos produtos;
 - Determinação mais precisa dos tempos de parada durante um bombeio;
 - Estimativa da vazão de bombeio nas áreas de origem considerando o limite suportado pelos dutos.

Através da solução do problema, deseja-se determinar as quantidades a serem transportadas nos dutos durante o horizonte de tempo de operação, os tempos em que essas operações devem ocorrer, bem como recursos (áreas e dutos) que serão utilizados. A sequência exata de operações na planta e em cada órgão pode ser obtida a partir da decomposição do problema, além da possibilidade de examinar possíveis gargalos da rede, através de altas taxas de utilização de alguns dutos. Além disso, será possível identificar gargalos nos inventários de refinarias, terminais e clientes. Para o problema da rede de dutos, é possível, portanto, propor caminhos alternativos para o transporte do produto para os mesmos órgãos de origem e destino.

1.3 CONTRIBUIÇÕES/PUBLICAÇÕES

Os seguintes trabalhos, relacionados à tese, encontram-se já publicados, ou em fase de análise para publicação. Outros trabalhos vem sendo desenvolvidos para futuras publicações:

1. BOSCHETTO, S. N.; FELIZARI, L. C.; YAMAMOTO, L.; MAGATÃO, L.; STEBEL, S. L.; NEVES-JR, F.; ARRUDA, L. V. R.; LÜDERS, R.; RIBAS, P. C.; BERNARDO, L. F. J. An integrated framework for operational scheduling of a real-world pipeline network. In: BRAUNSCHWEIG, B.; JOULIA, X. (Ed.). **Computer Aided Chemical Engineering**. Amsterdam: Elsevier, 2008a. p. 259-264.

2. BOSCHETTO, S. N.; FELIZARI, L. C.; YAMAMOTO, L.; MAGATÃO, L.; STEBEL, S. L.; NEVES-JR, F.; LÜDERS, R.; ARRUDA, L. V. R.; RIBAS, P. C.; BERNARDO, L. F. J. Otimização das operações de transporte de derivados de petróleo em redes de dutos. In: IBP. **Rio Oil & Gas Conference and Exposition**. Rio de Janeiro, Brasil, 2008b.
3. BOSCHETTO, S. N.; NEVES-JR, F.; MAGATÃO, L.; CZAIKOWSKI, D. I.; BRONDANI, W. M. Modelo PLIM com Pré-análise Aplicado na Operação de Terminais Petrolíferos. In: SOBRAPO. **XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, João Pessoa, Brasil, 2008c.
4. BOSCHETTO, S. N.; BRONDANI, W. M.; MAGATÃO, L.; FELIZARI, L. C.; STEBEL, S. L.; NEVES-JR, F.; ARRUDA, L. V. R.; RIBAS, P. C.; BERNARDO, L. F. J. Transporte otimizado de produtos em redes de dutos. **Petro & Química**, v. 318, p. 32-36, 2009a.
5. BOSCHETTO, S. N.; NEVES-JR, F. Modelos MILP para a temporização das operações de transferência e estocagem de derivados de petróleo em redes de dutos. In: ABPG. **5º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás - PDPETRO**. Fortaleza, Brasil, 2009b.
6. BOSCHETTO, S. N.; NEVES-JR, F.; MAGATÃO, L.; BRONDANI, W. M.; ARRUDA, L. V. R.; RIBAS, P. C. A combined approach for operational scheduling of a real-world pipeline network. In: ALVES, R. M. B.; NASCIMENTO, C. A. O.; BISCAIA-JR, E. C. (Ed.). **Computer Aided Chemical Engineering**. Amsterdam: Elsevier, 2009c. p. 621-626.
7. BOSCHETTO, S. N.; RELVAS, S.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; NEVES-JR, F. Heuristic batch sequencing for multiproduct pipeline scheduling. In: APDIO. **IO2009**. Lisboa, Portugal, 2009d.
8. BOSCHETTO, S. N.; MAGATÃO, L.; BRONDANI, W. M.; NEVES-JR, F.; ARRUDA, L. V. R.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; RELVAS, S. An operational scheduling model to product distribution through a pipeline network. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 12, p. 5661-5682, 2010a.
9. BOSCHETTO, S. N.; MAGATÃO, L.; NEVES-JR, F. Modelo PLIM de alocação e sequenciamento de bateladas aplicado em uma rede de dutos. In: SOBRAPO. **XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Bento Gonçalves, Brasil, 2010b.
10. BOSCHETTO, S. N.; POLLI, H. L.; MAGATÃO, L.; NEVES-JR, F.; RIBAS, P. C. Modelo de planejamento para uma rede de dutos real utilizando programação linear inteira

- mista. In: IBP. **Rio Oil & Gas Conference and Exposition**. Rio de Janeiro, Brasil, 2010c.
11. BOSCHETTO, S. N.; RELVAS, S.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; NEVES-JR, F. A decomposition approach for the operational scheduling of a multiproduct pipeline. In: COLEMAN, D. (Ed.). **Computer Aided Chemical Engineering**. Amsterdam: Elsevier, 2010d. p. 1207-1212.
 12. RELVAS, S.; BOSCHETTO, S. N.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; NEVES-JR, F. MILP models for multiproduct pipeline scheduling with inventory management: a comparative approach. In: EngOpt. **2nd International Conference on Engineering Optimization**. Lisboa, Portugal, 2010.
 13. BOSCHETTO, S. N.; ; MAGATÃO, L.; NEVES-JR, F.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D. A MILP planning model for a real-world multiproduct pipeline network. In: PISTIKOPOULOS, E.N.; GEORGIADIS, M.C.; KOKOSSIS, A.C. (Ed.). **Computer Aided Chemical Engineering**. Amsterdam: Elsevier, 2011.

Dentre os artigos acima enumerados:

- Boschetto *et al.* (2009d), Boschetto *et al.* (2010d) e Relvas *et al.* (2010) são abordados no Capítulo 3, onde são apresentados modelos de otimização envolvendo um duto. A contribuição deste capítulo consiste na proposta de dois modelos PLIM (um modelo utiliza tamanhos fixos de lotes para limitar o tamanho das bateladas, enquanto o outro utiliza tamanho variável de lotes). Ambos os modelos realizam o sequenciamento e alocação de produtos e volumes às bateladas. Com o uso de um dos modelo PLIM de sequenciamento propostos, a obtenção do *scheduling*, utilizando o modelo de Relvas *et al.* (2006), é melhor e mais facilmente realizada.
- A estrutura de decomposição apresentada no capítulo 4 está relacionada as estruturas propostas pelos trabalhos de Boschetto *et al.* (2008a), Boschetto *et al.* (2009c) sendo que um artigo foi publicado na revista Petro & Química (BOSCHETTO *et al.*, 2009a). Esse capítulo contribui na proposta de uma abordagem diferenciada (das abordagens já presente na literatura), de divisão do problema. A hierarquização proposta une escopos de planejamento e *scheduling*, viabilizando a obtenção de uma solução e a realização do planejamento/*scheduling* da rede de dutos em baixo tempo computacional. Além disso, não há abordagens de soluções viáveis na literatura para o tratamento de redes de dutos com proporções e restrições similares à aqui estudada.

- O capítulo 5 é baseado no trabalho desenvolvido por Boschetto *et al.* (2011) e Boschetto *et al.* (2010c). Nesse capítulo, um modelo de planejamento é apresentado para a rede de dutos descrita no capítulo anterior. Dentro da cadeia de suprimento², vários artigos que realizam a otimização de planejamento foram publicados e, contudo, a maioria destes trabalhos está relacionado ao planejamento de refinarias envolvendo processos de *blending* e alocação de tanques. De maneira distinta, o modelo de planejamento proposto no capítulo 5 é inspirado no problema clássico de transportes, onde o balanço entre oferta e demanda da rede de dutos é realizado, considerando restrições de rotas e utilização máxima dos dutos.
- O capítulo 6 é baseado no trabalho apresentado por Boschetto *et al.* (2010b) e utiliza o resultado do modelo de planejamento do capítulo 5 para a geração de bateladas e de uma sequência de bombeio. A principal contribuição deste modelo é a extensão de um dos modelos de sequenciamento e alocação proposto no capítulo 3 para a rede de dutos, além de buscar uma resposta quanto à viabilidade da realização do *scheduling* da rede sem a utilização de heurísticas.
- O artigo de Boschetto *et al.* (2008c) destaca a iteração do modelo de temporização com a pré-análise, que é apresentada na seção 7.4. A utilização de um pré-processamento (aqui denominado de pré-análise) anteriormente ao modelo de temporização também é inédita. Esta interação entre a pré-análise e o modelo de temporização é uma contribuição relevante, já que possibilita a obtenção do *scheduling* final em baixo tempo computacional.
- O modelo de temporização presente no capítulo 8, é fruto do trabalho apresentado por Boschetto *et al.* (2008b) que gerou um artigo para a revista *Industrial & Engineering Chemistry Research* (BOSCHETTO *et al.*, 2010a). A seção 8.8 resultou no trabalho apresentado por Boschetto e Neves-Jr (2009b). A contribuição deste modelo é a obtenção de solução do *scheduling* final da rede de dutos em baixo tempo computacional, respeitando várias restrições operacionais que normalmente não estão todas presentes em modelos da literatura, como por exemplo, restrições de troca de turno dos operadores, pulmão, reversão, restrições horossazonais e restrições locais.

Além disso, conforme publicado por PETROBRAS (2009), o trabalho referente a presente tese ganhou a quarta edição do Prêmio Petrobras de Tecnológica na categoria doutorado sobre o tema: Tecnologia de Logística e de Transporte de Petróleo, Gás e Derivados.

No intuito de elucidar ao leitor os modelos que serão abordados nos capítulos seguintes, a figura 3 ilustra as formulações realizadas para: (i) único duto; (ii) rede de dutos.

²O conceito de cadeia de suprimento é definido no capítulo seguinte

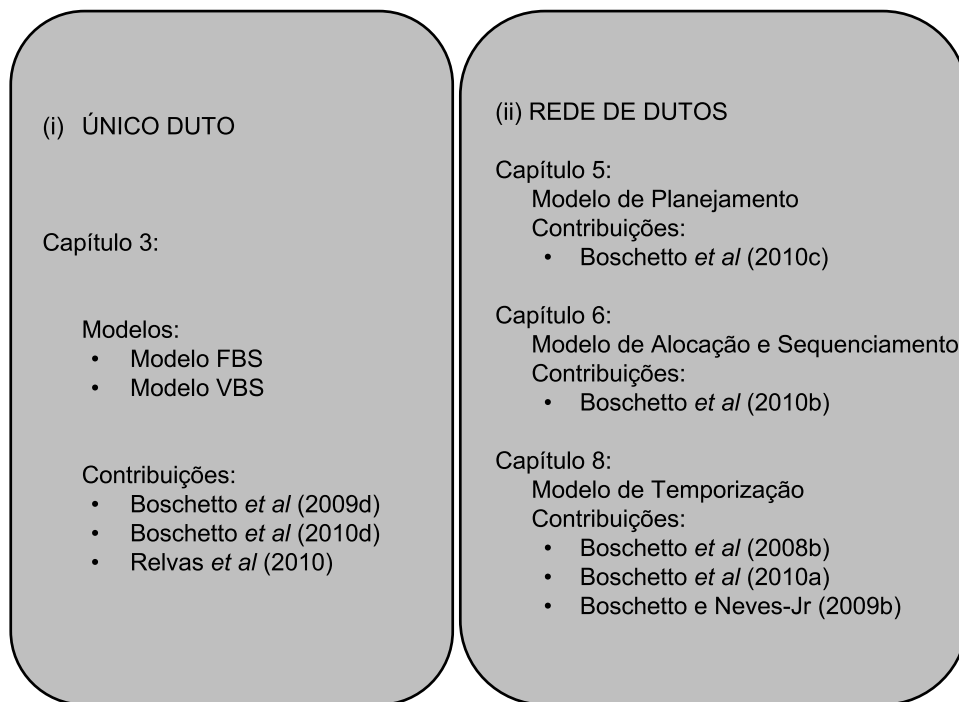


Figura 3 – Formulações realizadas

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado da seguinte maneira: O presente capítulo faz uma introdução ao tema da tese.

O capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica, apresentando uma introdução sobre as técnicas de otimização usuais para resolução de problemas de transferência e estocagem utilizando dutos, além de algumas definições sobre Cadeia de Suprimentos (SC - *Supply Chain*) e suas derivações. A importância do transporte dutoviário é aqui destacada e, finalmente, são apresentados alguns trabalhos que utilizam as técnicas apresentadas para resolver problemas de transferência e estocagem utilizando dutos.

O capítulo 3 apresenta um sistema que compreende um poliduto que transporta derivados de petróleo de uma refinaria para um centro de distribuição, tratado por Relvas *et al.* (2006). Nesse sistema é realizado o transporte de diversos derivados de petróleo suprimindo a demanda do centro de distribuição. Além disso, são propostos modelos PLIM para a realização do sequenciamento, alocação de produtos e volumes às bateladas. Com o uso de um modelo PLIM de sequenciamento, a obtenção do *scheduling*, utilizando o modelo de Relvas *et al.* (2006), é mais facilmente realizada.

O capítulo 4 é dedicado à descrição do segundo problema a ser abordado: O problema

de transferência de derivados de petróleo em uma rede de dutos. O capítulo traz a descrição da rede de dutos, suas particularidades e características, bem como a maneira utilizada atualmente para a realização da programação das atividades, uma tarefa realizada pelos programadores e que necessita de uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão. Em seguida são apresentadas as restrições da rede, tanto para os órgãos quanto para os dutos. Finalmente, é proposta uma abordagem de divisão do problema. A divisão do problema viabiliza a obtenção de uma solução e a realização do planejamento/*scheduling* da rede de dutos em baixo tempo computacional.

O primeiro modelo derivado da decomposição proposta no capítulo 4 é apresentado no capítulo 5. Um modelo PLIM de planejamento é proposto para a realização do transporte de derivados de petróleo de órgãos produtores visando suprir a demanda dos terminais, clientes finais ou mesmo terminais portuários. O problema é inspirado no problema clássico de transportes, onde o balanço entre oferta e demanda é realizado, considerando restrições de rotas e utilização máxima dos dutos. Além disso, outras restrições particulares devem ser consideradas para a viabilização do transporte utilizando dutos.

O capítulo 6 apresenta um modelo PLIM para a realização da alocação e sequenciamento para a rede de dutos. Essa abordagem é baseada no modelo PLIM apresentado no capítulo 3 e considera como entrada o planejamento prévio fornecido pelo modelo PLIM apresentado no capítulo 4. Dado o planejamento geral, deseja-se obter, através do capítulo 6, a sequência de bombeio, o produto e volume alocado a cada uma das bateladas. Através do modelo de alocação e sequenciamento PLIM para a rede de dutos, busca-se uma resposta quanto à viabilidade da realização do *scheduling* da rede sem a utilização de heurísticas.

Heurísticas e modelos adicionais compõem os demais blocos da divisão do problema. Esses blocos são apresentados no capítulo 7. Os blocos apresentados são objetos de estudo de outros trabalhos e não fazem parte do foco da presente tese. Eles são apresentados de forma sucinta para o entendimento de todas as etapas a serem seguidas para a obtenção da solução final. Dentre as heurísticas e modelos apresentados no capítulo estão: sequenciamento e ordenação realizados heurísticamente, reordenação do sequenciamento heurístico utilizando PLIM ou meta-heurísticas, além do algoritmo de pré-análise.

Finalmente, o último e maior modelo PLIM desenvolvido é apresentado no capítulo 8. O modelo de temporização PLIM sugere os tempos de início e final de bombeamento, além do recebimento de todas as bateladas previamente sequenciadas (reordenadas ou não), respeitando uma série de restrições operacionais presente nos órgãos. O modelo utiliza abordagem de tempo contínuo e busca satisfazer os estoques nos órgãos de origem e destino.

Posteriormente, o capítulo 9 apresenta os resultados finais obtidos para a rede de dutos

descrita no capítulo 4. Para a obtenção dos resultados, os modelos/heurísticas apresentados nos capítulos 5, 7 e 8 são utilizados de forma hierárquica, onde o resultado de um modelo/ algoritmo é utilizado como dado de entrada dos modelos subsequentes. A estrutura hierárquica desses modelos e algoritmos é apresentada no capítulo 4, onde é proposta a estrutura de divisão do problema.

Por fim, é apresentada a conclusão da tese através do capítulo 10, ressaltando as vantagens e possíveis desvantagens dos algoritmos e modelos desenvolvidos. Sugestões de trabalhos futuros também fazem parte desse capítulo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Esse capítulo traz uma revisão dos métodos utilizados para a resolução do problema de planejamento/*scheduling* da rede de dutos. A Programação Linear Inteira Mista (PLIM) e Programação Linear (PL) são brevemente apresentadas como forma de revisão de entendimento inicial dos métodos de programação matemática. A definição de cadeia de suprimentos (*supply chain*) é apresentada de forma sucinta, seguida pela relevância na utilização de oleodutos na indústria petrolífera. Por fim, uma revisão dos problemas relacionados ao *scheduling* de dutos presentes na literatura, suas estratégias para obtenção de soluções e principais resultados são apresentados.

2.1 PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

A Programação Matemática (PM) engloba técnicas e algoritmos para elaborar e solucionar modelos expressos matematicamente. Os modelos podem ser entendidos como um conjunto de equações, inequações e dependências lógicas, que correspondem a relacionamentos apresentados por estruturas reais (MAGATÃO, 2001).

Como sugerido por Linares *et al.* (2001), a base do desenvolvimento de modelos matemáticos consiste em um conjunto de processos estruturados, como segue:

1. *Identificação do problema*: consiste em obter, analisar e caracterizar o problema, assim como estabelecer uma estrita coordenação entre o modelador e o especialista. Nesta etapa definem-se as hipóteses que devem ser validadas nas etapas seguintes, sendo que os dados obtidos são de suma importância para representar o realismo do problema e a aplicação das soluções. Muitas vezes esta etapa torna-se o gargalo do processo de modelagem, devido à carência ou mesmo excesso de informações;
2. *Formulação matemática*: é a representação matemática do problema de otimização, definindo suas variáveis, função objetivo, restrições e parâmetros. Nesta etapa deve-se analisar a complexidade do problema e escolher a melhor de modelagem, representação do

tempo e de solução;

3. *Resolução*: consiste em traduzir a formulação matemática do problema em uma linguagem de modelagem para a obtenção da solução numérica ótima ou quase-ótima (dependendo da complexidade do problema, a solução pode ser a obtenção de uma solução viável);
4. *Verificação e validação*: os erros de formulação devem ser depurados e corrigidos, de tal forma que o modelo reproduza as características especificadas. Nesta etapa a validade das hipóteses é comprovada através dos resultados obtidos, contrastando-os com situações já transcorridas ou comprovando a coerência dos resultados em relação a novos cenários;
5. *Interpretação e análise dos resultados*: permite conhecer em detalhes o comportamento do modelo através da análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada. Diferentes exemplos podem ser experimentados, comprovando a robustez das soluções. Nesta etapa é fundamental a interação com os especialistas envolvidos, sendo que soluções alternativas quase-ótimas, mas suficientemente atrativas podem ser encontradas;
6. *Implantação e manutenção*: etapa onde o desenvolvimento do modelo passa por um processo de difusão entre os especialistas. Nessa fase, os resultados serão aplicados necessitando de uma documentação clara, precisa e completa para facilitar a tarefa de utilização e manutenção.

Dentre os problemas reais que podem ser tratados através de técnicas de programação matemática, estão os problemas de planejamento, *scheduling* e de transporte onde se inserem os problemas a tratar nesta tese. Dentro da PM existem duas técnicas muito utilizadas: PL e PLIM.

2.1.1 Programação Linear

A PL tornou-se a primeira técnica da Pesquisa Operacional (PO) utilizada para a otimização de problemas (LUENBERGER, 2003; BAZAARA *et al.*, 1990). É um método de otimização muito utilizado para resolver problemas de alocação de recursos, que possuam seus modelos representados por expressões lineares (PUCCINI; PIZZOLATO, 1990). Os fundamentos da programação linear são baseados no método simplex, proposto por Dantzig (1963) e utilizado até hoje como uma técnica fundamental da pesquisa operacional.

Para Murty (1985), “a programação linear trata dos problemas em que uma função objetivo linear deve ser otimizada (isto é, maximizada ou minimizada) sujeito a restrições com

equações e inequações lineares e limitações no sinal das variáveis”.

Os modelos de otimização linear podem ser identificados através das seguintes características (PUCCINI; PIZZOLATO, 1990):

1. Um critério de escolha das variáveis constituído por uma função linear das variáveis. Esta função é denominada função objetivo e seu valor deve ser otimizado (maximizado ou minimizado);
2. As relações de interdependência entre as variáveis se expressam por um conjunto de equações e/ou inequações lineares. Essas relações são denominadas restrições;
3. As variáveis do modelo são não-negativas, ou seja, positivas ou nulas.

O modelo pode ser representado matematicamente, em notação matricial, através da formulação 1 (MURTY, 1985):

$$\begin{aligned}
 & \min \quad z(x) = cx, \\
 & \text{sujeito a} \\
 & \quad Ax \rho b \\
 & \quad x \in \mathbb{R}_+^n
 \end{aligned} \tag{1}$$

onde, $z(x)$ é a função objetivo que deve ser maximizada ou minimizada (na formulação apresentada ela está sendo minimizada), A é uma matriz $m \times n$ com os coeficientes das variáveis, b é um vetor coluna de tamanho m com os recursos disponíveis, c é um vetor linha de tamanho n contendo os custos unitários (se a função objetivo for maximizada c representará os lucros unitários), x representa um vetor coluna de tamanho n com o conjunto de variáveis do problema, e ρ representa operadores matemáticos ($\rho \in \{=, \geq, \leq\}$).

Para Murty (1985) seria conveniente se a resposta final a um problema desse tipo pudesse ser obtida a partir de uma fórmula simples, em função dos parâmetros de entrada. Entretanto, os problemas de PL podem somente ser resolvidos por meio de um “algoritmo”, ou seja, um procedimento passo-a-passo que conduz a uma resposta do problema em um número finito de etapas.

O método simplex, desenvolvido por Dantzig em 1947, é utilizado para obter a solução ótima de um modelo de programação linear. A partir de uma solução factível, o algoritmo procura a solução ótima explorando as propriedades de um problema linear.

Apesar do método simplex ser utilizado para obter soluções ótimas em um modelo de programação linear, não é possível garantir valores inteiros para as variáveis do modelo (as variáveis assumem valores $\in \mathbb{R}_+$).

Se algumas das variáveis do modelo devem assumir valor inteiro ou binário (0 ou 1), este deve ser tratado como um modelo de PLIM, o qual é apresentado a seguir.

2.1.2 Programação Linear Inteira Mista

A Programação Linear Inteira (PLI) é um caso particular da PL, pois também envolve modelos lineares. Entretanto, as variáveis presentes no modelo matemático devem apresentar apenas valores inteiros (NEMHAUSER; WOLSEY, 1988). Deste modo, além da aplicação do Algoritmo Simplex para obter a solução, são necessários métodos adicionais para viabilizar uma solução.

Ainda dentro da programação linear inteira, tem-se a Programação Binária (PB), onde além de inteiras, as variáveis devem assumir somente os valores 0 ou 1. A programação binária é muito usada em modelos matemáticos onde as variáveis assumem valores verdadeiro ou falso.

Entretanto, na maioria dos problemas, algumas variáveis assumem valores reais e outras são do tipo inteiras ou binárias. Neste caso, tem-se a PLIM. Dentre os métodos utilizados para obter a solução de um modelo PLI, PB ou PLIM, destacam-se:

- *Cutting planes*: inicialmente proposto por Gomory (1958), neste método são geradas novas restrições, denominadas de cortes, que reduzem a cada passo do processo a região viável até ser encontrada uma solução inteira ótima;
- Métodos baseados em lógica (*Logic-based methods*): métodos nos quais restrições disjuntivas ou técnicas de inferência são empregadas, sendo expressas por meio de variáveis booleanas (WILLIAMS, 1999);
- Método *Branch and Bound* (B&B): é a abordagem mais comum para resolução de problemas PLIM, originalmente proposto por Land e Doig (1960). É baseado na estratégia de realizar sucessivo particionamento no espaço de soluções válidas. O procedimento utilizado para dividir o espaço de soluções não é único e, portanto, há variações do método. Detalhes a respeito do B&B, funcionamento e limitações podem ser encontrados em Nemhauser e Wolsey (1988).

2.2 CADEIA DE SUPRIMENTOS (*SUPPLY CHAIN*)

O conceito da Cadeia de Suprimentos (*Supply Chain* - SC), que apareceu nos anos 90, vem sendo foco recente de muito interesse, pois a possibilidade de fornecimento de um gerenciamento integrado de uma SC pode reduzir a propagação de eventos inesperados (ou mesmo indesejáveis) através da rede. Além disso, é possível melhorar os lucros de todas as partes envolvidas.

O problema de Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos (*Supply Chain Management* - SCM) pode ser considerado em diferentes níveis, dependendo das variáveis estratégicas, táticas e operacionais envolvidas na tomada de decisão (SIMCHI-LEVI *et al.*, 2007):

- O nível estratégico contém as decisões que terão efeitos em longo prazo na empresa. É focado na formulação da SC, e requer a configuração ótima para a rede de SC inteira, incluindo a formulação de plantas inseridas.
- O nível tático envolve o gerenciamento de decisões de longo/médio prazo, que são tipicamente atualizadas dentro de um intervalo de três meses a um ano. Aqui está incluída decisões de aquisições e produtos, política de inventário, e estratégias de transporte.
- O nível operacional está relacionado às decisões diárias como o *scheduling*, janelas de tempo de ofertas, roteamento e carregamentos.

Logo, nos modelos SC, o tempo é tratado dentro de um planejamento hierárquico: o estratégico longo, o tático médio e o operacional curto prazo. As atividades dentro de cada nível hierárquico cobrem também a sobreposição de tempo. A coordenação do tempo ao longo da estrutura hierárquica de planejamento fornece modelos operacionais integrados coerentemente e modelos táticos multiperíodo relativamente agregados.

Como apresentado em Grossmann (2004) para companhias de processos industriais permanecerem competitivas e economicamente viáveis é necessária a otimização da cadeia de suprimento, onde custos e inventário deverão ser reduzidos e as operações realizadas eficientemente, enquanto a melhoria da qualidade do produto deve ser uma preocupação contínua.

A indústria petrolífera pode ser caracterizada como um cadeia de suprimentos onde estão presentes os níveis de decisão estratégico, tático e operacional. Apesar da complexidade envolvida no processo de tomada de decisão em cada nível, muito do gerenciamento é ainda baseado em heurísticas ou em modelos lineares simples (NEIRO; PINTO, 2004).

Além disso, a cadeia de suprimentos dentro da indústria petrolífera compreende muitas etapas intermediárias, iniciando pela fase de exploração do poço, refino, transporte, chegando finalmente à distribuição e entrega de produtos finais. A figura 4 ilustra um exemplo de SC integrada. As principais atividades operacionais incluem planejamento (*planning*), *scheduling*, otimização em tempo real e controle de inventário (GROSSMANN, 2005).

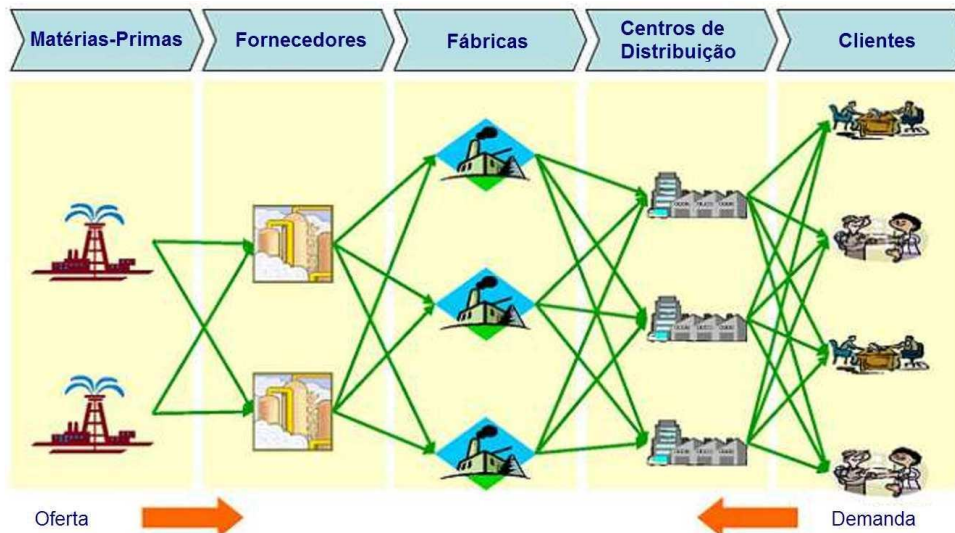


Figura 4 – Cadeia de suprimentos integrada
Fonte: Grossmann (2005)

Finalmente, a cadeia de suprimentos petrolífera é um dos sistemas onde melhorias são requeridas e a busca pela otimização das atividades e recursos é frequente. A otimização deve ser realizada desde o nível estratégico até o operacional. Visando os níveis tático/operacional, as atividades de planejamento (*planning*) e *scheduling* são de grande importância dentre as atividades dentro da cadeia, pois incluem produção, transporte, estocagem, entre outros.

2.2.1 Planejamento (*Planning*)

Planejamento pode ser definido como uma função básica de gerenciamento que envolve a formulação de um ou mais planos, buscando alcançar um balanço ótimo das necessidades (ou demandas) com os recursos (ou oferta) disponíveis (BUSINESS-DICTIONARY, 2010). O processo de planejamento:

1. identifica as metas ou objetivos a serem alcançados;
2. formula estratégias para atingir essas metas;
3. arranja ou cria os meios necessários; e

4. implementa, direciona e monitora todos os passos em uma sequência adequada.

Magatão (2001) apresenta a diferença básica entre o planejamento e a programação das atividades produtivas (*planning* × *scheduling*). Enquanto o planejamento busca respostas para um horizonte de tempo mais amplo procurando solucionar problemas estratégicos, as técnicas de *scheduling* buscam formas de viabilizar os procedimentos estratégicos no ambiente de produção.

2.2.2 Scheduling

Nas operações de manufatura, Lankford (2001) define *scheduling* como a parte central da infraestrutura de execução da produção. A proposta básica é determinar quando ordens de produção serão executadas. O processo consiste na determinação de tempos para a execução de atividades de produção, conciliando o *schedule* com o plano de produção e, finalmente, tomando decisões e ações para alcançar objetivos de produção desejados. Consequentemente, uma definição de *schedule* segundo Lankford (2001) é “a especificação de tempos para execução de eventos de produção”.

Reklaitis (1992) ressalta que, via de regra, os problemas de *scheduling* com restrição de recursos (*resource constrained scheduling problems*) demandam soluções não apenas factíveis, mas também muito boas (segundo a avaliação de uma função de desempenho), destacando que a abordagem mais efetiva para problemas de *scheduling* é a programação matemática, seguida por heurísticas. A escolha do método deve considerar a complexidade do cenário de implementação e o tempo computacional admissível para a obtenção de soluções. Para o autor, *scheduling* pode ser definido a partir de três elementos básicos:

1. a determinação dos recursos a serem utilizados (*assignment*);
2. o sequenciamento de atividades (*sequencing*);
3. a temporização (*timing*) do uso dos recursos pelas atividades.

2.3 REPRESENTAÇÃO TEMPORAL EM PROBLEMAS DE SCHEDULING

Para muitos problemas de otimização é necessária a obtenção de uma solução para um intervalo de tempo, representando dias, meses ou até mesmo anos. Assim, é necessário introduzir no modelo uma forma de representar o tempo. Moro *et al.* (1998) citam a representação do tempo como um dos maiores desafios na formulação de modelos PLIM. Adicionalmente, os

autores mencionam que a representação do tempo nos problemas de programação segue duas importantes formas: representação discreta ou contínua.

Mendez *et al.* (2006) vai ainda mais longe. Ele sugere que modelos de *scheduling* são baseados em diferentes conceitos, ou idéias básicas, que organizam os eventos da programação ao longo do tempo, com o objetivo principal de garantir que a capacidade máxima dos recursos compartilhados nunca seja excedida. O autor classificou esses conceitos em cinco diferentes tipos de representações, que têm sido amplamente utilizados para desenvolver uma variedade de formulações matemáticas de problemas de *scheduling* de bateladas.

Particularmente, a figura 5 mostra uma representação esquemática da mesma programação obtida pelo uso de conceitos alternativos. O exemplo envolve cinco bateladas (a, b, c, d, e) alocadas em duas unidades (J1, J2). Para representar essa solução, diferentes alternativas são apresentadas:

- (a) 10 intervalos de tempo fixos;
- (b) cinco intervalos de tempo globais variáveis;
- (c) três eventos temporais por unidade;
- (d) três *slots* de tempo por unidade;
- (e) três relações de precedência imediatas ou quatro relações de precedência gerais.

Apesar de algumas representações do tempo serem mais gerais do que outras, elas são geralmente orientadas para a solução de uma rede de processos arbitrária que requerem equações de fluxo de rede ou processos de batelada sequenciais assumindo uma abordagem orientada para a batelada.

Resumindo, podemos dizer que, na representação discreta, (figura 5(a)), o horizonte de planejamento é dividido uniformemente em uma quantidade de intervalos de tempo com duração fixa enquanto na representação contínua do tempo (figura 5(b-e)), o horizonte de planejamento considerado é dividido em uma quantidade de intervalos de tempo com duração variável.

Assim, a forma de representação do tempo influi diretamente no número de variáveis do modelo. A opção por intervalos fixos leva a um maior número de variáveis. Com a representação de tempo contínua, o número de variáveis pode ser significativamente reduzido, ainda que o problema se torne mais difícil de ser formulado e resolvido.

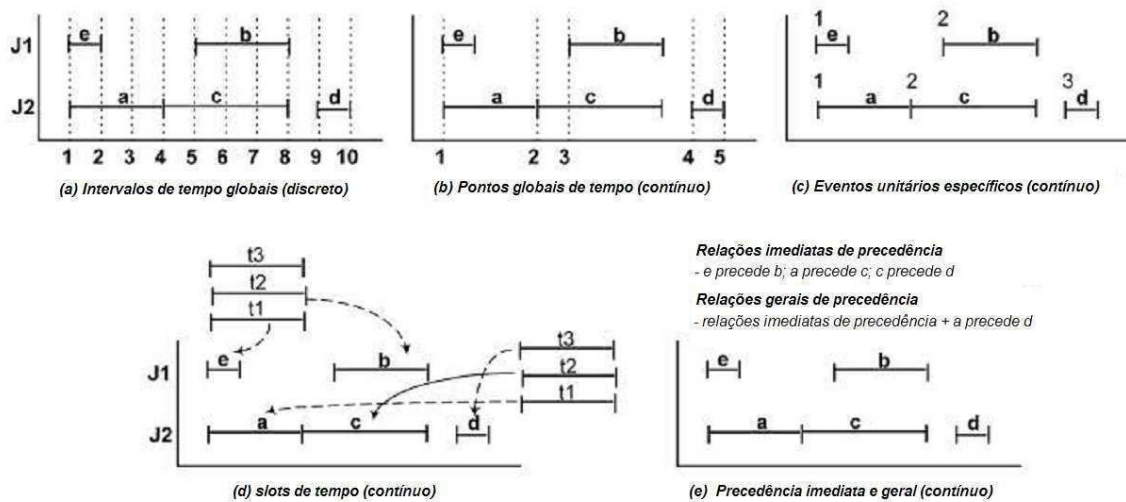


Figura 5 – Representação do Tempo
 Fonte: Mendez *et al.* (2006) - Adaptado

Relativamente à resolução de problemas na representação discreta, o número de variáveis binárias é maior, porém a diferença de integralidade¹, ou diferença de relaxação (*relaxation gap*) tende a ser menor que a de uma formulação contínua equivalente, levando frequentemente à obtenção de soluções mais rapidamente. Por outro lado, a representação contínua contém menos variáveis inteiras, mas a diferença de integralidade tende a aumentar, assim como o seu tempo de resolução. Maiores detalhes podem ser obtidos em Magatão (2001).

2.4 TRANSPORTE UTILIZANDO OLEODUTOS

Consideradas como os maiores gargalos na cadeia de abastecimento de uma indústria, as operações de transporte devem ser executadas de forma coordenada com as outras operações, já que o excesso ou falta de suprimentos, matéria prima ou produtos estocados prejudicam a eficiência de qualquer corporação. Enquanto atrasos implicam perda de tempo ou escassez de recursos, entregas adiantadas comprometem a alocação dos mesmos, podendo gerar excesso de estoques, o que significa capital imobilizado e, conseqüentemente, perda de outras oportunidades geradora de capital. Cresce então a necessidade de geração de cronogramas de transporte eficientes dentro do planejamento operacional de qualquer empresa (MÁS, 2001).

Grande parte do transporte de petróleo ou derivados é feita através do uso de oleodutos. Rejowski (2001) cita que os dutos estão sujeitos a diferentes fatores econômicos, quando comparados a outros meios de transporte, como o ferroviário e o rodoviário. Enquanto o investimento para a construção de dutovias é elevado comparado à outros meios de transporte, à longo prazo, esse investimento é viável, pois o transporte pode ser realizado a um baixo custo

¹Consiste na diferença entre a solução ótima linear e a solução ótima inteira de um modelo.

operacional. Além disso, outros custos não considerados em outros meios de transporte devem ser analisados, como por exemplo, custos de manutenção e de reprocessamento da mistura de produtos devido a interface que ocorre entre dois produtos distintos quando entram em contato no interior do duto. Para grandes centros consumidores, onde a demanda de petróleo e seus derivados é alta, as empresas petrolíferas desejam ampliar a utilização dos dutos como meio de transporte devido ao seu baixo custo operacional e nível de segurança.

Sasikumar *et al.* (1997) comentam que a utilização de dutos é um meio eficiente de transferência de derivados de petróleo para longas distâncias. O investimento inicial é alto, porém o custo de operação é baixo comparado a outras formas de transporte. O transporte utilizando dutos tem menor perda e é seguro.

O uso de dutos para a transferência de petróleo ou derivados é feito interligando duas (único duto) ou mais áreas (rede de dutos). As áreas podem ser portos, refinarias, terminais de distribuição ou clientes finais. Dada a eficiência do uso dos dutos como meio de transporte para petróleo ou derivados, há uma grande preocupação em melhorar a operação deste transporte de modo que sejam minimizadas as perdas pela interface de produtos distintos no interior do duto, os custos operacionais ou, ainda, o tempo de transferência. Com isso, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos usando técnicas de PM para melhorar o transporte por dutos, conforme será apresentado na seção seguinte.

2.5 OTIMIZAÇÃO APLICADA A TERMINAIS E DUTOS

A otimização de operações de transferência e estocagem de petróleo ou derivados tem por objetivo alcançar melhores condições de operação, segundo determinados critérios, sem alterar a malha disponível de válvulas, bombas e dutos, usando um melhor caminho para a transferência de produtos (MORO, 2000). A principal função destes modelos é fazer com que o dado sistema se torne o mais eficiente possível em termos econômicos e como consequência, um novo ponto operacional possa ser encontrado.

Modelos PLIM vem sendo amplamente utilizados para a otimização do *scheduling* de dutos. Os trabalhos que serão apresentados nesta seção refletem essa tendência, onde é possível representar grande parte das restrições operacionais do problema em um modelo matemático de otimização. Seguindo essa linha, a presente tese utiliza modelos de otimização na tentativa de melhorar as operações de dutos reais da indústria petrolífera.

Os modelos matemáticos genéricos não podem ser direta e eficientemente utilizados

em sistemas dutoviários em função da sua topologia complexa², além do grande número de restrições que estas redes apresentam. Por essa razão, problemas de cadeia de suprimento e gerenciamento do inventário vem sendo extensivamente estudados nos últimos anos. Em particular, problemas de *scheduling* na indústria petrolífera são endereçados por diversos autores. As formulações discutidas a seguir mostram os aspectos gerais relacionados ao tema, evidenciando particularidades dos modelos aplicados aos problemas da indústria petrolífera.

A dissertação de Camponogara (1995) trata do problema de transporte de derivados de petróleo por uma rede envolvendo dutos bidirecionais, baseado na rede de claros³ da PETROBRAS. Inicialmente, foi elaborado um modelo de Programação Matemática baseado no modelo de fluxo em rede com múltiplos períodos. 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. Esses componentes foram integrados em um algoritmo *A-Teams*, 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 evitar a inviabilidade da solução. As rotas são escolhidas dentre um conjunto pré-estabelecido com base na experiência da empresa. Entretanto, para os exemplos apresentados, nenhuma solução conseguiu atender à demanda dos mercados consumidores para um horizonte de tempo de 120 horas, houve desabastecimento a partir de 80 horas e de 100 horas.

Dentre os primeiros trabalhos referentes ao *scheduling* de dutos utilizando PLIM, encontram-se Shah (1996) e Lee *et al.* (1996). Shah (1996) aborda um problema de transferência de petróleo de um porto a uma refinaria. O problema foi decomposto em 2 subproblemas e modelado em PLIM com discretização uniforme dos intervalos temporais. O primeiro subproblema determina a operação e o abastecimento da refinaria através do duto, com o objetivo de minimizar a quantidade de material que permanecerá nos tanques. O outro subproblema determina a programação de descarregamento dos navios aos tanques e dos tanques ao duto, com o objetivo de encontrar uma solução viável, já que o tempo para a obtenção da solução ótima era inviável.

Em Lee *et al.* (1996), é apresentado um modelo PLIM para resolver o mesmo problema

²Por exemplo, veja figura 12 na página 79.

³Claros é o termo dado aos derivados leves de petróleo de alto valor agregado.

de Shah (1996). A principal diferença de seu trabalho é a eliminação de equações bilineares⁴ que aparecem geralmente em operações de mistura relacionadas com unidades de destilação de óleo cru. Ambos os trabalhos foram aplicados em problemas reais da indústria petrolífera, fornecendo uma base sólida para trabalhos subsequentes.

Em seu trabalho, Joly (1999) trata do problema de distribuição de derivados de petróleo, envolvendo um parque de estocagem, uma malha de polidutos e diversos clientes consumidores. Cada mercado consumidor é atendido por um único poliduto ao longo do horizonte de programação, sendo que diferentes produtos finais podem ser transportados em seu interior. O desenvolvimento do modelo PLIM em tempo discreto considera o processo de transição entre dois produtos em um mesmo duto (interface⁵ de produtos), minimizando os custos operacionais relacionados ao tratamento de misturas indesejadas.

O uso de um duto envolvendo uma origem e um destino é abordado em Pinto *et al.* (2000), onde são apresentadas várias aplicações reais de modelos de planejamento e *scheduling* entre refinarias. É feito o uso de PLIM em subestações do sistema, considerando o custo de interface dos produtos nos dutos. Na região de interface ocorre a mistura de produtos, gerando um produto degradado. Esse produto degradado pode ser incorporado a um produto de menor valor agregado ou dar origem a custos de reprocessamento. O custo de interface foi incorporado na função objetivo de um modelo, que tem a finalidade de penalizar o contato entre produtos que podem gerar custos elevados de reprocessamento.

Os problemas abordados em Pinto *et al.* (2000) são descritos a seguir:

- gerenciamento de estoque de petróleo para uma refinaria que recebe vários tipos de óleo através de um duto. Para um horizonte de tempo dado, são conhecidos previamente os horários de início e fim de bombeamento, o número e o tipo das bateladas;
- produção, armazenamento em tanques e/ou distribuição em uma refinaria com várias unidades de processamento capazes de produzir diversos produtos. A distribuição é feita até mercados consumidores, utilizando dutos;
- *scheduling* de produção, armazenamento e distribuição de óleo combustível, além de gerenciamento de operações como mistura, armazenamento e distribuição utilizando dutos e/ou caminhões.

O trabalho de Milidiú *et al.* (2001) descreve um método heurístico do tipo GRASP

⁴Diz-se da equação na qual o primeiro membro é linear em relação a duas variáveis ou a dois grupos de variáveis distintas.

⁵A interface é o termo utilizado para a região de contato entre dois produtos distintos dentro do duto.

para resolver o problema de transporte de derivados de petróleo em uma rede de dutos, apresentada por Camponogara (1995). O método utiliza as soluções obtidas pela heurística *A-Team* desenvolvida por Camponogara, como pontos de partida para buscas locais. Essas buscas locais obtêm soluções refinadas dentre as quais a de menor custo é retornada pelo método. Os autores resolveram a mesma instância apresentada por Camponogara (1995), com e sem o método GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) para realizar a busca local. Foi obtida uma solução viável apenas com o uso do método GRASP.

Magalhães e Shah (2003) desenvolveram um modelo PLIM de tempo contínuo para um oleoduto real da PETROBRAS que conecta um porto a uma refinaria. Restrições operacionais foram consideradas, onde o objetivo foi a minimização do desvio entre o planejamento e *scheduling*. Os autores encontraram algumas soluções ótimas que, podem ser consideradas não-ótimas do ponto de vista humano, já que decisões para problemas reais são, em alguns casos, muito difíceis de serem matematicamente modeladas (FAGUNDEZ *et al.*, 2008).

O sistema abordado por Rejowski e Pinto (2003) compreende uma refinaria e um duto multiproduto que interliga uma refinaria a cinco terminais buscando suprir a demanda local dos diferentes produtos. Para representar o problema, o duto é conceitualmente dividido em segmentos que conectam dois terminais consecutivos e porções que contêm um produto que compõem os segmentos. Dois modelos de otimização PLIM são gerados a partir de disjunções lineares que utilizam uma abordagem de tempo discreta. No primeiro modelo, assume-se que o duto é dividido em porções de tamanhos iguais, enquanto o segundo relaxa essa hipótese. O horizonte de tempo considerado compreende 3 dias e o modelo encontrou soluções viáveis (considerando uma percentagem do ótimo global) para os experimentos computacionais apresentados.

Em um trabalho posterior, Rejowski e Pinto (2004) usaram o mesmo problema e incluíram restrições de corte no modelo, buscando melhorar a eficiência computacional da formulação pelo uso de técnicas de pré-processamento que usa redução de variáveis e/ou relaxação/eliminação de restrições. Soluções ótimas foram encontradas para três diferentes cenários. Recentemente, Rejowski e Pinto (2008) propuseram um nova formulação PNLIM (Programação Não-Linear Inteira Mista) baseada na representação contínua do tempo para o mesmo problema de *scheduling* tratado nos trabalhos anteriores. Eles compararam as formulações das representações de tempo discreta e contínua em termos de qualidade de solução e performance computacional. A formulação contínua apresenta resultados melhores considerando o mesmo horizonte temporal. Adicionalmente, os autores incluíram no modelo a otimização do sistema hidráulico relacionado com a operação do duto.

Um modelo contínuo alternativo foi proposto por Cafaro e Cerdá (2004) para o problema de Rejowski e Pinto (2003). A abordagem utilizada possibilita a inserção de selos⁶. A função objetivo minimiza interfaces, custos de armazenagem e bombeamento com a possibilidade de aplicar penalidades caso o produto seja bombeado em períodos horossazonais⁷. Por razões comparativas, eles consideraram o mesmo horizonte temporal e encontraram soluções ótimas em poucos segundos. Cafaro e Cerdá (2008a) apresentam uma abordagem PLIM de tempo contínuo para o *scheduling* dinâmico do duto, onde uma abordagem de horizonte rolante é aplicada no mesmo problema. Soluções são encontradas considerando horizontes de tempo semanais com tempo computacional variando entre 16 e 330 segundos.

Magatão *et al.* (2004) também abordam um problema de transferência entre um porto e uma refinaria. Contudo, o duto transporta diferentes derivados de petróleo e pode operar em reversão (isto é, um mesmo duto transfere os produtos do porto para a refinaria, e da refinaria para o porto), além de possibilitar a utilização de selos e tratar questões de horossazonalidade. O problema aborda o *scheduling* do poliduto em um horizonte de tempo pré-fixado obtendo baixos custos operacionais. São encontradas soluções ótimas para a formulação PLIM proposta, a qual utiliza discretização uniforme do tempo.

Além disso, Magatão *et al.* (2010) em um trabalho posterior, desenvolve uma técnica híbrida utilizando PLIM conjuntamente com PLR (Programação Lógica por Restrições) para abordar o mesmo problema apresentado em Magatão *et al.* (2004). Essa abordagem permitiu que o tempo computacional fosse reduzido para obtenção da solução final.

A dissertação apresentada por Más (2001) utiliza representação contínua do tempo em um problema de suprimento de petróleo em complexos portuários interligados a refinarias por meio de uma rede de oleodutos. O problema foi resolvido utilizando PLIM e considera tarefas de decantação⁸ e alocação de petróleo através de características qualitativas. Foi feita uma decomposição do problema em dois tipos de subproblemas: um envolvendo portos e o outro envolvendo subestações. Neste trabalho, são apresentadas soluções viáveis para o problema.

Em Boschetto (2006) e Boschetto *et al.* (2006), foi feito um estudo a partir da dissertação de Más (2001) e verificou-se que é possível encontrar soluções ótimas para os subproblemas em tempos reduzidos através de métodos de pré-processamento baseado na Teoria das Restrições (TOC - *Theory of Constraints*) juntamente com algumas metas para pré-processamento

⁶Selo é o termo usado à inserção de uma pequena quantidade de um terceiro produto transferido entre dois outros que não podem ter contato.

⁷Horossazonalidade corresponde ao período de tempo onde deve-se evitar o bombeamento de produtos devido ao alto custo de utilização de energia elétrica. Geralmente, esse período está no intervalo das 18h às 21h.

⁸A decantação do óleo é o processo de separação do óleo cru da salmoura que ocorre quando o tanque permanece inoperável em um determinado intervalo de tempo.

(MÉSZÁROS; SUHL, 2003). Neste trabalho, estudou-se a aplicação de um modelo PLIM proposto por Más (2001) para a programação das operações em um terminal petrolífero. Inicialmente, identificou-se o gargalo do problema, retirando as restrições correspondentes do modelo PLIM. A solução assim obtida foi utilizada como entrada para o modelo original (com todas as restrições). O tempo computacional para a solução ótima do modelo pré-processado é consideravelmente menor que o tempo da solução ótima do modelo apresentado por Más (2001).

Veiga (2006) propõe uma hiererquização do modelo de otimização proposto por Más (2001). É feita a divisão do modelo com base nos três elementos básicos de *scheduling*. Dessa maneira, o Modelo do Porto proposto por Más (2001) é dividido nos modelos que envolve *assignment* (determinação dos recursos), *sequencing* (sequenciamento das atividades) e *timing* (temporização do uso dos recursos). A abordagem proposta por Veiga (2006) obtém resultados em tempos computacionais melhores que os resultados da abordagem feita por Más (2001), levando em consideração as mesmas margens de otimalidade do modelo original.

O modelo de otimização proposto por Neiro e Pinto (2004), compreende uma rede de suprimentos de petróleo que inclui refinarias, terminais e centros de distribuição, interligados por uma rede de dutos unidirecionais. Todo esse complexo foi modelado a partir de três estruturas básicas que representam unidades de processamento, tanques e dutos. O problema foi modelado utilizando PNLIM de grande escala.

Relvas *et al.* (2006) tratam um problema de transporte de derivados de petróleo, composto por uma refinaria e um centro de distribuição interligados através de um poliduto. O modelo apresenta uma abordagem PLIM, combinada com uma representação contínua do tempo e dos volumes envolvidos. Além das operações de transporte do poliduto, dinâmicas internas das áreas de distribuição foram consideradas em função dos inventários e das demandas do mercado consumidor. O modelo foi resolvido através de uma estratégia de decomposição temporal, dividindo-se o horizonte de programação em duas partes. As condições finais do primeiro período servem de condições iniciais para o segundo período, reduzindo o tempo total de resolução. Em um trabalho posterior, Relvas *et al.* (2007) desenvolveu uma abordagem de *rescheduling*, considerando a variabilidade da operação real. As instâncias foram resolvidas considerando um horizonte de um mês, incluindo o planejamento inicial e revisões, considerando mais de uma perturbação. Relvas *et al.* (2009) sugeriu, ainda, uma sequência de envio criada de forma heurística como entrada do modelo PLIM anteriormente proposto. Soluções viáveis foram encontradas considerando o horizonte de tempo mensal.

Uma abordagem semelhante à apresentada no presente trabalho pode ser encontrada em Felizari (2009), Neves-Jr *et al.* (2007a) e Neves-Jr *et al.* (2007b), onde são abordados o

problema de transferência e estocagem de derivados de petróleo em uma rede de dutos interligando várias áreas. A rede apresentada contém 15 trechos de dutos interligando 9 áreas, sendo 3 refinarias, 4 terminais de distribuição, 1 terminal portuário e 1 cliente final. A abordagem de solução consiste na divisão do problema nos três elementos do *scheduling*. Os resultados ótimos para o módulo de temporização são obtidos em baixo tempo computacional, considerando o *scheduling* de cenários para horizontes de 7 e 30 dias.

MirHassani e Ghorbanalizadeha (2008) propõem uma método de programação inteira para o transporte e *scheduling* de derivados de petróleo. O sistema compreende uma refinaria e um poliduto que conecta três terminais. O objetivo é satisfazer a demanda respeitando restrições operacionais e minimizando as interfaces entre os produtos. O poliduto foi dividido em porções de tamanhos iguais e a abordagem de tempo considerada é discreta. Para um horizonte de 72 horas, soluções viáveis foram encontradas em algumas horas de processamento, ou em alguns minutos, quando considerado horizonte de tempo rolante.

Um único duto interligando duas refinarias a múltiplos órgãos de destino é abordado por Cafaro e Cerdá (2009). Uma formulação contínua é proposta para a realização do *scheduling* do duto de modo segregado ou inteiro. Um caso de estudo foi resolvido considerando um horizonte temporal de 10 dias. Soluções ótimas foram encontradas para ambas as considerações do duto (segregada ou inteira).

Lopes *et al.* (2010) propõem algoritmos para resolver um problema de planejamento e *scheduling* da mesma rede de dutos utilizada na presente tese. A abordagem utilizada consiste na satisfação de restrições, que é realizada em duas fases: a fase de planejamento, a qual é implementada utilizando uma heurística construtiva. Essa heurística gera a ordem de recebimento, considerando transferências entre dois terminais. Na fase de *scheduling*, um modelo baseado em Programação por Restrições (PR) é utilizado para estabelecer o monitoramento das ordens de recebimento, em cada duto e em cada tanque. Foram utilizados horizontes de 7 a 10 dias, onde a solução viável é encontrada em aproximadamente 7 minutos.

Herrán *et al.* (2010) propõem uma nova abordagem discreta para resolver o problema de planejamento que pode ser aplicada em dois sistemas: (i) o mesmo sistema abordado por Cafaro e Cerdá (2004) e Rejowski e Pinto (2003); e (ii) sistema com múltiplos dutos (rede de dutos). Nesta abordagem, o horizonte é dividido em intervalos de mesma duração e os dutos são divididos em porções de iguais volumes. A solução ótima foi alcançada para um cenário com mais de 5000 variáveis e 13000 restrições em um tempo superior a 20.000 segundos.

Em grande parte dos problemas de transferência e estocagem apresentados, a solução obtida é apenas viável. Quando são apresentadas soluções ótimas, duas características podem

ser observadas: (i) o horizonte temporal resolvido em geral é menor que 10 dias; ou (ii) é necessário um elevado tempo para a obtenção da solução, da ordem de horas. Sendo assim, para tentar diminuir o tempo computacional é frequentemente adotada uma divisão do problema em vários subproblemas. A tabela 1 apresenta de forma resumida os trabalhos aqui referenciados em relação à distribuição dutoviária. Apesar de não ser possível descrever todos os detalhes de cada trabalho na tabela, ela apresenta uma visão geral da dimensão de cada problema, método utilizado para a obtenção de solução e se as soluções encontradas são viáveis ou ótimas.

Tabela 1 – Resumo de trabalhos relacionados ao *scheduling* de dutos

Autor	Dutos	Origens	Destinos	Método	Solução
Camponogara (1995)	rede	vários	vários	heurística	-
Shah (1996)	único	única	único	PLIM ¹	viável
Lee <i>et al.</i> (1996)	único	única	único	PLIM ¹	viável
Joly (1999)	único	única	vários	PLIM ¹	viável
Pinto <i>et al.</i> (2000)	único	única	único	PLIM	viável
Milidiú <i>et al.</i> (2001)	rede	vários	vários	heurística	viável
Más (2001)	rede	vários	único	PLIM ²	viável*
Magalhães e Shah (2003)	único	única	único	PLIM ²	ótima
Rejowski e Pinto (2003)	único	única	vários	PLIM ¹	viável
Cafaro e Cerdá (2004)	único	única	vários	PLIM ²	ótima
Neiro e Pinto (2004)	rede	vários	vários	PNLIM ²	viável*
Magatão <i>et al.</i> (2004)	único	única	único	PLIM ¹	ótima*
Rejowski e Pinto (2008)	único	única	vários	PLIM ¹	ótima*
Cafaro e Cerdá (2008a)	único	única	vários	PLIM ²	ótima*
Boschetto (2006)	rede	vários	único	PLIM ²	ótima*
Veiga (2006)	rede	vários	único	PLIM ²	viável*
Relvas <i>et al.</i> (2006)	único	única	único	PLIM ²	viável*
MirHassani e Ghorbanalizadeha (2008)	único	única	vários	PLIM ¹	viável
Relvas <i>et al.</i> (2009)	único	única	único	PLIM ²	viável
Cafaro e Cerdá (2009)	único	várias	vários	PLIM ²	ótima
Felizari (2009)	rede	vários	vários	PLIM ²	ótima*
Lopes <i>et al.</i> (2010)	rede	vários	vários	PR ¹	viável*
Magatão <i>et al.</i> (2010)	único	única	único	PLIM/PLR ¹	ótima*
Herrán <i>et al.</i> (2010)	rede	vários	vários	PLIM ¹	ótima

abordagem de tempo: (1) discreta, (2) contínua

* - utilizam métodos de decomposição do problema ou decomposição temporal

2.6 CONCLUSÃO

Esse capítulo foi destinado à revisão bibliográfica dos métodos utilizados para a resolução de problemas de gerenciamento da cadeia de suprimento de petróleo, objeto de estudo da presente tese. Dentre os métodos utilizados para a resolução desses problemas, a revisão foi focada na programação matemática, mais especificamente na PLIM, pois os modelos a serem apresentados nesse trabalho são todos baseados nesse método.

A definição de cadeia de abastecimento foi realizada de forma resumida, bem como as opções de representação temporal para o tratamento desses problemas. Em seguida, foi apresentada a importância da utilização dos oleodutos na indústria petrolífera, conforme discutido em alguns trabalhos apresentados que destacam esse meio de transporte como um dos mais eficientes e econômicos.

Finalmente, uma revisão dos problemas relacionados ao *scheduling* de dutos foi elaborada, destacando suas estratégias para obtenção das soluções e principais resultados. Grande parte dos trabalhos utilizam PLIM, sendo que demais métodos são aplicados de forma híbrida (como no caso de Magatão *et al.* (2010)).

Dentre os trabalhos apresentados, problemas semelhantes ao aqui abordado podem ser encontrados em Felizari *et al.* (2007), Neves-Jr *et al.* (2007a) e Neves-Jr *et al.* (2007b), onde as soluções ótimas podem ser obtidas em baixo tempo computacional para horizontes da ordem de dias ou meses. Além disso, todos os trabalhos que usam abordagem PLIM, apresentam ao menos uma solução factível para os problemas apresentados, podendo ser até ótima, como, por exemplo, no caso de Magalhães e Shah (2003), Cafaro e Cerdá (2009) e Herrán *et al.* (2010).

Em geral, os modelos presentes na literatura não são capazes de encontrar soluções ótimas para problemas envolvendo *scheduling* de dutos, por causa da complexidade computacional desse tipo de problema. Atamturk e Savelsbergh (2005) mencionam que na maioria das situações práticas, os problemas são resolvidos com boas soluções viáveis (preferencialmente provando que está dentro de uma pequena margem da otimalidade).

Pode-se ainda notar que um fato importante para a obtenção de soluções em baixo tempo computacional é obtida através do uso de estratégias de decomposição do problema e uso de heurísticas. A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo foi genérica sendo a mesma continuada nos capítulos seguintes da tese onde será detalhada e orientada aos problemas em estudo em cada capítulo.

3 TRANSFERÊNCIA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO - ÚNICO DUTO

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta um sistema que compreende um poliduto que transporta derivados de petróleo de uma refinaria para um centro de distribuição. Um modelo PLIM com abordagem de tempo contínuo foi utilizado por Relvas *et al.* (2006, 2009), para tratar o problema de *scheduling* do duto, realizando o transporte de derivados de petróleo com objetivo de suprir a demanda do centro de distribuição. Três cenários foram analisados pelos autores, considerando sequências fixa, mista e livre para o transporte de produtos. Para as abordagens fixa e mista, soluções viáveis foram encontradas para um horizonte de um mês. Para a abordagem com sequência livre, soluções viáveis foram encontradas considerando decomposição temporal (horizontes de 15 + 15 dias). Neste caso, foram encontradas dificuldades (tempo computacional elevado) para resolver esses problemas.

Na tentativa de resolver essas dificuldades, um procedimento heurístico foi proposto por Relvas *et al.* (2009), onde sequências de produtos a serem bombeados são definidas. O procedimento heurístico foi utilizado em uma etapa anterior ao modelo implementado por Relvas *et al.* (2006), fornecendo um conjunto de informações com as sequências sugeridas de bombeio para o duto, considerando dados de condições iniciais e demandas.

Além disso, Relvas *et al.* (2007) desenvolveu uma metodologia de *rescheduling*, para considerar a variabilidade das condições reais, definindo revisões no *scheduling* sugerido de forma efetiva. Problemas com horizontes de um mês, incluindo condições iniciais da planta e suas revisões, contendo mais de uma perturbação, foram resolvidas.

Por fim, Cafaro e Cerdá (2008b) revisaram a formulação proposta por Relvas *et al.* (2006) e propuseram melhorias específicas onde soluções viáveis podem ser encontradas (utilizando *gap* relativo de 2% como critério de parada). A abordagem considera horizonte de programação semanal (horizonte rolante de 1 mês).

Analisando os trabalhos aqui apresentados, é fácil perceber que, para resolver um pro-

blema de *scheduling* de média escala para um poliduto (por exemplo, considerando horizontes mensais), é necessário o uso de métodos de decomposição temporal ou mesmo o desenvolvimento de decomposição modular. Torna-se possível assim encontrar soluções em tempo computacional viável. Métodos de decomposição são propostos na presente tese e, em particular, este capítulo propõe um método de decomposição para a obtenção do *scheduling* do poliduto abordado em Relvas *et al.* (2006), além do fornecimento do gerenciamento de inventário no centro de distribuição.

O problema inclui uma demanda diária detalhada, gerenciamento de inventário, capacidades de estoque, bem como restrições operacionais. Por exemplo, as restrições operacionais incluem a existência de tarefas como controle de qualidade. Neste caso, a disponibilidade dos produtos para os clientes é realizada somente após um período de certificação dos produtos.

Neste capítulo, dois modelos PLIM determinarão o *scheduling* do duto. A decomposição é baseada em etapas sequenciais. Em uma primeira etapa, o problema é endereçado em um nível de detalhamento macro, enquanto o segundo modelo PLIM explora o problema em um nível mais detalhado. Dessa maneira, o primeiro modelo define a sequência de envio dos produtos, além do tamanho dos lotes a serem transportados. O segundo modelo determina os tempos de início e final de bombeamento e recebimentos dos lotes considerando todas restrições operacionais. Ambos os modelos são formulados em PLIM. Os modelos desenvolvidos são aplicados em casos reais de estudo de uma companhia de distribuição portuguesa.

Esse capítulo está organizado como segue: Após esta introdução (seção 3.1), a seção 3.2 apresenta o problema genérico sob estudo, fornecendo dados, especificações do problema e resultados desejados. A seção 3.3 descreve a arquitetura da ferramenta de decisão, onde os trabalhos anteriores são revisados e um método de decomposição é brevemente caracterizado. Dois modelos PLIM são propostos nas seções 3.5 e 3.6, para a realização da primeira etapa de divisão do problema. A seção 3.7 apresenta os resultados e compara os 2 modelos considerando três diferentes estudos de caso. Conclusões e trabalhos futuros são apresentados na seção 3.8.

3.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O sistema abordado neste capítulo considera um poliduto unidirecional usado para o bombeio de vários tipos de derivados de petróleo entre uma refinaria e um centro de distribuição. O centro de distribuição consiste num parque de tancagem, onde cada tanque pode armazenar apenas um tipo de produto. O mercado local é suprido pelo centro de distribuição através de caminhões. Os componentes do sistema podem ser visualizados na figura 6.

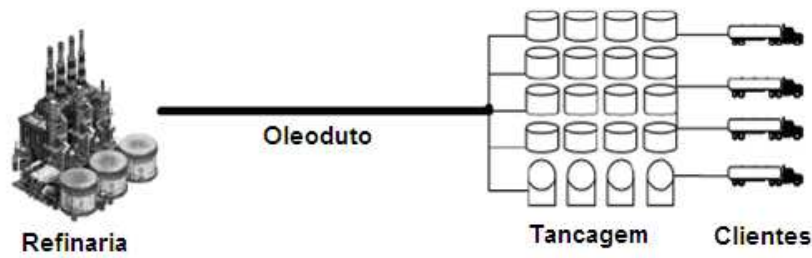


Figura 6 – Esquema de transferência
 Fonte: Relvas *et al.* (2006)

Em essência, os dados a serem considerados no problema são a seguir elencados:

1. Os produtos a serem transportados;
2. A matriz de sequências possíveis/proibidas entre pares de produtos a serem transportados seguidamente no duto;
3. Capacidade máxima de armazenagem para cada produto;
4. Volume do poliduto;
5. Limites de vazão de bombeio;
6. O tempo de certificação mínimo para cada produto;
7. O horizonte de tempo pretendido;
8. O número máximo de bateladas passíveis de serem bombeadas durante o horizonte temporal¹;
9. Inventário inicial de cada produto;
10. Demanda diária de cada produto;
11. As paradas planejadas do poliduto.

A partir dos dados apresentados, deseja-se obter:

- O *scheduling* do poliduto, com a sequência de produtos, volume das bateladas, vazão de bombeio e tempos de bombeamentos e recebimentos;

¹O cálculo de nb^{max} é apresentado no Apêndice A, página 217

- O gerenciamento de inventário no centro de distribuição, incluindo balanço diário de volume por produto e monitoramento de chegadas, tempo de certificação bem como a satisfação da demanda.

Para o poliduto em estudo, a sequência de envio entre produtos subsequentes é restrita e os produtos são geralmente enviados em ciclos². Por exemplo, na figura 7, deve-se satisfazer as seguintes restrições de envio:

1. o produto P2 pode somente ser transportado entre bateladas do produto P1;
2. o produto P6 pode somente ser transportado entre bateladas do produto P5;
3. entre os produtos P1 e P5 há necessidade de enviar P3 ou P4.

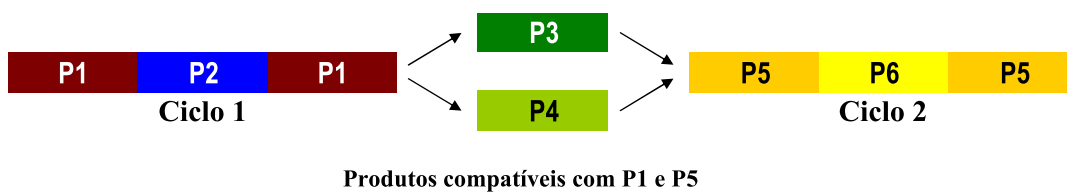


Figura 7 – Possibilidades de envio

3.3 METODOLOGIA DE DECOMPOSIÇÃO - ÚNICO DUTO

Como mencionado anteriormente, o maior desafio no desenvolvimento do modelo de larga escala PLIM desenvolvido por Relvas *et al.* (2006) é obter soluções rápidas (em poucos minutos), já que o problema de sequenciamento de produtos influencia fortemente o desempenho computacional do modelo. Relvas *et al.* (2006) comenta que um modelo PLIM contendo todas as restrições para resolver o problema proposto de média escala não é capaz de retornar soluções ótimas em tempo computacional razoável³ para aplicações reais. Ao deixar livre para o procedimento de solução do modelo decidir e otimizar a sequência dos produtos a serem bombeados (casos da sequência livre) em um horizonte de um mês, nenhuma solução é encontrada em duas horas de processamento. Cafaro e Cerdá (2008b) propõem uma decomposição temporal para resolver o mesmo problema com sequência livre. O modelo foi executado quatro vezes, considerando horizontes de tempo semanais. O horizonte de tempo total é de um mês.

²Para um melhor entendimento de ciclo de produtos, veja Relvas *et al.* (2006).

³Poucas horas de processamento

Neste trabalho, um método de decomposição modular é proposto com o intuito de obter a solução de um problema de média escala. A decomposição é baseada em duas etapas sequenciais onde, a cada nível, um modelo PLIM é resolvido. Em um primeiro momento, o problema é endereçado em um nível de detalhamento macro, onde o objetivo é obter uma sequência de produtos a serem bombeados, orientado ao cenário. Os resultados desse nível são utilizados como dados iniciais do segundo modelo PLIM que explora o problema de maneira mais detalhada. Ambos os modelos são baseados em PLIM e nenhum método heurístico é considerado. A arquitetura computacional simplificada é apresentada pela figura 8.

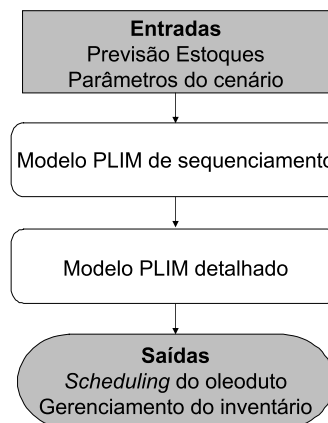


Figura 8 – Esquema de decomposição

A decomposição foi necessária porque um único modelo não é capaz de resolver o problema completo após algumas horas de processamento (RELVAS *et al.*, 2006), enquanto a utilização de heurísticas viabiliza a obtenção de soluções (RELVAS *et al.*, 2009). Contudo, as soluções heurísticas podem não ter a qualidade esperada do ponto de vista de otimização. A utilização de modelos PLIM de maneira hierárquica, visa a busca por soluções num tempo viável (alguns minutos) que, apesar de não ser ótima do ponto de vista computacional, sugere soluções viáveis com boa qualidade.

3.3.1 Modelo PLIM de sequenciamento

Uma das maiores conclusões da revisão da literatura é que a sequência de produtos a ser bombeada para o poliduto tem um grande impacto na tomada de decisão para formulações PLIM, também tendo um grande impacto no tempo computacional para resolver esse problema combinatorial. Se as variáveis de sequenciamento são definidas previamente, o problema combinatorial pode, via de regra, ser resolvido considerando a redução no número de variáveis a serem determinadas. Essa é a proposta do método de decomposição aqui sugerido, que também consiste em modelos exatos para obter a solução do problema.

Dois diferentes modelos de sequenciamento PLIM são propostos. O modelo com lotes (ou tamanho de bateladas) fixo FBS⁴ e o modelo com lotes (ou tamanho de bateladas) variável VBS⁵. Como entrada desses modelos, devemos ter:

- volume do poliduto;
- possíveis tamanhos de bateladas ou limites no tamanho das bateladas;
- horizonte de tempo;
- inventário inicial;
- limites de capacidade de estocagem;
- demandas;
- limites de vazão;
- sequências viáveis entre produtos subsequentes dentro do duto; e
- período de certificação.

Na formulação apresentada, não é considerado período de certificação para os produtos já armazenados nos tanques do centro de distribuição no início do horizonte de *scheduling*. O modelo de sequenciamento PLIM define o tamanho da batelada de cada produto e a sequência a ser bombeada. Esses resultados são então utilizados no modelo PLIM detalhado para a obtenção do *scheduling* completo do poliduto.

3.3.2 Modelo PLIM detalhado

O modelo PLIM detalhado utilizado é o mesmo proposto por Relvas *et al.* (2006) e revisado em Relvas *et al.* (2009). O modelo PLIM de sequenciamento determina a sequência e o volume de cada batelada. Os resultados são utilizados como dados de entrada para o modelo PLIM detalhado. Os resultados obtidos incluem a programação otimizada do duto e a política de gerenciamento do inventário no parque de tancagem. Para mais detalhes do modelo PLIM detalhado veja Relvas *et al.* (2006, 2009).

⁴*Fixed Batch Size*

⁵*Variable Batch Size*

3.4 NOTAÇÃO

A notação adotada para a formulação do modelo matemático é indispensável para entendimento do modelo. As notações e símbolos utilizados nesse capítulo podem ser encontrados no Apêndice A (página 217). Conjuntos esparsos (ILOG, 2007, 2009) são utilizados para a geração das restrições matemáticas, permitindo a manipulação de apenas índices válidos. A seção A.3 (página 219) detalha o tema para o presente modelo. Os volumes são representados por unidades de volume genéricas (uv).

As bateladas que são identificadas como bateladas fictícias, isto é, as quais assumem o valor zero, indicam que nenhum produto p , contendo o lote lt , é bombeado no dia h , ou seja; nenhuma combinação da tupla (p, lt, h) é alocada à batelada b . Essas bateladas são geradas por não ser possível identificar *a priori* o número exato de bateladas necessárias a serem enviadas durante o horizonte de planejamento. O cálculo do número de bateladas é apresentado no Apêndice A, página 217, quando é apresentada a criação dos conjuntos.

3.5 MODELO COM LOTES FIXOS (FBS)

Nessa primeira formulação, utilizou-se representação discreta, tanto em termos de volume quanto temporal. Os volumes dos produtos a serem enviados são escolhidos considerando dois ou três volumes distintos de lotes. Esses volumes seguem condições operacionais típicas do problema em estudo. Por exemplo, os volumes a serem utilizados podem ser escolhidos para cada sistema específico em estudo, considerando, os volumes típicos bombeados, ou a capacidade máxima de armazenamento.

O nível de inventário é considerado durante todo o horizonte de tempo, com a finalidade de obter a melhor sequência a ser bombeada, respeitando a capacidade de estocagem. Dessa maneira, se uma batelada de um dado produto é recebida durante o dia h , o inventário desse produto é atualizado no final desse mesmo dia.

3.5.1 Função objetivo

Como a função objetivo (expressão 2) contém termos de naturezas distintas, é necessário apresentá-la de forma adimensional. Dessa forma, a diferença de volume dif_p é normalizada pelo volume total $Dem_{p,h}$, enquanto o tempo de recebimento da última batelada T_{nb}^{rec} é normalizado pelo horizonte h^{max} . A função objetivo envolve os seguintes fatores:

Fator 1 Minimização da diferença (quantidade em excesso) de produto enviada satisfazendo

a demanda. Quanto mais próxima seja a quantidade enviada da quantidade da demanda requerida, melhor será a solução;

Fator 2 Maximização do tempo do horizonte de programação a ser utilizado para o bombeio dos produtos. Logo, o tempo de recebimento da última batelada é próximo, ou igual ao último dia do horizonte.

$$\text{minimizar } \underbrace{\sum_{p \in P} \frac{\left(dif_p + \sum_{h \in H} Dem_{p,h} \right)}{\sum_{h \in H} Dem_{p,h}}}_{\text{Fator 1}} - \underbrace{\frac{T_{nb}^{rec}}{h^{max}}}_{\text{Fator 2}} \quad (2)$$

Otimizando esses dois fatores, a minimização da vazão média de envio dos produtos é feita de modo indireto, pois como esse modelo não considera paradas de bombeio, a quantidade enviada é minimizada e o recebimento da última batelada é maximizado em função do horizonte máximo. Dessa forma, a vazão média tende a permanecer em níveis baixos (menor volume enviado / horizonte maior = vazão baixa). Isso garante a reposição de produtos, atendimento à demanda e utilização máxima do duto.

3.5.2 Restrições do modelo FBS

A restrição 3 diz que o volume do produto p bombeado para o poliduto deve ser maior ou igual à sua demanda. A variável dif_p assume valores não negativos e corresponde à quantidade de volume adicional à demanda. A variável inteira $nbats_{p,lt}$ contém o número de lotes lt do produto p bombeados.

$$\sum_{h \in H} Dem_{p,h} + dif_p = \sum_{lt \in LT} (nbats_{p,lt} \cdot lots_{p,lt}) \quad \forall p \in P \quad (3)$$

Para cada batelada, pode ser alocado somente um lote lt do produto p a ser recebido no dia h . Se a batelada não for utilizada (batelada fictícia), nenhum volume é alocado (restrição 4).

$$\sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} lss_{b,p,lt,h} \leq 1 \quad \forall b \in B \quad (4)$$

A equação 5 diz que a soma das variáveis binárias $lss_{b,p,lt,h}$ deve ser igual a $nbats_{p,lt}$ para todos os produtos e tamanhos de lotes.

$$\sum_{b \in B} \sum_{h \in H} lss_{b,p,lt,h} = nbats_{p,lt} \quad \forall p \in P, lt \in LT \quad (5)$$

O inventário disponível para os clientes no final do primeiro dia deve ser igual ao inventário inicial, menos a demanda (equação 6). Para os demais dias, equação 7, o inventário disponível para os clientes no final do dia h deve ser igual ao inventário do dia anterior ($h - 1$) menos a demanda do dia h , mais o volume recebido no dia h' . O volume recebido no dia h' considera o período de certificação em que a batelada deve permanecer no centro de distribuição para estar disponível no dia h .

$$ID_{p,h}^{clientes} = ID_p^0 - Dem_{p,h} \quad \forall p \in P, h = 1 \quad (6)$$

$$ID_{p,h}^{clientes} = ID_{p,h-1}^{clientes} - Dem_{p,h} + \sum_{b \in B} \sum_{lt \in LT} (lots_{p,lt} \cdot lss_{b,p,lt,h'}) \quad (7)$$

$$\forall p \in P, \{h, h'\} \in H, stl_p < h, h' = h - stl_p$$

O inventário real no final do primeiro dia é igual ao inventário disponível para os clientes (equação 8). Para o restante dos dias, a equação 9 determina o inventário real que deve ser igual ao inventário do dia anterior menos a demanda requerida, mais o volume recebido no mesmo dia h . Finalmente, o inventário real deve respeitar as capacidades mínima e máxima de armazenagem, dada pela restrição 10.

$$ID_{p,h}^{total} = ID_{p,h}^{clientes} \quad \forall p \in P, h = 1 \quad (8)$$

$$ID_{p,h}^{total} = ID_{p,h-1}^{total} - Dem_{p,h} + \sum_{b \in B} \sum_{lt \in LT} (lots_{p,lt} \cdot lss_{b,p,lt,h}) \quad (9)$$

$$\forall p \in P, h \in H, h > 1$$

$$ID_p^{min} \leq ID_{p,h}^{total} \leq ID_p^{max} \quad \forall p \in P, h \in H \quad (10)$$

O número de bateladas recebidas durante um dia deve ser menor ou igual a ρ (restrição 11). Essa restrição é adicionada para auxiliar o modelo no processo de busca da solução e não influencia a qualidade da solução final encontrada⁶.

$$\sum_{b \in B} \sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} lss_{b,p,lt,h} \leq \rho \quad \forall h \in H \quad (11)$$

A sequência de envio deve ser construída de acordo com a compatibilidade dos produtos, como mostra a equação 12.

$$\begin{aligned} \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} lss_{b-1,p,lt,h} + \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} lss_{b,p',lt,h} &\leq 1 \\ \forall b \in B, \{p, p'\} \in P, b > 1, seq_{p,p'} &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Se nenhum produto é alocado à batelada, ela não será bombeada e será chamada de batelada fictícia. As bateladas fictícias são forçadas a permanecer no final da lista de bateladas (inequação 13).

$$\sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} lss_{b,p,lt,h} \leq \sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} lss_{b-1,p,lt,h} \quad \forall b \in B, b > 1 \quad (13)$$

Para o recebimento da primeira batelada, ela deve deslocar uma quantidade equivalente ao volume do duto (*pipe*), mais o volume da batelada. A faixa temporal é dada pela divisão de seu volume pelos limites mínimo e máximo de vazão. Considera-se que volume do produto inicialmente no duto foi bombeado com propósito de satisfazer a um *scheduling* prévio (restrições 14 e 15).

$$T_b^{rec} \leq \left(\frac{1}{vb^{min}} \right) \cdot \left(pipe + \sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} (lots_{p,lt} \cdot lss_{b,p,lt,h}) \right) \quad \forall b = 1 \quad (14)$$

$$T_b^{rec} \geq \left(\frac{1}{vb^{max}} \right) \cdot \left(pipe + \sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} (lots_{p,lt} \cdot lss_{b,p,lt,h}) \right) \quad \forall b = 1 \quad (15)$$

O tempo de recebimento das demais bateladas considera o tempo da batelada anterior,

⁶A obtenção de ρ é apresentado na seção A.3 (página 219).

mais o tempo (volume dividido pela vazão) para o deslocamento da própria batelada (inequações 16 e 17).

$$T_b^{rec} \leq T_{b-1}^{rec} + \left(\frac{1}{vb^{min}} \right) \cdot \sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} (lots_{p,lt} \cdot lss_{b,p,lt,h}) \quad \forall b \in B, b > 1 \quad (16)$$

$$T_b^{rec} \geq T_{b-1}^{rec} + \left(\frac{1}{vb^{max}} \right) \cdot \sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} (lots_{p,lt} \cdot lss_{b,p,lt,h}) \quad \forall b \in B, b > 1 \quad (17)$$

As restrições 18 e 19 indicam o instante em que a variável $lss_{b,p,lt,h}$ deve assumir o valor 1, se a batelada b for recebida entre os dias $h - 1$ e h . Caso contrário, quando $lss_{b,p,lt,h} = 0$, T_b^{rec} assumirá um valor entre $-h^{max} - 1$ e $h^{max} + 1$, que indica que essas restrições não são ativadas. O parâmetro eps assume um valor pequeno ($eps = 0,01$) usado para restringir a equação 18 a ser estritamente maior que ($>$). Assim, casos de igualdade são considerados apenas na restrição 19.

$$T_b^{rec} \geq \sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} (h - 1) \cdot lss_{b,p,lt,h} - (h^{max} + 1) \cdot \left(1 - \sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} lss_{b,p,lt,h} \right) + eps \quad \forall b \in B \quad (18)$$

$$T_b^{rec} \leq \sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} h \cdot lss_{b,p,lt,h} + (h^{max} + 1) \cdot \left(1 - \sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} lss_{b,p,lt,h} \right) \quad \forall b \in B \quad (19)$$

Duas restrições podem ser adicionadas para forçar que a última batelada a ser bombeada seja maior que o volume do duto. Essas restrições consideram o fato de possíveis critérios de terminação, quando o poliduto para no fim do horizonte de *scheduling*. Assim, o volume do duto deve ser completamente preenchido com apenas um produto, evitando contaminação por interfaces. Outros critérios de terminação podem ser adicionados ao modelo, dado pelas restrições específicas do cenário. Assim, a restrição 20 força que a última batelada (nb) seja maior ou igual ao volume do duto, se esta não for uma batelada fictícia.

$$\sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} (lots_{p,lt} \cdot lss_{b,p,lt,h}) \geq pipe \cdot \sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} lss_{b,p,lt,h} \quad (20)$$

$$\forall b \in B, b = nb$$

Se a solução apresentar bateladas fictícias, a restrição 20 não é ativada e é necessário analisar duas bateladas consecutivas $b - 1$ e b . Se $b - 1$ é a última batelada não fictícia, para as bateladas $b - 1$ e b teremos que $lss_{b-1,p,lt,h} = 1$ e $lss_{b,p,lt,h} = 0$. A restrição 21 garante que o volume da batelada $b - 1$ seja maior que o volume do duto.

$$\sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} (lots_{p,lt} \cdot lss_{b-1,p,lt,h}) \geq pipe \cdot \left(\sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} lss_{b-1,p,lt,h} - \sum_{p \in P} \sum_{lt \in LT} \sum_{h \in H} lss_{b,p,lt,h} \right) \quad \forall b \in B, b > 1 \quad (21)$$

3.6 MODELO COM LOTE VARIÁVEL (VBS)

Nessa formulação, são utilizadas representação contínua de volume e representação discreta de tempo. O volume dos produtos a serem bombeados são escolhidos dentro de um intervalo contínuo limitado pelos limites inferior e superior do tamanho dos lotes. Assim como no modelo FBS, o inventário é considerado durante todo o horizonte para obter a melhor sequência a ser enviada, respeitando os limites de capacidade de estocagem.

Esse modelo tem a vantagem de não limitar o tamanho das bateladas com valores pré-fixados, tornando a solução mais flexível. Logo, nesse modelo, o índice lt não é utilizado, pois o tamanho da batelada agora é variável. Essa metodologia reduz o número de variáveis binárias, pois $lss_{b,p,lt,h}$ é alterada para $ls_{b,p,h}$. A variável inteira $nbats_{p,lt}$ também é eliminada da formulação do modelo. Porém, é necessário adicionar uma variável contínua $W_{b,p,h}$ que representa o volume da batelada b com o produto p a ser transportado no dia h . Dessa maneira, a matriz $lots_{p,lt}$ é substituída pelos limites de lotes $lots_p^{min}$ e $lots_p^{max}$ a serem satisfeitos por $W_{b,p,h}$. Detalhes acerca da notação utilizada estão no Apêndice A (página 217).

3.6.1 Restrições VBS

A equação 3 também é considerada neste modelo, mas a soma $\sum_{lt \in LT} nbats_{p,lt} \cdot lots_{p,lt}$ é alterada por $\sum_{b \in B} \sum_{h \in H} W_{b,p,h}$ no modelo com volume variável. O volume de cada batelada deve permanecer entre os limites mínimos e máximos de lotes, como indicado na equação 22.

Se a batelada b é uma batelada fictícia, o volume deve ser igual a zero.

$$lots_p^{min} \cdot ls_{b,p,h} \leq W_{b,p,h} \leq lots_p^{max} \cdot ls_{b,p,h} \quad \forall b \in B, p \in P, h \in H \quad (22)$$

As restrições do modelo FBS com a variável $lss_{b,p,lt,h}$ foram todas mudadas para o modelo VBS que utiliza a variável binária $ls_{b,p,h}$. Logo, as restrições 4, 11, 12 e 13 foram substituídas pelas restrições 23, 24, 25 e 26 nesse modelo, onde o somatório do índice lt é desconsiderado e a variável binária $ls_{b,p,h}$ é substituída.

$$\sum_{p \in P} \sum_{h \in H} ls_{b,p,h} \leq 1 \quad \forall b \in B \quad (23)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{p \in P} ls_{b,p,h} \leq \rho \quad \forall h \in H \quad (24)$$

$$\sum_{h \in H} ls_{b-1,p,h} + \sum_{h \in H} ls_{b,p',h} \leq 1 \quad \forall b \in B, \{p, p'\} \in P, b > 1, seq_{p,p'} = 0 \quad (25)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{h \in H} ls_{b,p,h} \leq \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} ls_{b-1,p,h} \quad \forall b \in B, b > 1 \quad (26)$$

Enquanto as restrições de controle de inventário 6, 8 e 10 são mantidas, as inequações 7 e 9 são alteradas pelas equações 27 e 28.

$$ID_{p,h}^{clientes} = ID_{p,h-1}^{clientes} - Dem_{p,h} + \sum_{b \in B} W_{b,p,h'} \quad (27)$$

$$\forall p \in P, \{h, h'\} \in H, stl_p < h, h' = h - stl_p$$

$$ID_{p,h}^{total} = ID_{p,h-1}^{total} - Dem_{p,h} + \sum_{b \in B} W_{b,p,h} \quad \forall p \in P, h \in H, h > 1 \quad (28)$$

Uma substituição similar é realizada para as restrições para o cálculo do tempo de recebimento das bateladas. Equações 14 até 17 também são consideradas, mas alteradas pelas equações 29 até 32.

$$T_b^{rec} \leq \left(\frac{1}{vb^{min}} \right) \cdot \left(pipe + \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} W_{b,p,h} \right) \quad \forall b = 1 \quad (29)$$

$$T_b^{rec} \geq \left(\frac{1}{vb^{max}} \right) \cdot \left(pipe + \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} W_{b,p,h} \right) \quad \forall b = 1 \quad (30)$$

$$T_b^{rec} \leq T_{b-1}^{rec} + \left(\frac{1}{vb^{min}} \right) \cdot \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} W_{b,p,h} \quad \forall b \in B, b > 1 \quad (31)$$

$$T_b^{rec} \geq T_{b-1}^{rec} + \left(\frac{1}{vb^{max}} \right) \cdot \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} W_{b,p,h} \quad \forall b \in B, b > 1 \quad (32)$$

As restrições 18 até 21 também são alteradas para o modelo com volume variável para as restrições 33 até 36, onde a variável binária lss também é substituída por ls .

$$T_b^{rec} \geq \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} (h-1) \cdot ls_{b,p,h} - (h^{max} + 1) \cdot \left(1 - \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} ls_{b,p,h} \right) + eps \quad \forall b \in B \quad (33)$$

$$T_b^{rec} \leq \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} h \cdot ls_{b,p,h} + (h^{max} + 1) \cdot \left(1 - \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} ls_{b,p,h} \right) \quad \forall b \in B \quad (34)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{h \in H} W_{b,p,h} \geq pipe \cdot \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} ls_{b,p,h} \quad \forall b \in B, b = nb \quad (35)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{h \in H} W_{b-1,p,h} \geq pipe \cdot \left(\sum_{p \in P} \sum_{h \in H} ls_{b-1,p,h} - \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} ls_{b,p,h} \right) \quad \forall b \in B, b > 1 \quad (36)$$

A função objetivo é a mesma usada no modelo FBS (expressão 2).

3.7 RESULTADOS

Conforme ilustrado pela figura 9, o poliduto a ser programado possui 147 km de comprimento e um total de 18.000 unidades volumétricas (uv). O poliduto transporta seis diferentes produtos (P1-P6). Os tamanhos típicos dos lotes para cada produto ($lots_{p,lt}$) são apresentados na tabela 2. Para o modelo de sequenciamento VBS, os limites $lots_p^{min}$ e $lots_p^{max}$ podem ser obtidos através das colunas 1 e 3 de $lots_{p,lt}$, respectivamente, exceto para os produtos P2 e P3, onde $lots_p^{min} = 8000$. A vazão operacional pode variar de 450 uv/h até 650 uv/h. Com relação a qualidade dos produtos, algumas sequências não podem conter interface dentro do duto. A tabela 2 contém as sequências permitidas (✓) ou proibidas (-) para o envio de dois produtos de forma consecutiva. A capacidade máxima de inventário e o período de certificação dos produtos também estão detalhados na tabela 2. A capacidade mínima de inventário considerada em todos os estudos de caso é zero.



Figura 9 – Poliduto da Companhia Logística de Combustíveis
Fonte: CLC (2010)

Tabela 2 – Dados comuns utilizados em todos os cenários

	$lots_{p,lt}$ (uv)			ID_p^{max} (uv)	stl_p (dias)	$seq_{p,p'}$					
	1	2	3			P1	P2	P3	P4	P5	P6
P1	17300	18000	21800	81500	1	-	✓	✓	✓	-	-
P2	0	8000	16000	32000	2	✓	-	-	-	-	-
P3	0	8000	16000	24000	1	✓	-	-	✓	✓	-
P4	3800	8000	11800	27800	1	✓	-	✓	-	✓	-
P5	800	1600	3200	10320	1	-	-	✓	✓	-	✓
P6	3100	4650	6200	13120	1	-	-	-	-	✓	-

Todos os estudos de caso são baseados em cenários reais da Companhia Logística de Combustíveis (CLC, 2010), uma empresa Portuguesa que transporta e distribui derivados de petróleo. Três estudos de caso serão apresentados. O estudo de caso 1 contempla 6 meses consecutivos e ambos os modelos PLIM de sequenciamento (FBS e VBS) são aplicados de forma consecutiva para todos os meses, onde os resultados de um mês são utilizados como dados iniciais do próximo mês. O estudo de caso 2 utiliza a estrutura hierárquica proposta para a obtenção de uma solução final completa. O estudo de caso 3 compara os modelos de sequenciamento PLIM com outras soluções.

3.7.1 Estudo de caso 1

Resultados computacionais do modelo FBS

Várias instâncias foram testadas para o modelo FBS. Os dados associados são os mesmos apresentados na tabela 2. É considerado um limite de tempo computacional de 30 minutos. Foi utilizado o *software* ILOG OPL Studio 5.5.1. e CPLEX 11.0 em um computador Intel Core 2 Duo (2.2GHz), 2GB RAM. Os resultados são apresentados na tabela 3, que considera o modelo com todas as restrições propostas (restrições 2 até 21). São apresentados resultados de seis meses consecutivos, utilizando o modelo FBS.

Na tabela 3, “*Status*” refere-se ao estado da solução apresentada pelo *solver*. “Tempo” indica o tempo para a obtenção da solução apresentada. “F. Objetivo” apresenta o valor da melhor solução inteira encontrada, considerando a expressão 2. “F.O. Relaxada” corresponde à melhor solução relaxada obtida pelo *solver* quando o critério de parada é atingido (solução ótima ou tempo limite). O *gap* relativo entre a melhor solução inteira (F. Objetivo) e relaxada (F.O. Relaxada) encontrada é apresentado em “*Gap*”. O número de iterações para atingir a solução é apresentada em “*Iterações*”. “*Variáveis*” mostra o número total de variáveis geradas (incluindo variáveis contínuas e inteiras) para o modelo proposto em cada cenário. O número de variáveis inteiras também é apresentado “*Var. Int.*”. Finalmente, o número de restrições do modelo matemático para cada cenário é apresentado por “*Restrições*”. Os símbolos “-” na F. Objetivo e *Gap* indicam que nenhuma solução inteira é encontrada quando o tempo computacional limite é atingido.

É possível observar na tabela 3 que nenhuma solução ótima é encontrada no tempo computacional limite de 30 minutos, considerando seis diferentes cenários. Em três casos, as soluções obtidas são próximas da solução ótima relaxada, apresentando um *gap* relativo inferior a 1% (meses 06/06, 09/06 e 11/06). Apesar disso, em dois outros casos (meses 08/06 e 10/06)

Tabela 3 – Resultados do modelo FBS para seis meses consecutivos

	06/06	07/06	08/06	09/06	10/06	11/06
<i>Status</i>	<i>T. Limit</i>	<i>T. Limit</i>	<i>T. Limit</i>	<i>T. Limit</i>	<i>T. Limit</i>	<i>T. Limit</i>
Tempo (s)	1800	1800	1800	1800	1800	1800
F. Objetivo	5,209	5,897	-	5,221	-	5,998
F.O. Relaxada	5,198	5,723	5,727	5,172	6,05	5,977
<i>Gap (%)</i>	0,19	2,95	-	0,93	-	0,36
Iterações	7567776	7298468	7016011	5370764	8562266	6922684
Variáveis	6713	7015	7415	6568	7415	7180
Var. Int.	6311	6599	6999	6167	6999	6775
Restrições	1586	1662	1662	1557	1662	1673

nenhuma solução viável foi encontrada dentro do tempo limite computacional.

Resultados computacionais do modelo VBS

Para o modelo VBS, o tempo limite computacional considerado foi mantido em 30 minutos. Os resultados são apresentados na tabela 4, utilizando o *software* ILOG OPL Studio 5.5.1. e CPLEX 11.0 em um computador Intel Core 2 Duo (2.2GHz), 2GB RAM. Os dados finais de cada mês foram utilizados como dados iniciais do mês subsequente. A compatibilidade é realizada na criação do conjunto *B1* (vide Apêndice A, página 217). Os *labels* apresentados na tabela 4 são os mesmos apresentados pela tabela 3.

Tabela 4 – Resultados do modelo VBS para seis meses consecutivos

	06/06	07/06	08/06	09/06	10/06	11/06
<i>Status</i>	Ótimo	<i>T. Limit</i>	<i>T. Limit</i>	Ótimo	Ótimo	Ótimo
Tempo (s)	382,25	1800	1800	94,27	800,14	455,75
F. Objetivo	4,968	5,018	5,05	5	4,968	4,967
F.O. Relaxada	4,968	4,968	4,968	5	4,968	4,967
<i>Gap (%)</i>	0	1	1,65	0	0	0
Iterações	1093647	3900852	5396884	285390	2922857	1420235
Variáveis	5124	5354	5654	5015	5654	5475
Var. Int.	2361	2469	2619	2307	2619	2535
Restrições	6290	8803	6883	6153	6883	6725

Através da tabela 4, é possível observar que soluções ótimas são encontradas em quatro dos seis diferentes cenários. Para obter essas soluções, foi necessário um tempo computacional inferior à metade do valor limite (30 minutos) imposto. Nos outros dois casos (meses 07/06 e 08/06) o tempo computacional limite é atingido e soluções viáveis foram encontradas com *gap* relativo menor que 2% cada.

Comparando os modelos FBS e VBS, através das tabelas 3 e 4, é possível observar que

o modelo VBS obtém melhores resultados para os cenários estudados. Isso ocorre pela redução do número de variáveis inteiras e binárias, diminuindo assim o esforço computacional para encontrar soluções ótimas. Além disso, a solução do modelo VBS é mais flexível em relação ao volume das bateladas. As sequências e volumes resultantes para todos os cenários do modelo VBS são apresentados na figura 10.

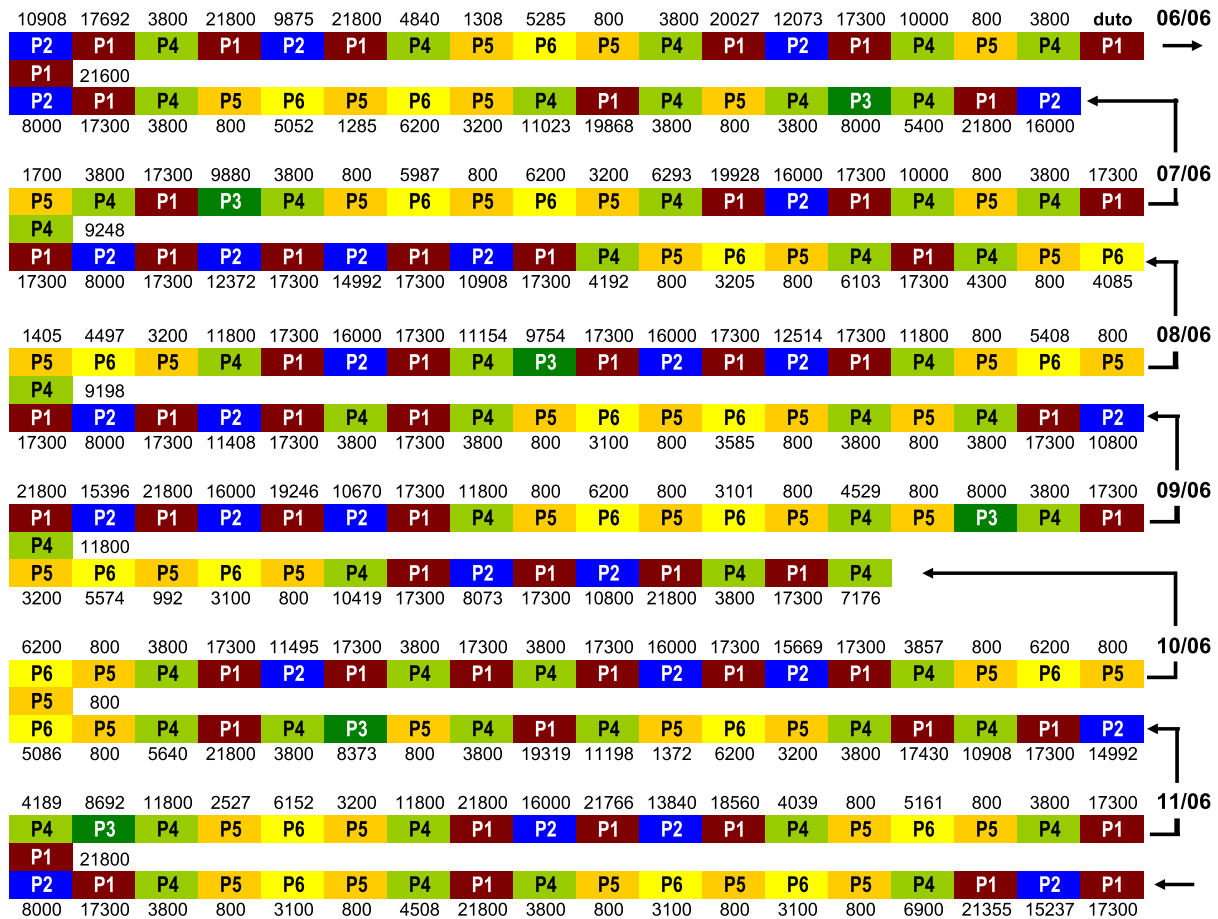


Figura 10 – Sequência e volumes (uv) enviados para os meses da tabela 4

Por meio da figura, pode-se observar que a primeira batelada sequenciada de cada mês é compatível com a última sequenciada no mês anterior. O número de bateladas sequenciadas difere em cada mês, assim como a ordem de envio de produtos. O modelo constrói a ordem visando à satisfação da demanda que varia de mês a mês.

3.7.2 Estudo de caso 2

Partindo da hipótese que o modelo VBS tende a apresentar melhores resultados, utilizaram-se outros três cenários baseados nas operações da empresa portuguesa Companhia Logística de Combustíveis (CLC) para um mês típico. Os resultados do modelo de sequenciamento VBS, de forma similar ao que ocorria com o modelo FBS, são então utilizados como entrada

para o modelo detalhado proposto por Relvas *et al.* (2006), aqui denominado RM, conforme a figura 11.

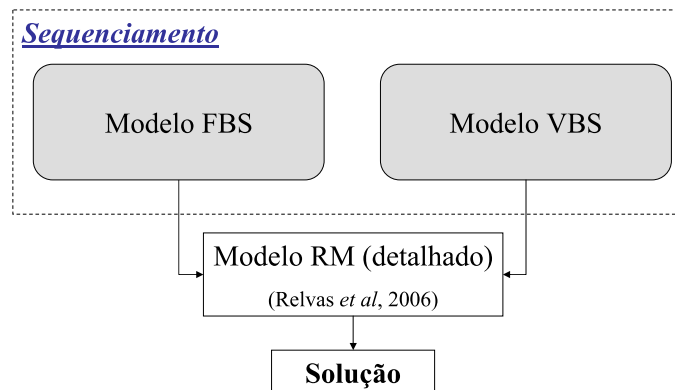


Figura 11 – Estrutura hierárquica dos modelos: único duto

Para esse segundo estudo de caso, a função objetivo do modelo VBS foi modificada para comparação com os resultados apresentados para o modelo RM. Dessa maneira, a saída do modelo VBS resulta em parâmetros coerentes para o modelo RM. Dessa forma, a expressão 37, semelhante à função objetivo utilizada no modelo RM, é utilizada no lugar da expressão 2 (página 62) para a apresentação dos próximos resultados. Um terceiro fator foi adicionado à nova função objetivo. Nele, a variável *minid* maximiza o menor nível de inventário através da estratégia minmax. Detalhes adicionais podem ser encontrados em Relvas (2008).

$$\text{minimizar } 3 \cdot \frac{dif}{\sum_{p \in P} \sum_{h \in H} Dem_{p,h}} - 2 \cdot \frac{T_{nb}^{rec}}{h^{max}} - 0,5 \cdot minid \quad (37)$$

A variável *minid*, maximizada na função objetivo, é obtida através da inequação 38. Para o estudo de caso em questão, essa inequação deve ser adicionada às demais restrições do modelo VBS anteriormente apresentadas.

$$minid \leq \frac{ID_{p,h}^{clientes}}{ID_p^{max}} \quad \forall p \in P, h \in H \quad (38)$$

Finalmente, a equação 3 foi substituída pela equação 39, pois o volume enviado deve ser maior que a demanda. Note que tanto na função objetivo 37 quanto na restrição 39, a variável *dif* não contém o índice *p*. A variável *dif* identifica o volume total enviado além da demanda.

$$dif = \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} \left(\sum_{b \in B} W_{b,p,h} - Dem_{p,h} \right) \quad (39)$$

Assim, para o estudo de caso 2, o modelo VBS contendo as restrições apresentadas na seção 3.6.1 além das expressões 37 a 39, foi executado, e o resultado serviu como entrada do modelo RM em três cenários. Os cenários apresentam três diferentes horizontes de tempo: 1 semana (C1), 2 semanas (C2) e 1 mês (C3). Tanto o modelo RM quanto o modelo VBS foram implementados, neste caso, no *software* GAMS. O limite de tempo computacional considerado é de 15 minutos, utilizando o *software* GAMS 22.8, CPLEX 11.1 em um computador Intel Pentium Core 2 Duo P9400, 4GB RAM. Na formulação utilizando o *software* GAMS, o pré-processamento apresentado no apêndice A.3.2 (página 221) não foi implementado e os conjuntos esparsos⁷ não foram gerados. Dessa forma, todos os índices possíveis são considerados. Os resultados são apresentados na tabela 5. Nesta tabela, “Nós explorados” indica o número de nós examinados pelo *solver* para a procura de uma solução viável inteira. “Nº máx. bateladas” indica todos os índices de bateladas gerados, incluindo as bateladas fictícias. O número de bateladas sequenciadas sugerido pelo modelo (não fictícias) é dado por “Nº Bateladas”. Demais *labels* são os mesmo detalhados para a tabela 3.

Tabela 5 – Resultados - VBS+RM com 3 diferentes cenários

	Cenário 1 (C1)		Cenário 2 (C2)		Cenário 3 (C3)	
	VBS + RM		VBS + RM		VBS + RM	
Tempo (s)	1,59	0,09	27,46	0,58	903,797	5,108
F. Objetivo	-2,3041	-2,0746	-2,3052	-2,0726	-2,3052	-2,1325
Gap (%)	0	0	0	0	0	0
Iterações	23124	125	364731	1084	4020401	7375
Nós explorados	254	0	568	17	3217	140
Variáveis	947	2193	979	6878	11223	23804
Var. inteiras	180	433	756	1825	2844	6658
Restrições	2743	4042	9343	16380	24998	57852
Nº máx. bateladas	20	-	40	-	60	-
Nº Bateladas	11	11	22	22	43	43

Pela análise da tabela 5, é possível observar como a complexidade computacional do modelo VBS aumenta em função da expansão do horizonte temporal. Para um cenário de 1 mês (Cenário 3), a solução ótima foi encontrada dentro do tempo computacional limite de 15 minutos. Assim, é essencial gerar eficientemente o domínio para as variáveis que utilizam os três índices no modelo VBS (como apresentado na seção A.3.2), em função do tamanho do

⁷Detalhes adicionais acerca do tema serão apresentados na seção A.3 (página 219).

horizonte em análise. Outra característica, que se pode observar por meio da tabela 5, refere-se ao número efetivo de bateladas que são utilizadas, o qual aumenta proporcionalmente com o incremento do horizonte de tempo. Finalmente, pode-se ainda observar uma diferença na função objetivo entre os modelos VBS e RM, como esperado, pelo fato das bateladas serem fixadas previamente no RM. O modelo RM apresenta soluções com diferenças de 7-10% na função objetivo se comparada ao modelo VBS.

3.7.3 Estudo de caso 3

Nessa seção, serão comparados os resultados obtidos do cenário 3 (C3, VBS+RM) com a estratégia de decomposição utilizando heurísticas proposta por Relvas *et al.* (2009) e com a operação real da CLC durante esse período. Para esse mês, a estratégia previamente proposta utiliza sequenciamento heurístico integrado com o mesmo modelo (RM). Relvas *et al.* (2009) propôs heurísticamente quatro diferentes sequências e todas elas foram utilizadas no modelo. Duas das quatro sequências heurísticas pré-determinadas apresentaram soluções viáveis dentro de um tempo computacional total de 248,7 minutos. As duas soluções viáveis foram obtidas em um tempo de 8,7 minutos enquanto as outras duas sequências não apresentaram solução após o tempo computacional limite de 2h, cada. Adicionalmente, não foi possível provar a otimalidade das duas sequências viáveis dentro do tempo computacional limite.

Ainda considerando a questão temporal da obtenção de uma solução, para a estratégia de sequenciamento heurístico previamente proposta, o usuário deve despende algum tempo criando as sequências e analisando as melhores opções. Este fato não é considerado no tempo computacional anteriormente reportado. A solução selecionada obteve o valor da função objetivo igual a $-1,8667$, bombeando um total de 39 bateladas. A tabela 6 sumariza os resultados operacionais para os métodos desenvolvidos e a operação real.

Tabela 6 – Comparação dos métodos de decomposição

	VBS + RM	heurística + RM	CLC
Bateladas bombeadas	43	39	33
Nº máx. bateladas	58	41	-
Nº min. bateladas	25	26	-
Vazão média (uv/h)	516,0	543,1	511,0
Δ Inventário (uv)	0	+384	-4146
Horizonte utilizado (%)	98,18	93,33	98,00
Inventário mínimo (%)	38,96 (P1)	25,24 (P5)	35,45 (P5)

Na tabela 6, pode-se observar que, utilizando o método aqui proposto (VBS + RM), a vazão média foi melhorada em relação ao sequenciamento heurístico proposto na literatura (heurística + RM). Isto se deve ao atendimento da demanda exata (Δ Inventário) requerida

pelos clientes e pelo maior uso do horizonte de tempo. Quando comparado os níveis finais de inventário (% Inventário mínimo), o método proposto aumenta os níveis do produto com o menor valor.

Em comparação com o realizado pela CLC, a solução da estratégia proposta sugere que seja movimentado um maior número de bateladas. Apesar da vazão sugerida ser superior à realizada pela companhia, toda a demanda foi atendida e o duto foi melhor utilizado. Também é possível perceber que o menor nível de inventário possui valores inferiores na solução realizada pela CLC.

3.8 CONCLUSÃO

O presente capítulo apresentou uma estrutura de otimização para o auxílio na tomada de decisão de atividades de *scheduling* para um duto real que interliga uma refinaria a um cliente final. Foram apresentados dois modelos em PLIM para determinar sequência e volumes de bateladas a serem enviadas para o poliduto. O modelo FBS e o modelo VBS foram apresentados, sendo que este último sugeriu melhores soluções. Foi posteriormente criado um método de decomposição que integrou o modelo VBS com o modelo detalhado para a realização do *scheduling* do duto, tendo-se obtido resultados muito promissores. Como objeto de estudo futuro, pode-se sugerir cortes válidos no espaço de busca do modelo de sequenciamento, caso sua solução seja uma entrada inviável para o modelo RM. O método de decomposição foi testado em cenários típicos para a análise de desempenho e melhorias. Foram geradas soluções promissoras para cenários com mais de 40 bateladas, utilizando um horizonte de planejamento de 30 dias. Dentre as vantagens da presente estrutura destaca-se o uso de um único modelo para o cálculo do número de bateladas, sequência dos produtos e volume das bateladas. Dentre as desvantagens, foco de trabalhos futuros, encontra-se o desenvolvimento de cortes válidos quando uma solução do modelo PLIM de sequenciamento (VBS) venha a apresentar soluções inviáveis no modelo PLIM detalhado (RM). Cortes podem ser adicionados nas sequências (cortes inteiros) no volume de bateladas (redução no domínio para a variável contínua). Uma série de testes deve ser desenvolvida para validação do método proposto.

4 TRANSFERÊNCIA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO - REDE DE DUTOS E SUA CARACTERIZAÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO

Assim como em Felizari *et al.* (2007), Neves-Jr *et al.* (2007a) e Neves-Jr *et al.* (2007b), o problema a ser tratado a partir deste capítulo foi inspirado no sistema de distribuição de derivados da PETROBRAS. Porém, o problema aqui tratado contempla um número maior de áreas e dutos. Enquanto os autores tratam de problemas envolvendo 9 áreas e 15 trechos de dutos, os modelos propostos serão aplicados a uma rede envolvendo 14 áreas e 30 trechos de dutos, além de transportar uma quantidade maior de produtos. Adicionalmente, os modelos desenvolvidos evoluem o detalhamento operacional da rede em estudo, conforme apresentado nos capítulos seguintes.

A programação da operação de toda a malha de dutos de São Paulo e adjacências é uma tarefa de grande complexidade, já que esta envolve dezenas de dutos interligando várias áreas distintas. Esta malha é constituída de duas redes principais (rede claros e rede de escuros¹), as quais não possuem uma interdependência operacional significativa (FELIZARI, 2009). A rede de escuros, por exemplo, exige que restrições de aquecimento sejam respeitadas quando algum produto permanece um grande período de tempo no interior do duto, não sendo necessário considerar esse tipo de restrição para a rede de claros.

Programações não efetuadas da melhor forma possível conduzem invariavelmente a perdas operacionais, tais como, não atendimento à demanda, manutenção de estoques em dissonância com metas pré-estabelecidas. A dificuldade na condução da programação das atividades na malha dutoviária sob análise deve-se principalmente ao grande número de variáveis envolvidas na obtenção da programação das atividades. Implementar uma solução que contemple todas as variáveis, determinando uma boa política de condução da malha dutoviária, não é uma tarefa trivial, mesmo para especialistas experientes (NEVES-JR *et al.*, 2007a).

Na hora de tomar decisões, o programador precisa ter à mão, indicadores confiáveis

¹Escuros é o termo dado aos produtos derivados pesados de baixo valor agregado, por exemplo, óleos crus.

que podem influenciar diretamente, por exemplo, na política de tancagem e produção de uma refinaria ou na política de carga/descarga de navios atracados. Surge, então, um dos elementos motivadores: obter uma solução que possa auxiliar decisões de programação de atividades de curto a médio prazos na malha de dutos de São Paulo e adjacências.

Este capítulo apresenta o problema de transferência de derivados de petróleo em uma rede de dutos. Primeiramente é feita a descrição do problema a ser tratado, suas dimensões e considerações. As restrições operacionais também são apresentadas, segundo rotina operacional dos atuais programadores da rede. Finalmente, a estrutura de solução proposta para obter o planejamento e *scheduling* da rede de dutos é apresentada.

4.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Nesta seção, são abordados aspectos específicos da rede em estudo. A programação diária das atividades da malha dutoviária é norteada pelo cumprimento de demandas mensais de fornecimento. Basicamente, as cotas mensais são divididas em volumes menores (bateladas) que devem ser bombeados ao longo do horizonte de planejamento.

A rede é composta por áreas interligadas por um conjunto de segmentos de polidutos, ou trechos de dutos, os quais operam o transporte de um conjunto de produtos (derivados de petróleo e etanol) entre áreas adjacentes. As áreas podem representar refinarias, terminais de armazenamento/distribuição, terminais portuários, clientes finais ou um simples entroncamento de válvulas. A figura 12 apresenta a rede na forma de um grafo direcionado, onde os nós representam as áreas e as arestas representam os trechos de dutos que interligam essas áreas.

A rede considerada na figura 12 envolve 14 órgãos (ou áreas), sendo 4 refinarias (N3, N4, N5 e N6), 2 terminais portuários (N7 e N10), 2 clientes finais (N2 e N14) que recebem ou enviam produtos através de 5 terminais de distribuição (N8, N9, N11, N12 e N13). Além disso, o nó N1 representa um entroncamento do sistema, atrelado a conjunto de bombas, o qual não tem tanques para armazenamento de produtos. Os órgãos são interligados através de 30 dutos unidirecionais ou bidirecionais (em casos de reversão de fluxo²). Cada duto tem um volume particular, como apresentado na tabela 7. Um produto pode levar muitas horas até alcançar seu destino final. Uma batelada pode permanecer em um duto até uma outra deslocá-la. Cada produto é estocado em um tanque específico dentro de um órgão. Dentre uma lista de 35 produtos³, cerca de 14 derivados de petróleo usualmente são transportados nessa rede. Uma

²A reversão de fluxo será melhor detalhada no item Reversão em Dutos (página 85)

³Dentre os 35 produtos apresentados, os produtos 1 a 9, 28 e 33 correspondem a produtos fora de especificação e, na maioria dos cenários, não há movimentação destes produtos.

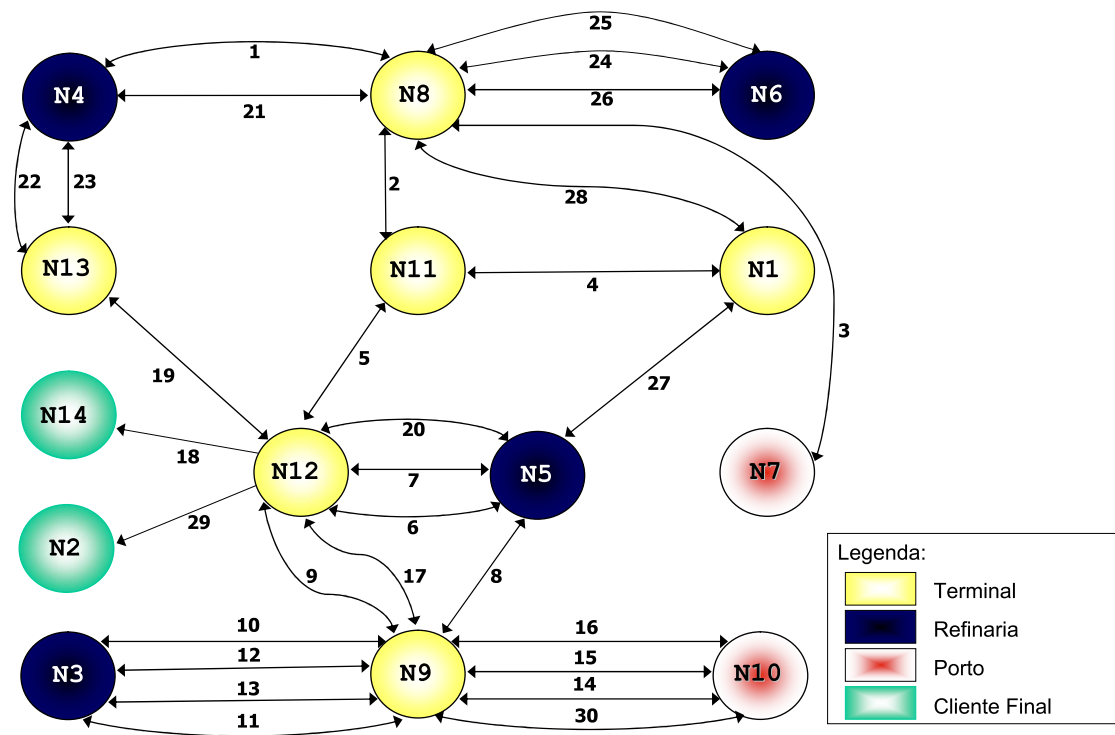


Figura 12 – Grafo direcionado da rede de claros

transferência típica pode envolver o bombeamento de uma batelada através de várias áreas. Por exemplo, uma batelada pode ser bombeada do nó N6 para o nó N14 passando pelos órgãos N8, N11 e N12. Nesse caso, a batelada pode utilizar os dutos 25, 2, 5 e 18, respectivamente.

Tabela 7 – Volume (10^3 uv) e extensão (km) aproximados dos dutos

Duto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Volume	23,3	13,8	21,5	3,05	5,7	0,35	1,2	3,1	2	0,114
Extensão	152,7	58,7	82,2	24,7	24,7	9,7	9,7	24	37,8	2,2
Duto	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Volume	0,309	0,174	0,174	0,582	1,078	1,078	5,8	2	4,75	1,3
Extensão	2	2	2	9,7	9,6	9,6	37,8	8,5	50,4	9,7
Duto	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Volume	42,5	9,4	5,25	4,3	8,3	4,6	3,5	4,1	0,03	1,782
Extensão	152,7	98,8	98,8	4,4	36,2	36,5	28	34	-	9,6

A seção seguinte, apresenta detalhes e características importantes na programação de operações da rede de claros abordada.

4.3 RESTRIÇÕES OPERACIONAIS

- **Horizonte de Programação:** tipicamente, os valores adotados pelos programadores da rede de claros para o horizonte de programação é de 7 dias (FELIZARI, 2009). Desta

forma, como o especialista não tem nenhuma ferramenta para auxílio na tomada de decisão, ele deve tomar o cenário atual de bombeamento e, baseado no conhecimento de uma série de particularidades de programação, prever o funcionamento da malha em estudo para um horizonte de trabalho de alguns dias. Na sequência, dia a dia, ele deve confrontar se o que foi previamente programado está sendo corretamente executado, corrigindo eventuais distorções (reprogramação) dentro de sua rotina operacional. A reprogramação, realizada diariamente, pode ser entendida como qualquer alteração na programação, por mudanças de horários, tamanho de cotas, produção, nível de qualidade dos produtos, chegada e saída de navios, equipamentos, manutenção e solicitação de clientes.

A solução mensal viabiliza previsões de possíveis problemas de suprimento de demandas ou produção, permitindo que decisões sejam tomadas com antecedência para solucionar futuros problemas.

- **Programação de atividades:** um grande desafio consiste na obtenção da programação das atividades de forma que estas possam ser efetivamente cumpridas ao longo do horizonte de trabalho. Evitar significativas reprogramações⁴, prezar o atendimento dos requisitos de entrega, tentar manter os estoques de refinarias e terminais dentro de limites práticos, e ao mesmo tempo gerenciar a utilização/ocupação dos dutos do sistema, não é tarefa trivial.

Na elaboração das programações, deve-se considerar uma série de aspectos de modo a viabilizar a execução destas programações ou reprogramações geradas como, por exemplo, evitar implementar na programação em andamento (consolidada no dia anterior), preferindo, quando possível, introduzir modificações nos dias mais à frente. Ou seja, procurar minimizar modificações no plano consolidado durante a tarefa de reprogramação.

- **Atendimento da demanda e escoamento da produção:** Cada órgão possui estimativas de demandas e produção para cada produto em intervalos específicos. As demandas deverão ser completamente atendidas e as produções escoadas até o final desses intervalos.
- **Definição das Bateladas de bombeamento:** o volume típico das bateladas transportadas segue algumas diretrizes operacionais, ditadas principalmente pelos seguintes fatores:
 1. Volume do tanque de origem (ou múltiplos deste volume);
 2. Volume do tanque de destino (ou múltiplos deste volume);
 3. Volume do trecho de duto envolvido (ou de mais dutos envolvidos);

⁴Reprogramações são frequentemente necessárias pelo fato dos especialistas não conseguirem ter uma visão de longo prazo

4. Janela de tempo disponível para o bombeamento; e
5. Necessidade de realizar um “deslocamento da linha” para entregar um produto que esteja “armazenado” temporariamente em um trecho de duto.

Baseado nestas diretrizes operacionais, bateladas típicas de bombeamento podem ser definidas para cada produto, em cada trecho de duto.

Um outro fato relevante em relação à definição da batelada de bombeamento é que existe a possibilidade de exceder em pouca quantidade o valor a ser enviado. Por exemplo, se no fechamento do montante mensal ainda houver um volume a ser transportado de um certo produto que não seja um múltiplo dos valores típicos de batelada, via de regra, é preferível exceder minimamente o volume de transporte planejado. O excedente de produto movimentado permanece como um saldo para programações futuras.

Além disso, para cada produto, em cada duto e sentido, existe uma quantidade mínima que pode ser enviada nas operações. A quantidade transportada não pode ser pequena devido à perdas de produtos por consequência de interfaces nos dutos.

- **Rotas:** dentro da rede em estudo existem centenas de rotas previamente cadastradas. Cada rota é composta por uma sequência de áreas intercaladas por segmentos de dutos, construindo o caminho de movimentação das bateladas desde a origem até o destino. O número de elementos de uma rota sempre assumirá um número ímpar, ou seja, a rota obrigatoriamente inicia e termina por um nó. Nesse sentido, uma mesma rota pode ser usada por bateladas que contenham produtos diferentes e vazões diferentes. Um exemplo de rota é apresentado de forma destacada na figura 13, onde a operação de transferência é feita a partir da área N6, com destino a N14. Assim, a rota conterá os elementos: {N6, 25, N8, 2, N11, 5, N12, 18, N14 }.
- **Vazão de bombeamento:** a vazão de bombeamento do sistema pode variar entre os limites mínimos e máximos, de acordo com o produto, o trecho de duto em análise, e a origem do bombeamento. Porém, a vazão de um determinado produto ao longo do transporte na malha é influenciada pelas vazões dos produtos que o deslocam. O tempo de transporte de uma batelada é função desta composição de vazões (ao longo do caminho que o produto será transportado na malha dutoviária).

Devido ao grande número de componentes na rede em estudo, restrições operacionais devem ser seguidas para um perfeito funcionamento do sistema de transporte e estocagem dos produtos. Dentre elas, pode-se citar:

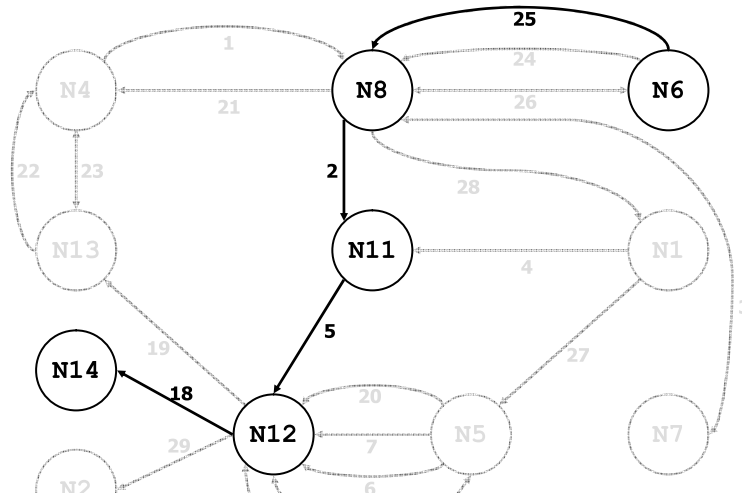


Figura 13 – Exemplo de rota

4.3.1 Restrições nos órgãos

- Conservação de massa:** Em cada órgão, deve ser considerados para o cálculo informações de: recebimento de produtos e/ou envio, além das quantidades previamente estocadas, produzida e/ou consumida internamente, entregue ao mercado local e estocada ao final do período de tempo. Considerando produtos líquidos numa temperatura bem definida, estas quantidades podem ser expressas como unidade de volume (uv), de forma que a restrição de conservação de massa fica equivalente à restrição de conservação de volume. Desta forma, no escopo abordado, não são consideradas misturas ou geração de novos produtos nos dutos.
- Restrições locais:** Deve ser observado o conjunto de bombas e válvulas hidráulicas nos órgãos que limita o número máximo de operações de envio/recebimento de produtos em cada órgão. Estas restrições devem ser respeitadas no estabelecimento da programação. Além disso, o complexo de conexões internas nos órgãos (principalmente refinarias) não permite que determinadas operações em oleodutos ocorram simultaneamente, devido à utilização de trechos internos comuns de transporte. Cada configuração de conexões passível de uso para transporte de produtos é associada a um alinhamento, isto é, um código que agrupará configurações proibidas de serem exercitadas simultaneamente. Essa forma de representação visa facilitar a modelagem, evitando que seja necessário informar detalhes da topologia dos circuitos hidráulicos e dutos internos ao órgão.
- Operações de alinhamento/passagem:** A figura 14 apresenta exemplos de operação de passagem, (órgãos C e F) onde ocorrem manobras que alinham a batelada em movimentação, não havendo necessidade de estocagem intermediária.

- **Operação pulmão:** Um produto pode ser recebido em um tanque e ser simultaneamente bombeado desse tanque para outro duto (operação pulmão). Para considerar a operação de pulmão, a rota da batelada é dividida em duas ou mais rotas. A primeira rota contém a área de origem até à área intermediária em que o tanque será utilizado para a operação pulmão e, a última rota contém a área intermediária até à área de destino final.

Pelo exemplo da figura 14, produtos distintos são representados por cores distintas. Um determinado produto é enviado de A para C passando por B (figura 14a), ou de F para H passando por G (figura 14b). Na figura 14a, o produto é deslocado a uma vazão de 200 uv/h de A para B, sendo armazenado parcial e temporariamente em B, seguindo para C numa vazão superior (400 uv/h). Nesse caso, como a vazão BC é superior, o início do processo de envio BC deverá sofrer um atraso, permitindo que B armazene produto suficiente para ser bombeado a uma vazão superior (balanço de massa). Na figura 14b, o produto é deslocado a uma vazão de 400 uv/h de F para G, sendo armazenado parcial e temporariamente em G, seguindo para H numa vazão inferior (200 uv/h). Nesse caso, o processo de envio GH ocorrerá ao mesmo tempo do envio FG, mas com uma duração superior devido à vazão ser menor. As operações pulmão são indicadas para apenas alguns órgãos e produtos.

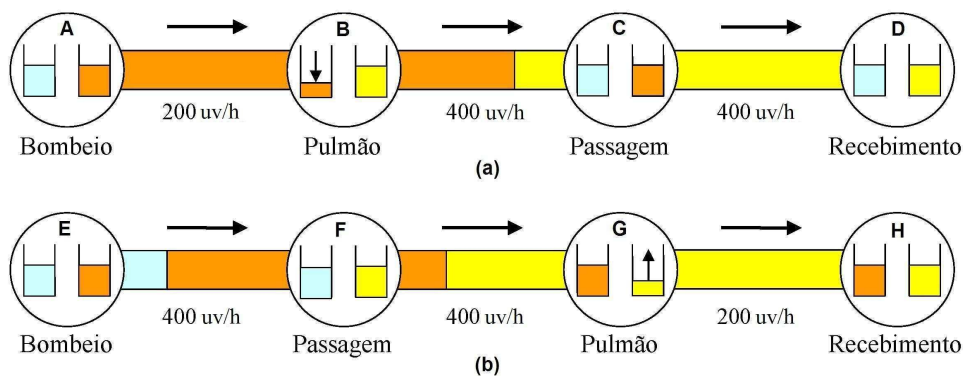


Figura 14 – Exemplos de movimentações permitidas

A tabela 8 apresenta as áreas e produtos onde ocorrem operação pulmão para a rede apresentada na figura 12.

- **Estoque intermediário:** De forma similar ao que ocorre na operação pulmão, um produto pode ser recebido em um tanque de um órgão intermediário, permanecer temporariamente estocado, e ser bombeado desse tanque para outro duto, caracterizando-se uma operação denominada “Estoque Intermediário”. Dessa forma, se não é possível enviar produtos diretamente entre uma origem e um destino, são escolhidas duas ou mais rotas

Tabela 8 – Áreas e produtos onde ocorrem operação pulmão

Áreas	Produtos											
	14	18	19	20	21	25	26	27	30	31	34	
N7		✓		✓		✓			✓	✓	✓	
N8					✓			✓	✓	✓	✓	
N9		✓	✓		✓					✓		
N10	✓				✓		✓					
N12					✓				✓	✓	✓	
N13					✓				✓	✓	✓	

para a viabilizar a entrega do produto em seu destino final. A primeira rota contém a área de origem até a área intermediária em que o tanque será utilizado e, a última rota contém a área intermediária até a área de destino final.

- **Restrições de tancagem:** os volumes dos tanques são agregados por produto e área sendo estes, dados de entrada na programação. Em cada órgão, devem ser observados os valores de estoques mínimos, meta (ou seja, nível de estoque desejável), máximos e capacidade máxima agregada (CP) para cada produto passível de ser armazenado no local. A figura 15 ilustra os patamares típicos de armazenamento operacional para as áreas envolvidas, para cada produto.

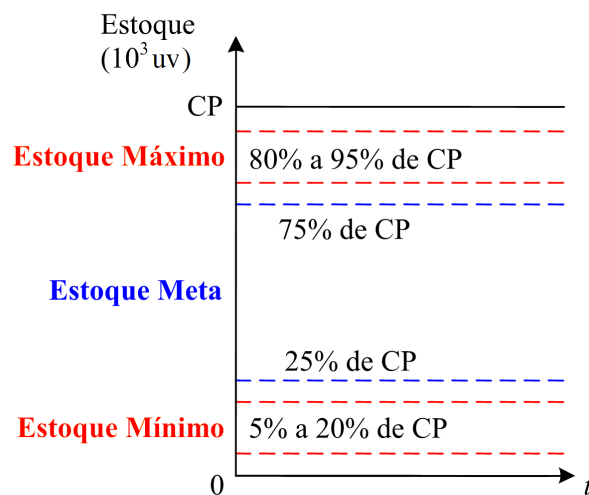


Figura 15 – Limites de estoque agregados por área

Considera-se, como volume de estoque, o total acumulado de certo produto em todos os seus tanques, com uma faixa de tolerância. Além disso, não é considerada variabilidade no limite de capacidade máxima agregada de armazenamento operacional (ou seja, não é considerada troca de serviço⁵).

⁵A utilização de um mesmo tanque ora por um produto, ora por outro, é chamado troca de serviço.

As tancagens dos terminais possuem níveis de troca de serviço reduzido ou nulo. Nas refinarias esta prática é mais frequente. Porém, será aqui considerado que cada tanque, em cada cenário analisado, pode armazenar apenas um tipo de produto.

A exportação (ou importação) de produtos através dos terminais portuários tipicamente segue um padrão não constante, isto é, o volume despachado (ou recebido) de cada produto pode variar, de acordo com a disponibilidade de navios.

- **Horossazonalidade nos órgãos:** Devido principalmente ao custo elevado da energia elétrica em certos períodos de pico de consumo, um órgão deve obedecer a horossazonalidade, ou seja, horários em que não pode ocorrer nenhum tipo de operação. Dessa maneira, o bombeamento de claros deve ser, em alguns casos, interrompido periodicamente ao longo dos dias úteis da semana. Observando que nem todos os órgãos sofrem interrupção no período de pico, podem ocorrer casos em que um órgão recebe produtos bombeados de outros órgãos que permanecem em operação durante a horossazonalidade. O período restritivo é das 17h30 às 20h30. No horário de verão, das 18h30 às 21h30.
- **Troca de turno nos órgãos:** Operações de recebimento e envio não devem ser nem iniciadas, nem terminadas, durante os intervalos das trocas de turno de trabalho nos vários órgãos. Os horários de troca de turno pode variar de órgão para órgão, sendo mais comum ocorrerem às 0h, 8h e 16h.

4.3.2 Restrições nos dutos

- **Volume dos dutos:** o volume de cada poliduto deve ser considerado. Além disso, o duto deverá estar sempre completamente preenchido. A cada duto é associado um sentido de percurso típico, e pode ser utilizado unidirecionalmente ou bidirecionalmente.
- **Utilização dos trechos de dutos:** os dutos podem ser compartilhados por diferentes produtos, desde que estes não o utilizem num mesmo instante de tempo. Sendo assim, o programador analisa todos os produtos para evitar a sobreposição de operações de transferência, ou seja, a utilização de um único duto no mesmo instante de tempo para o envio de produtos distintos.
- **Reversão em dutos:** Alguns dutos podem ter seu sentido de bombeamento revertido. Ou seja, existe um sentido de bombeamento normal e um sentido de bombeamento reverso dos dutos. As operações de reversão devem ser, se possível, minimizadas e são restritas dentro do horizonte de trabalho. Vale lembrar que uma série de procedimentos operacionais devem ser realizados para que uma operação de reversão seja efetivamente

executada. Na rede de claros em questão, a reversão do sentido de fluxo é precedida com o preenchimento do duto com apenas um tipo de produto. A exceção é o caso de dutos longos que geralmente revertem com mais de um produto em linha, devido aos custos operacionais. A figura 16(a) apresenta as bateladas inicialmente presentes no duto (bateladas 5 e 6). As figuras 16(b) e 16(c) mostram o bombeamento da batelada auxiliar de reversão (batelada 1) e o deslocamento das bateladas 5 e 6 em direção ao destino N2. A figura 16(d) ilustra a ocupação de todo o duto pela batelada 1, antes deste ser revertido. Finalmente, nas figuras 16(e) e 16(f) pode-se notar a inversão no sentido de fluxo e a movimentação das bateladas 3 e 4 em direção ao destino N3.

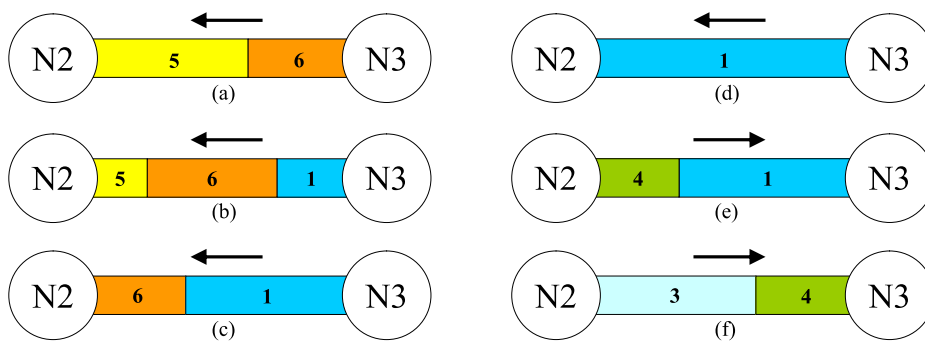


Figura 16 – Operação de reversão

- **Interfaces de bombeamento:** quando dois produtos são transportados em série pelo mesmo duto, gera-se uma interface entre os produtos. Os volumes transportados em um duto devem ser sequenciados de tal modo que exista compatibilidade entre os produtos de duas bateladas adjacentes. Existem casos em que o bombeamento sequencial de certos produtos não é recomendável, tipicamente pela degradação excessiva do produto mais nobre. Deste modo, é procedimento operacional considerar certas sequências de bombeamento como não permitidas.

Derivados de petróleo (produtos) semelhantes são alocados a um mesmo grupo, os quais são divididos da seguinte maneira:

- ALC: Álcool;
- DIE: Diesel;
- GAS: Gasolina;
- GLP: Gás;
- NFT: Nafta;
- QUE: Querosene.

A tabela 9 apresenta os grupos de produtos passíveis (✓) de bombeamento sequencial (compatíveis). A tabela 10 por sua vez, mostra quais produtos pertencem em cada grupo⁶

Tabela 9 – Grupos de produtos compatíveis para transporte sequencial no duto

	ALC	DIE	GAS	GLP	NFT	QUE
ALC	✓		✓		✓	
DIE		✓	✓		✓	✓
GAS	✓	✓	✓	✓	✓	
GLP			✓	✓		
NAF	✓	✓	✓		✓	
QUE		✓				✓

Tabela 10 – Produtos pertencentes a cada grupo

Grupo	Produtos									
ALC	8	9	27	32						
DIE	7	22	23	24	26	28	30	31	34	35
GAS	2	5	11	12	13	17	19	20	21	
GLP	3	10	14	15	16					
NAF	4	18								
QUE	6	25	29							

Quando dois produtos incompatíveis são sequenciados em um mesmo duto, é necessário interpor entre eles um terceiro produto, compatível com ambos, chamado de selo. O volume de selo a ser inserido no duto depende do duto e do sentido do fluxo. Esta restrição está ligada à manutenção da qualidade do produto, de forma a evitar sua degradação pela mistura com outro produto de menor qualidade. Desta forma, é procedimento operacional tentar minimizar alterações do produto bombeado no duto para que sejam reduzidas as perdas devido à formação de interface neste duto. Também por esta razão, procura-se maximizar o tamanho das bateladas de transporte, pois, em geral, reduções de volume por perdas geradas com interfaces são desprezadas.

4.4 METODOLOGIA DE SOLUÇÃO PROPOSTA

Considerando o que foi dito no capítulo 2 onde a revisão bibliográfica mostra a dificuldade na obtenção de soluções, mesmo no caso de um único duto, quando se quer obter uma solução para uma rede de dutos, a decomposição do problema em subproblemas é imprescindível. Como mencionado anteriormente, o maior desafio no desenvolvimento do modelo de larga escala PLIM desenvolvido por Relvas *et al.* (2006) e Relvas *et al.* (2007) é obter soluções em

⁶Obs: Produtos 1 (Água) e 33 (Des.Linha) não pertencem a nenhum grupo.

tempo computacional não aceitável⁷, já que a definição da sequência de produtos influencia o desempenho do modelo. Relvas *et al.* (2006) comenta que um modelo PLIM contendo todas as restrições para resolver o problema proposto não é capaz de retornar soluções ótimas em tempo computacional razoável para aplicações reais. Isso acontece porque a carga computacional para obter um *scheduling* de médio prazo (1 mês) é considerável para o cenário estudado.

Ao deixar livre para o procedimento de solução do modelo decidir e otimizar a sequência dos produtos a serem bombeados (casos da sequência livre) em um horizonte de *scheduling* de um mês, nenhuma solução foi encontrada em duas horas de processamento. Cafaro e Cerdá (2008b) propõem uma decomposição temporal para resolver o mesmo problema com sequência livre. O modelo foi executado quatro vezes, considerando horizontes de tempo semanais quando na realidade o horizonte de tempo total é de um mês.

No capítulo anterior, uma decomposição foi proposta para tratar o problema de *scheduling* em um duto. As soluções do modelo decomposto apresentaram melhores resultados do que a heurística proposta por Relvas *et al.* (2009). O problema descrito neste capítulo é sensivelmente mais complexo se comparado ao problema apresentado no capítulo anterior. Um maior número de áreas, dutos, produtos e restrições têm de ser considerados. Além disso, um fator complicador deve ser avaliado quando uma rede de dutos é tratada: a dinâmica da rede, ou seja, rotas distintas podem utilizar dutos em comum⁸. Realizar o *scheduling* para o tratamento de todas as restrições impostas no presente capítulo não é de todo uma tarefa trivial.

Neste trabalho, um método de decomposição é proposto com o intuito de obter a solução do *scheduling* final para a rede de dutos por meio da solução de diferentes problemas de média escala. A decomposição é baseada em várias etapas onde, em cada nível, um modelo PLIM pode ser utilizado. Na figura 17, os blocos em destaque são abordados no presente trabalho. Os demais blocos são complementares ao problema e são abordados em outros trabalhos (BONACIN *et al.*, 2007; FELIZARI, 2009; YAMAMOTO *et al.*, 2007a; CZAİKOWSKI *et al.*, 2008). A solução do problema descrito nesse capítulo é obtida através de quatro grandes blocos, que são a seguir sumarizados:

1. **Planejamento:** Em um primeiro momento, o problema é endereçado em um nível de detalhamento macro, onde o objetivo é obter a quantidade total de produtos que deve ser movimentada ao longo do horizonte de planejamento, a rota e dutos que serão utilizados nessa movimentação (BOSCHETTO *et al.*, 2010c). Os resultados desse nível são utilizados como dados iniciais do segundo bloco, a Alocação de Recursos;

⁷Poucos minutos, no caso em análise.

⁸Esse fato será detalhado no capítulo de resultados (capítulo 9, página 181).

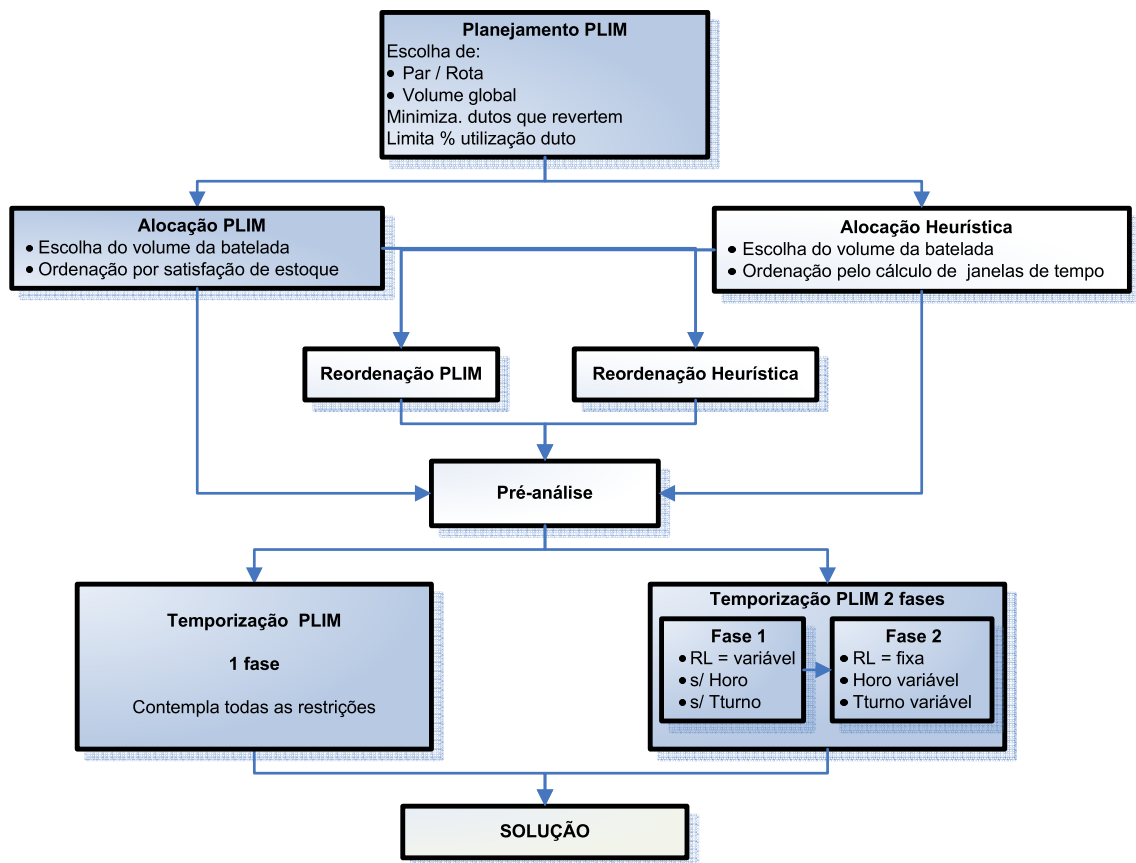


Figura 17 – Metodologia de solução proposta para a rede de dutos

2. **Alocação de Recursos:** A Alocação pode ser realizada através de um modelo PLIM ou feita heurísticamente (BOSCHETTO *et al.*, 2010b; BONACIN *et al.*, 2007). Nesta etapa, o volume das bateladas é obtido, e uma sequência em que as bateladas devem ser enviadas é gerada;
3. **Sequenciamento (ou reordenação):** A sequência pode ser reordenada, se desejável, através de 2 outros métodos desenvolvidos por Yamamoto *et al.* (2007a), Felizari (2009);
4. **Pré-análise:** A pré-análise utiliza uma das sequências geradas para determinar quebras de volumes, consequência da dinâmica da rede de dutos (CZAIKOWSKI *et al.*, 2008);
5. **Temporização:** Por fim, o modelo de temporização obtém o *scheduling* final da rede de dutos, considerando todas as restrições impostas ao problema (BOSCHETTO *et al.*, 2010a).

Mais detalhes a respeito de cada bloco serão apresentados nos capítulos seguintes.

4.5 CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou o problema de transferência de derivados de petróleo em uma rede de dutos, suas características principais e particularidades. Neste capítulo, os requisitos e características da rede de dutos a ser tratada foram apresentados, sendo que essas características devem ser respeitadas para a modelagem a ser realizada, visando solucionar o problema real proposto. Foi então proposta uma abordagem de solução do problema descrito. A abordagem proposta tem por objetivo viabilizar a solução computacional para cenários utilizando horizontes pré-determinados de 30 dias. A solução mensal viabiliza previsões de possíveis problemas de suprimento de demandas ou produção, permitindo que decisões sejam tomadas com antecedência para solucionar futuros problemas. Nos capítulos seguintes, serão apresentados os modelos PLIM que tratam cada nível da decomposição do problema. Além disso, um resumo dos algoritmos abordados em outros trabalhos é também apresentado.

5 MODELO PLIM DE PLANEJAMENTO - *PLANNING*

5.1 INTRODUÇÃO

De acordo com Moro (2000), a otimização de operações de transferência e estocagem de petróleo ou derivados tem por objetivo alcançar melhores condições de operação, segundo determinados critérios, sem alterar a malha disponível de válvulas, bombas e dutos, usando um melhor caminho para a transferência de produtos. O objeto de estudo do presente capítulo consiste na rede de dutos apresentada no capítulo anterior. Deseja-se inicialmente obter uma solução de planejamento para o transporte dos produtos dos órgãos produtores até os órgãos consumidores, de forma otimizada. Assim, busca-se obter detalhes a respeito do fornecimento e gerenciamento de inventário nos órgãos produtores e consumidores, ou seja, um planejamento ótimo das transferências entre esses órgãos, utilizando um modelo de programação linear inteira mista (PLIM).

O modelo PLIM de planejamento aqui proposto realiza o transporte de derivados de petróleo de órgãos produtores (refinarias ou terminais portuários - importação) com vista a suprir a demanda dos terminais, clientes finais ou mesmo terminais portuários (exportação). O problema inclui uma demanda mensal, gerenciamento de inventário, capacidades de estocagem, bem como restrições operacionais. Por exemplo, restrições operacionais incluem as rotas e dutos que poderão ser utilizados por determinados produtos e reversão nos dutos.

Esse capítulo está organizado como segue: A seção 5.2 apresenta as características gerais do problema em estudo, fornecendo suas especificações. A seção 5.3 descreve a nomenclatura utilizada, destacando o uso de conjuntos esparsos. A função objetivo é então detalhada na seção 5.4, seguida das restrições na seção 5.5. A seção 5.6 apresenta os resultados obtidos para vários estudos de caso. Conclusões e trabalhos futuros são apresentados na seção 5.7.

5.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS

O modelo de planejamento utiliza técnicas de programação linear inteira mista (PLIM). As considerações gerais utilizadas para formular o modelo são enumeradas a seguir:

1. Durante o horizonte de planejamento, são dados: toda produção, demanda e limites de tancagem para cada produto e área.
2. Os tanques são considerados de forma agregada por área e produto. Os níveis de inventário podem ser incrementados ou decrementados de acordo com o volume de cada produto recebido, enviado, ou devido às taxas de produção e consumo (mercado) local, dentro dos limites operacionais.
3. Os produtos podem ser enviados a partir de uma área de origem para diferentes destinos, bem como podem ser recebidos em um destino através de diferentes áreas de origem.
4. O volume movimentado para cada produto deve corresponder ao volume produzido/consumido somado ao estoque inicial de cada área, além de respeitar a capacidade de tanques disponíveis na área de origem/destino.
5. A utilização dutos para o transporte dos volumes a serem movimentados não deve ultrapassar à máxima estipulada para cada duto.
6. Dentro das práticas operacionais, existem rotas para cada produto a ser enviado. As rotas utilizadas por cada produto são selecionadas pelo modelo dentre um conjunto de rotas pré-cadastradas e homologadas, evitando dessa forma, contaminação de produtos incompatíveis.
7. Em dutos onde ocorre a reversão de fluxo, procedimentos específicos são requeridos para executar essa condição operacional. Como na etapa de planejamento não se sabe ao certo quantas operações de reversão serão necessárias, já que na abordagem de solução proposta a divisão dos volumes em bateladas menores deve ser feito posteriormente, a reversão deve ser evitada e os dutos sob reversão devem ter uma taxa de utilização menor, para posteriormente viabilizar-se a inserção das bateladas auxiliares de reversão.
8. Um produto pode ser recebido em um tanque e ser simultaneamente bombeado desse tanque para outro duto (operação pulmão). Para considerar a operação de pulmão, a rota da batelada é dividida em duas ou mais rotas. A primeira rota contém a área de origem até à área intermediária em que o tanque será utilizado para a operação pulmão e, a última rota contém a área intermediária até à área de destino final.

9. De forma similar ao que ocorre na operação pulmão, um produto pode ser recebido em um tanque de um órgão intermediário, permanecer temporariamente estocado, e ser bombeado desse tanque para outro duto, caracterizando-se uma operação denominada “Estoque Intermediário”. Dessa forma, se não é possível enviar produtos diretamente entre uma origem e um destino, são escolhidas duas ou mais rotas para a viabilizar a entrega do produto em seu destino final. A primeira rota contém a área de origem até a área intermediária em que o tanque será utilizado e, a última rota contém a área intermediária até a área de destino final.
10. Uma simplificação é realizada em relação aos produtos previamente armazenados nos dutos no início do horizonte de planejamento (bateladas em trânsito). Como ao final do horizonte, produtos com planejamento de movimentação não serão recebidos por permanecerem preenchendo os dutos da rede, considera-se que esse volume não recebido é correspondente ao volume inicial nos dutos.
11. Restrições de bombeio/recebimento por questões de custo elétrico e troca de turno dos operadores devem ser tratados no escopo de *scheduling* (Modelo de temporização PLIM, capítulo 8).
12. As restrições locais as quais, em essência, limitam o número de envios e recebimentos simultâneos das diferentes áreas em estudo, devem ser consideradas *a posteriori*, sendo satisfeitas durante o horizonte de *scheduling* (Modelo de temporização PLIM, capítulo 8).

Após apresentadas as principais considerações a serem observadas pelo modelo de planejamento, de maneira simplificada, devemos ter como entrada neste modelo os seguintes parâmetros:

- Listas de rotas;
- Trechos de duto;
- Áreas operacionais;
- Produtos a serem transportados;
- Produção por produto e área;
- Demanda por produto e área;
- Inventário inicial por produto e área;

- Limites de capacidade de estocagem por produto e área;
- Limites de estoques mínimo, máximo e meta por produto e área;
- Soma dos volumes dos dutos por rota;
- Vazão média de deslocamento por rota;
- Horizonte de tempo;
- Porcentagem máxima desejada para a utilização do duto durante o horizonte de planejamento;
- Porcentagem a ser subtraída da utilização máxima sempre que o duto operar nos 2 sentidos (reversão de fluxo);

O modelo de Planejamento PLIM está inserido em uma abordagem hierarquizada de solução (figura 18). Aspectos temporais e demais restrições (ex.: restrições locais, restrições de troca de turno de operadores) são tratadas nos módulos subsequentes do sistema.

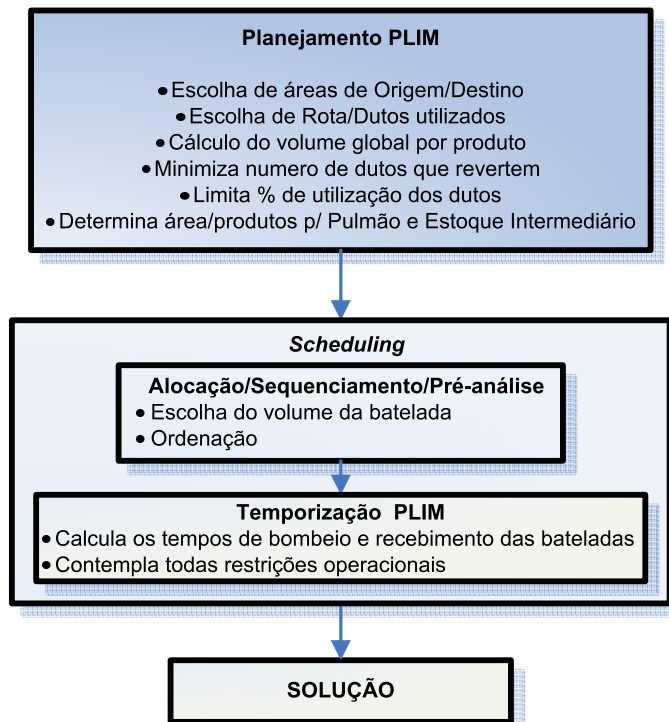


Figura 18 – Estrutura de decomposição - Planejamento/*Scheduling*

O modelo de PLIM de Planejamento define o volume total a ser movimentado de cada produto e os órgãos de origem, destino e a rota utilizada para a movimentação. Além disso, o

modelo minimiza o número de dutos que reverterem e determina as áreas e produtos onde serão realizadas as operações de pulmão e Estoque Intermediário. Esses resultados são, então, utilizados no bloco de Alocação/Sequenciamento, onde o volume a ser movimentado é dividido em bateladas menores, obtendo-se, dessa forma, a lista de bateladas sequenciadas. Mais detalhes a respeito deste bloco podem ser encontrado nos capítulos 6 e 7. O *scheduling* final é realizado através do modelo de Temporização PLIM (Capítulo 8), onde os tempos de bombeios e recebimentos são obtidos, de modo que todas as restrições operacionais sejam satisfeitas.

5.3 NOTAÇÃO

A notação adotada para a formulação do modelo matemático é indispensável para o entendimento do modelo e é apresentada no Apêndice B (página 223). Notações apresentadas previamente podem ser eventualmente utilizadas nesse capítulo. Os volumes são representados por unidades de volume genéricas (uv).

5.4 FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo (expressão 40) envolve os seguintes fatores:

Fator 1 Otimização da quantidade $Q_{n,n',p,r}$ de envio do produto p da área n para a área n' em função do tempo médio $(\frac{vr_r}{vb_{r,p}^{med}})$ gasto para percorrer a rota r . Ou seja, a rota será selecionada em função do melhor tempo de envio dos produtos. Vale ressaltar que há a escolha da rota que melhor se ajusta às condições de operação do cenário em análise.

Fator 2 Penalização em relação às violações na capacidade ($VCP_{n,p}$) e nos limites mínimo, máximo e meta de tancagem ($VID_{n,p}^{min}$, $VID_{n,p}^{max}$ e $VID_{n,p}^{meta}$). Idealmente, a partir dos parâmetros estabelecidos, violações de tancagem não deveriam ocorrer. Contudo, dependendo dos parâmetros de entrada, há necessidade de que violações sejam aceitas para diagnóstico de problemas do sistema. Assim, parte da função objetivo é penalizada por um número positivo suficientemente grande (M), que faz com que violações sejam evitadas majoritariamente.

Fator 3 Minimização dos dutos que sofrem reversão de fluxo. Operações de reversão demandam um considerável esforço operacional e, se possível, devem ser evitadas. O modelo busca encontrar uma solução em que o número de dutos que sofre reversão seja minimizado. Cabe ressaltar que, no grau de abstração considerado, não se sabe quantas reversões

irão ocorrer durante o horizonte de *scheduling* em um duto que sofrerá reversão. Contudo, o modelo PLIM irá sinalizar que um duto d sofrerá reversão. Após uma série de testes, estabeleceu-se um fator de ponderação $\frac{1}{2}$ de M para o termo em análise.

Fator 4 Penalização na violação da taxa de utilização ideal para cada duto. A variável $vari_d$ indica a violação na taxa de utilização ideal para cada duto, e é aqui minimizada. Os valores de utilização para cada duto são obtidos com base em valores históricos, sendo que, quando um duto é utilizado nos dois sentidos (direto e reverso), essa taxa é diminuída por β_d (vide inequação ??).

Fator 5 Minimização no uso de tanques para a realização de operações pulmão e Estoque Intermediário. Estas operações devem ser minimizadas, pois a utilização de tanques intermediários acarreta custo operacional. Dessa forma, a variável binária $tanq$ deve ser minimizada, viabilizando essas operações, quando necessárias.

Os fatores apresentados para a função objetivo (40) são penalizados de forma distinta, pois os valores não estão dimensionados. Dessa forma, os pesos (M) são dados às violações nos estoques de acordo com sua importância: por exemplo, violações no estoque mínimo e capacidade devem ser evitadas majoritariamente e são penalizadas por M . Já as violações no estoque meta têm menor importância. Dessa forma, o parâmetro M é dividido por 10.

$$\begin{aligned}
& \text{minimizar} \quad \underbrace{\sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} \sum_{p \in P} \sum_{r \in RFX} \left(Q_{n,n',p,r} \cdot \frac{vr_r}{vb_{r,p}^{med}} \right)}_{\text{Fator 1}} \\
& + M \cdot \underbrace{\left(\sum_{n \in N} \sum_{p \in P} VCP_{n,p} + \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} VID_{n,p}^{min} \right) + \frac{M}{5} \cdot \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} VID_{n,p}^{max} + \frac{M}{10} \cdot \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} VID_{n,p}^{meta}}_{\text{Fator 2}} \quad (40) \\
& + \underbrace{\frac{M}{2} \cdot \sum_{r \in RFX} \sum_{r' \in RFX} \sum_{d \in D} rev_{r,r',d}}_{\text{Fator 3}} + \underbrace{\frac{M}{2} \cdot \sum_{d \in D} vari_d}_{\text{Fator 4}} + \underbrace{M \cdot \sum_{r \in RFX} \sum_{r' \in RFX} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} tanq_{r,r',n,p}}_{\text{Fator 5}}
\end{aligned}$$

5.5 RESTRIÇÕES

Todas as restrições físicas e operacionais foram modeladas considerando-se volumes variáveis. A restrição 41 estabelece que a quantidade de produto p a ser enviada a partir do nó n ($Q_{n,n',p,r}$) deve ser menor que a disponibilidade no órgão ($disp_{n,p}$) somada à quantidade de produto recebida na área n ($Q_{n',n,p,r}$).

$$\sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} Q_{n,n',p,r} \leq disp_{n,p} + \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} Q_{n',n,p,r} \quad \forall n \in N, p \in P \quad (41)$$

Em contrapartida, a quantidade a ser recebida deve suprir a demanda na área n' . Porém, como a área n' já contém um estoque inicial, outras restrições farão com que o estoque na área de destino permaneça dentro do estoque meta e dentro dos limites mínimos e máximos de estocagem, como apresentado na restrição 57.

Se houver envio de produto p da área n para a área n' através da rota r , a variável binária $bin_{n,n',p,r}$ deve ser igual a um. Caso contrário, $bin_{n,n',p,r}$ assumirá o valor zero. Além disso, uma quantidade mínima de envio pode ser previamente atribuída a $lots_p^{min}$, obrigando que, caso haja envio de produto, essa quantidade enviada não seja operacionalmente muito pequena (restrições 42 e 43). Quantidades muito pequenas de envio de produtos são indesejáveis, visto que, neste caso, um percentual significativo da quantidade enviada pode ser contaminado por interfaces com outros produtos no interior dos dutos.

$$Q_{n,n',p,r} \leq M \cdot bin_{n,n',p,r} \quad \forall \{n, n'\} \in N, p \in P, r \in RFX \quad (42)$$

$$Q_{n,n',p,r} \geq -M \cdot (1 - bin_{n,n',p,r}) + lots_p^{min} \cdot bin_{n,n',p,r} \quad \forall \{n, n'\} \in N, p \in P, r \in RFX \quad (43)$$

Se houver envio do produto p da área n para n' , não deve haver envio do mesmo produto da área n' para a área n . Essa limitação é satisfeita pela inequação 44.

$$Q_{n',n,p,r'} \leq M \cdot (1 - bin_{n,n',p,r}) \quad \forall \{n, n'\} \in N, p \in P, \{r, r'\} \in RFX \quad (44)$$

A taxa de utilização do duto d é determinada pela soma dos volumes das bateladas que o utilizam, dividida pela vazão média (equação 45 - lado esquerdo). Essa utilização deve ser idealmente menor que γ (%), parâmetro do horizonte de planejamento. Caso o duto seja utilizado em ambos os sentidos ($rev_{r',d} = 1$), a reversão de fluxo ocorrerá. Dessa forma a taxa de utilização deve ser inferior a $\gamma - \beta$. Caso esse limite seja violado, a variável de relaxação $vari_d$ assumirá um valor positivo e será penalizada na função objetivo.

$$\sum_{\substack{r \in RFX \\ (r,d) \in RDut}} \sum_{p \in P} \frac{\sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} Q_{n,n',p,r}}{vb_{r,p}^{med}} \leq H \cdot (\gamma_d + vari_d) - H \cdot \beta_d \cdot \sum_{r \in RFX} \sum_{r' \in RFX} rev_{r,r',d} \quad \forall d \in D \quad (45)$$

Além disso, a restrição 46 indica que a variável de relaxação $vari_d$ deve assumir valores inferiores a $1 - \gamma_d$.

$$vari_d \leq 1 - \gamma_d \quad \forall d \in D \quad (46)$$

Se duas rotas distintas r e r' utilizam o mesmo duto d em sentidos contrários, a variável binária $rev_{r,r',d}$ deve assumir o valor 1 (restrições 47 a 49).

$$bin_{n,n',p,r} + bin_{m,m',p',r'} \leq 1 + rev_{r,r',d} \quad \forall \{n,n',m,m'\} \in N, \{p,p'\} \in P, (r,r',d) \in RD \quad (47)$$

$$rev_{r,r',d} \leq \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} \sum_{p \in P} bin_{n,n',p,r} \quad \forall (r,r',d) \in RD \quad (48)$$

$$rev_{r,r',d} \leq \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} \sum_{p \in P} bin_{n,n',p,r'} \quad \forall (r,r',d) \in RD \quad (49)$$

Dois rotas distintas r e r' não podem utilizar o mesmo duto em ambos os sentidos, para o transporte do mesmo produto p (restrição 50).

$$bin_{n,n',p,r} + bin_{m,m',p,r'} \leq 1 \quad \forall \{n,n',m,m'\} \in N, p \in P, (r,r',d) \in RD \quad (50)$$

As operações de estoque intermediário e pulmão envolvem o envio de um produto p de uma origem n para um órgão de destino intermediário n' e, posteriormente, o envio de p de n' para um órgão de destino final n'' . Estas operações só podem ser realizadas se o órgão intermediário n' possuir tanques para alocar o produto p (restrição 51).

$$bin_{n,n',p,r} + bin_{n',n'',p,r'} \leq 1 + tanq_{r,r',n',p} \quad \forall \{n,n',n''\} \in N, \{r,r'\} \in RFX, (p,n') \in \overline{PLM} \quad (51)$$

Quando a capacidade dos tanques de uma área n , onde pode ocorrer a operação pulmão para o produto p é muito pequena, não é recomendado realizar o estoque intermediário. Dessa forma, todo volume recebido naquela área por uma rota r , deve ser enviado para outra área pela rota r' (equação 52).

$$\sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} Q_{n',n,p,r} = \sum_{n' \in N} \sum_{r' \in RFX} Q_{n,n',p,r'} \quad \forall (p,n) \in PLM | CP_{n,p} < Tmin \quad (52)$$

O balanço dos volumes enviados, recebidos, produzidos e consumidos do produto p na área n deve respeitar o limite mínimo de inventário (inequação 53). Caso isto não seja possível, a variável de relaxação $VID_{n,p}^{min}$ assumirá um valor positivo e será penalizada na função objetivo.

$$\sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} Q_{n',n,p,r} - \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} Q_{n,n',p,r} + disp_{n,p} - flt_{n,p} + VID_{n,p}^{min} \geq ID_{n,p}^{min} \quad (53)$$

$$\forall n \in N, p \in P$$

Assim como a restrição 53 satisfaz os limites mínimos de inventário, o balanço dos volumes enviados, recebidos, produzidos e consumidos do produto p na área n deve respeitar o limite máximo de inventário (restrição 54). Caso esta condição não seja possível, a variável de relaxação $VID_{n,p}^{max}$ assumirá um valor positivo e será penalizada na função objetivo.

$$\sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} Q_{n',n,p,r} - \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} Q_{n,n',p,r} + disp_{n,p} - flt_{n,p} - VID_{n,p}^{max} \leq ID_{n,p}^{max} \quad (54)$$

$$\forall n \in N, p \in P$$

Caso o estoque máximo não seja satisfeito, é desejável que o estoque seja menor que a capacidade disponível para o produto a ser recebido ou enviado. A restrição 55 limita o estoque em função da capacidade. A variável de relaxação $VCP_{n,p}$ é minimizada na função objetivo.

$$\sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} Q_{n',n,p,r} - \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} Q_{n,n',p,r} + disp_{n,p} - flt_{n,p} - VCP_{n,p} \leq CP_{n,p} \quad (55)$$

$$\forall n \in N, p \in P$$

Além da satisfação dos limites mínimos, máximos e capacidade de estocagem, é desejável que a solução satisfaça os limites de estoque meta. Para os órgãos produtores ($disp_{n,p} \neq 0$) é desejável que o estoque atinja um valor abaixo do estoque meta, conforme limitado pela ine-

quação 56.

$$\sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} Q_{n',n,p,r} - \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} Q_{n,n',p,r} + disp_{n,p} - VID_{n,p}^{meta} \leq ID_{n,p}^{meta} \quad (56)$$

$$\forall n \in N, p \in P | disp_{n,p} \neq 0$$

Para os órgãos consumidores ($flt_{n,p} \neq 0$), é desejável que o estoque permaneça acima do estoque meta. A inequação 57 restringe o estoque em relação à meta. Violações no estoque meta são atribuídas à variável $VID_{n,p}^{meta}$ e minimizada na função objetivo.

$$\sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} Q_{n',n,p,r} - \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} Q_{n,n',p,r} - flt_{n,p} + VID_{n,p}^{meta} \geq ID_{n,p}^{meta} \quad (57)$$

$$\forall n \in N, p \in P | flt_{n,p} \neq 0$$

As variáveis de violação inseridas nas restrições 53 a 57 são necessárias porque nem sempre é possível satisfazer os limites de estocagem impostos pela companhia. Como há a possibilidade de troca de serviço dos tanques e degradação de produtos em casos reais, não ocorre a falta de tancagem. Essas duas considerações não foram implementadas e a inserção das variáveis de violação são necessárias para evitar inviabilidades do modelo. Essas violações podem, portanto, indicar quando deve ocorrer a troca de serviço dos tanques ou degradação de produtos.

Desta forma, foi elaborado um modelo de planejamento de uma rede de dutos através das expressões 40 a 57. O modelo utiliza basicamente variáveis contínuas e binárias, interligadas através de restrições lineares, estruturado como um modelo de programação linear inteira mista (PLIM). Os critérios e hipóteses de modelagem seguem as condições operacionais propostas na seção 5.2. A seguir serão apresentados alguns resultados obtidos através da implementação do modelo matemático proposto.

5.6 RESULTADOS OBTIDOS

O modelo foi aplicado na rede de dutos apresentada no capítulo 4. Os dados utilizados, comum em todos os cenários, são apresentados na tabela 11. Além dos dados apresentados na tabela, tem-se:

- Horizonte de planejamento: $H = 720h$;
- Constante suficientemente grande: $M = 100.000.000$;

- Constante suficientemente pequena: $eps = 0,01$;
- Tamanho mínimo para realização de estocagem intermediária: $Tmin = 7.000uv$;
- Quantidade mínima de produto a ser enviado: $lots_p^{min} = 0 uv, \quad \forall p \in P$.

Tabela 11 – Parâmetros γ e β

Duto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
γ	0,9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
β	0,3	1	0,1	1	1	0,5	1	1	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Duto	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
γ	0	1	1	0,9	1	1	1	1	1	1	0,8	1	1	1	1
β	0	0,3	1	0,9	0,1	0,2	0,15	0,5	0,15	1	0,5	1	1	0,5	0,5

Os parâmetros apresentados foram obtidos heurísticamente após vários testes realizados, e foram escolhidos buscando-se obter a melhor solução final quando utilizados todos os modelos apresentados na tese e heurísticas auxiliares. Em alguns dutos, o parâmetro $\beta = 1$. Isto indica que, neste duto, não é desejável realizar procedimentos de reversão. O parâmetro $\gamma < 1$ quando não é desejável que o duto seja 100% utilizado durante o horizonte proposto. No caso em que $\beta = \gamma = 0$, indica que não é desejável a utilização do duto 16, pois a vazão neste duto é muito baixa. Além disso, é conhecido *a priori* que outros dutos são capazes de realizar o transporte de produtos que eventualmente passariam por ele.

Considerando o modelo apresentado no presente capítulo, pode-se visualizar através da tabela 12 as dimensões do modelo PLIM resultante, para oito cenários distintos (C1 a C8), todos considerando o horizonte de planejamento de 1 mês. Os dados de produção, consumo e limites de tancagem variam de acordo com o cenário estudado. Os rótulos apresentados na tabela 12 são os mesmos apresentados pela tabela 3 (página 71). Para a obtenção dos resultados, utilizou-se o *software* ILOG OPL Studio 6.3, CPLEX 12 em um computador Intel Core 2 Duo 6400, 2.13 GHz, 3GB RAM.

Tabela 12 – Resultados computacionais do Modelo de Planejamento

Cenário	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
<i>Status</i>	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo
Tempo (s)	2,900	2,221	2,189	2,143	2,196	2,350	2,327	2,239
F. Objetivo	1,478E13	2,746E12	4,665E12	4,951E8	1,901E13	5,892E11	1,771E12	7,412E12
Iterações	272	278	435	717	417	681	408	442
Variáveis	1303	1256	1247	1348	1356	1357	1232	1335
Var. Int.	588	541	539	633	635	631	532	626
Restrições	2106	2057	2051	2310	2354	2528	2056	2339

Por meio da tabela 12, é possível perceber que todos os cenários apresentam soluções ótimas para o modelo de planejamento PLIM, as quais são encontradas em menos de três segundos. O baixo número de variáveis e restrições apresentados na tabela é resultado do uso

de estruturas esparsas para a geração dos índices das variáveis de decisão do modelo. Parte do tempo computacional apresentado na tabela é utilizado para a criação dessas estruturas. Os cálculos são realizados dentro do *solver* em uma etapa preliminar ao modelo PLIM de planejamento, conforme apresentado no Apêndice B (página 223).

A tabela 13 apresenta os resultados gerais de cada um dos oito cenários utilizados. Através desses resultados é possível comparar quais são os dutos que serão utilizados em ambos os sentidos. A quantidade de violações (entre parênteses) e volume total violado para os estoques mínimo, máximo e limite de capacidade. Os valores são apresentados em unidades volumétricas (uv). É possível ainda visualizar quais dutos são menos utilizados e mais utilizados em cada cenário: utilização% (número do duto). As áreas/produtos onde ocorrerão operação pulmão ou estoque intermediário são também apresentadas.

Tabela 13 – Resultados gerais do Modelo de Planejamento

Cenário	C1	C2	C3	C4
Volume total movimentado (uv)	2180599,03	2014910,10	2278358,95	2137422,13
Dutos com reversões	3,20,24	3,22,24	3,22,24	3,22,24
Violação estoque min (uv)	(2) 11700	(1) 13841	(2) 43552	-
Violação estoque max (uv)	(5) 127906	(3) 6788	-	-
Violação capacidade (uv)	(2) 104408	(2) 5707	-	-
Duto menos utilizado*	0% (9,21)	0% (9,27)	0% (27)	0% (9,27)
Duto mais utilizado	77% (25)	80% (25)	88% (25)	70% (12)
Órgão/produto com pulmão	N9/31,N12/31	N9/31	N9/(21,31),N12/31	N9/31,N12/31
Cenário	C5	C6	C7	C8
Volume total movimentado (uv)	1992999,10	2197381,11	2126734,15	2267052,12
Dutos com reversões	3,22,24	3,20,22,24	3,20,22	3,20,22,24
Violação estoque min	(2) 84312	(1) 3148	-	(2) 1678
Violação estoque max	(1) 75473	-	(1) 15481	(2) 68293
Violação capacidade	(1) 73643	-	(1) 10925	(1) 56665
Duto menos utilizado*	0% (27)	2,1% (9)	0,1% (26)	0,1% (26)
Duto mais utilizado	72% (12)	83% (19)	81% (19)	78% (17)
Órgão/produto com pulmão	N9/31,N12/31	N9/31,N12/31	N4/35,N9/31	N4/35,(N9,N12)/31

* exceto duto 16

Não foi possível realizar comparações entre os resultados do modelo de planejamento PLIM e o planejamento real realizado pela PETROBRAS. O planejamento da quantidade de produto movimentado pela companhia é realizado no início de cada mês. Em contrapartida, a data de início dos cenários estudados não coincidem com o início dos meses. Além disso, o planejamento proposto não contempla degradação de produtos e troca de serviço de tanques (objeto de trabalhos futuros), o que é feito frequentemente pelos programadores da companhia. Porém, nos resultados finais (capítulo 9), será apresentada uma comparação entre a utilização sugerida pelo modelo de planejamento, para cada duto, e a utilização final do *scheduling* proposto.

O gráfico da figura 19 indica a soma do volume total movimentado para os oito cenários apresentados. Note que a escala do eixo das ordenadas varia entre 1.850 e 2.300 mil

uv. O volume total movimentado em todos os cenários estudados varia entre 1.990 e 2.280 mil uv. Os cenários foram escolhidos considerando-se meses distintos ao longo de um ano, e são numerados em ordem cronológica. Observando o gráfico, não é possível perceber um padrão de comportamento claro entre um cenário e outro. A variação máxima de volume movimentado comparando-se C3 e C5 foi de, aproximadamente, 12,5%. Em particular, no cenário C3 um volume superior de produtos é movimentado, em relação aos demais cenários. Neste cenário, conforme tabela 14, 12 produtos foram movimentados (6, 10, 14, 18, 20, 21, 25, 26, 27, 31, 34 e 35), a partir de 9 origens (N3, N4, N5, N6, N7, N8, N9, N10 e N12), para 11 destinos (N2, N4, N5, N6, N7, N9, N10, N11, N12, N13 e N14).

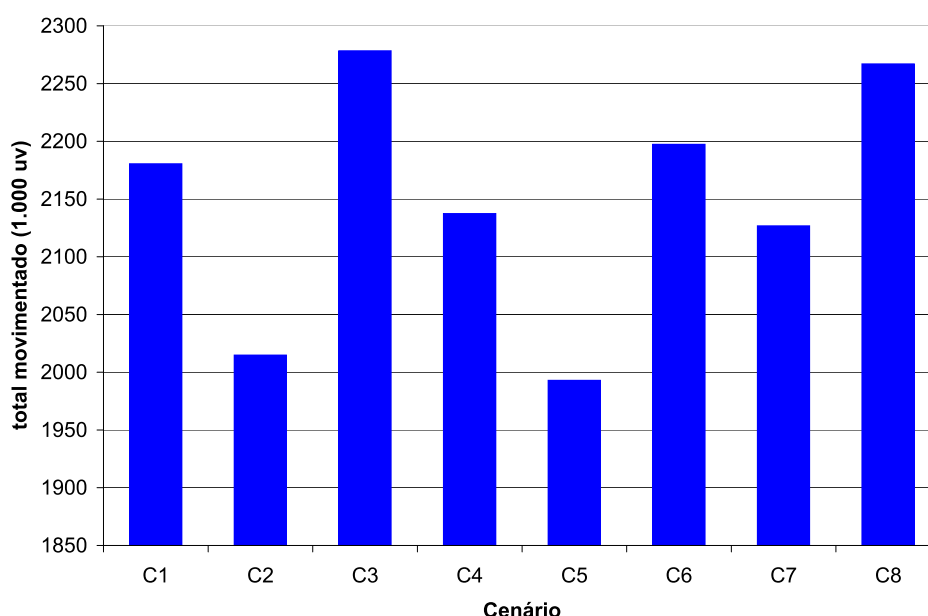


Figura 19 – Volume mensal total movimentado por cenário

Avaliando-se a figura 19 e a tabela 13 pode-se perceber que a quantidade violada não é comparável à quantidade de volume movimentada. Para o cenário C4 não há violações de estoques, enquanto no cenário C5, apesar de movimentar uma quantidade inferior, há violações em todos os limites. Os cenários apresentados nas tabelas 12 e 13 serão os mesmos utilizados nos próximos capítulos da tese para a apresentação dos resultados dos modelos de alocação/sequenciamento e temporização.

As taxas de utilização dos dutos, resultante do modelo de planejamento, não correspondem exatamente à taxa de utilização final, quando todos os passos para a obtenção da solução são realizados. Isso acontece porque, além da geração de bateladas utilizando os volumes sugeridos pelo modelo PLIM de planejamento, é necessário inserir bateladas adicionais. Essas bateladas podem ser bateladas auxiliares de reversão, bateladas de selo, ou ainda bateladas que

deslocam os “últimos produtos” bombeados em alguns dutos. Isto deve ser realizado para que esses “últimos produtos” sejam completamente entregues nos órgãos de destino. Esses volumes adicionais somente são sugeridos após o final do módulo de alocação e sequenciamento¹.

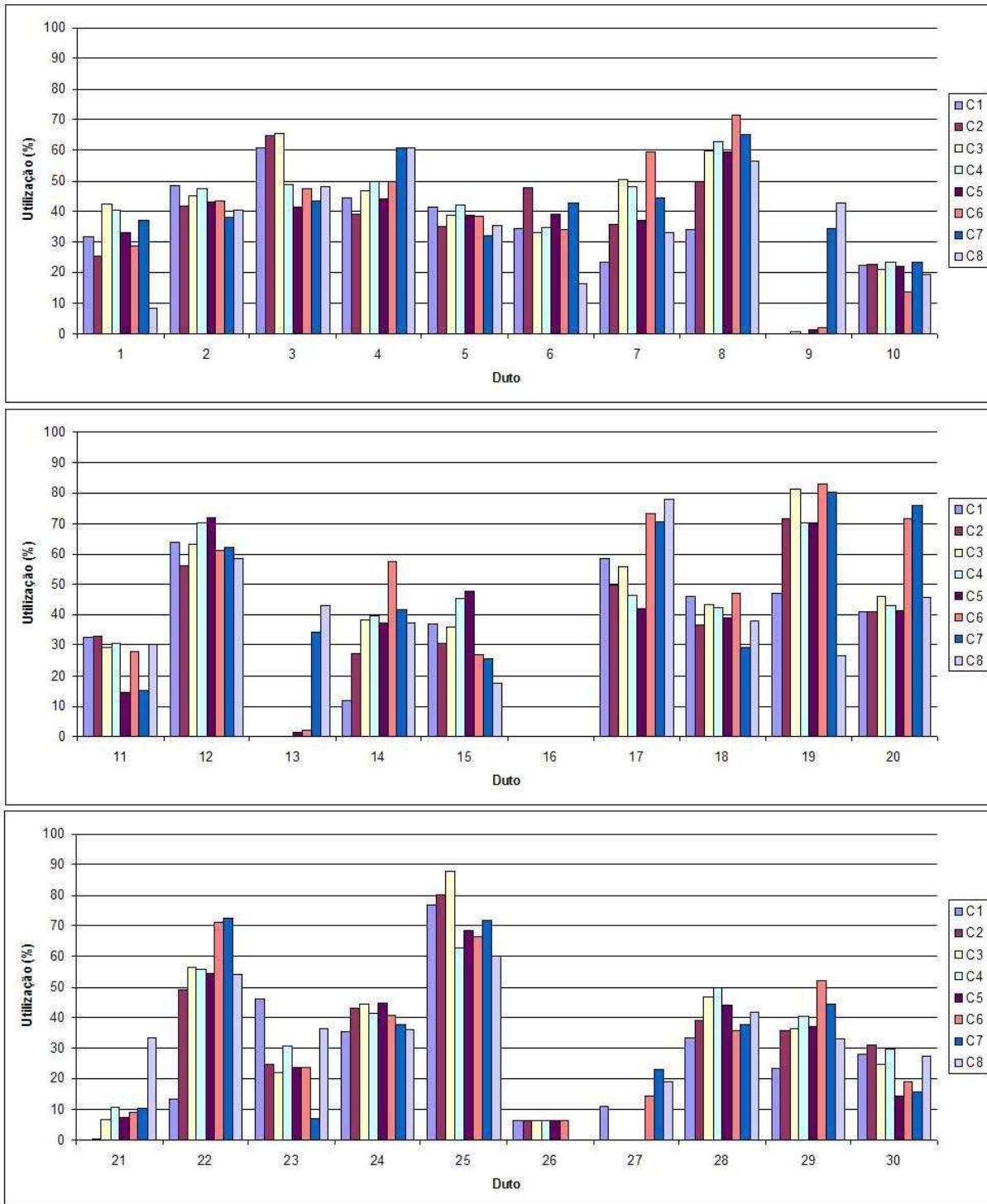


Figura 20 – Utilização dos dutos para todos os cenários

¹Detalhes adicionais acerca das taxas finais de utilização dos dutos são apresentados no capítulo 9, por exemplo, figura 58 (página 195).

É possível visualizar através da figura 20, a porcentagem de utilização de cada duto para todos os cenários estudados, como resposta do modelo de planejamento PLIM. Conforme explanado, há mudanças nessas taxas com inserção de bateladas adicionais. De maneira preliminar, é possível notar através do gráfico que os dutos 12, 22 e 25 possuem utilização maior que 50% para todos os cenários. Com a inserção de bateladas auxiliares, essa taxa tende a aumentar quando obtida a solução final do *scheduling* da rede. Isso indica que esses dutos são possíveis gargalos do sistema. Em contrapartida, os dutos 9 e 26, além do 16, são muito pouco utilizados. A pouca utilização também é indesejável, pois os produtos enviados para dutos poucos utilizados poderão permanecer dentro do duto por muitas horas (ou mesmo dias).

A tabela 14 detalha o resultado principal do modelo de planejamento para o cenário C3. São apresentados os volumes (em unidades volumétrica) por produto e as rotas em que esses volumes deverão ser movimentados durante todo o horizonte. Os dados de limites de inventário, disponibilidade e demanda de produtos utilizados para a obtenção dessa solução, são apresentados no Anexo A (página 243).

Através da tabela 14 é possível perceber que, dois ou mais produtos distintos podem ser movimentados utilizando uma mesma rota. As áreas de origem e destino são o primeiro e último elementos da rota, respectivamente. Os produtos 21 e 31 são os que mais rotas distintas utilizam (sete e seis rotas, respectivamente). Este fato indica que é preciso retirá-los de várias origens distintas para o atendimento em todos os pontos de demanda, de modo que alguns dutos não fiquem sobrecarregados. Os produtos 6, 10, 26 e 35 utilizam apenas uma rota para o atendimento da demanda, ou seja, todo volume mensal requerido pode ser retirado de uma única área (refinaria). Porém, isso não indica que haverá apenas uma movimentação daquele produto no mês, pois esses volumes poderão (e na maioria das vezes serão) divididos em cotas menores (bateladas). O número de bateladas, os produtos a elas alocados e a sequências de envio são determinados nos capítulos seguintes, através da alocação de recursos (PLIM ou heurística).

Tabela 14 – Volume (uv) movimentado por produto e rota - Cenário C3

Rota	6	10	14	18	20	21	25	26	27	31	34	35
	Produto											
N3→11→N9→30→N10					8567	141771						
N3→12→N9										166275		
N3→11→N9						1107						
N3→11→N9→17→N12→18→N14				13878								
N3→10→N9→8→N5		34091	20492									
N3→12→N9→15→N10							116855			78124		
N5→7→N12→19→N13						35057						
N5→6→N12						71431						
N4→23→N13						25244			14443			30694
N4→22→N13												
N4→1→N8→28→N1→4→N11										45967		
N4→1→N8→2→N11→5→N12→18→N14				84176								
N4→1→N8→24→N6		19465								9684		
N6→24→N8→28→N1→4→N11							163320					
N6→25→N8→2→N11					50678							
N6→25→N8→2→N11→5→N12→18→N14				133380								
N6→25→N8→3→N7					176694						297998	
N9→9→N12						1107						
N9→17→N12										166357		
N10→14→N9→8→N5			5377									
N10→14→N9→8→N5→7→N12→29→N2			105074									
N7→3→N8→21→N4							8319					
N12→19→N13										76519		
N8→21→N4											41907	
N8→26→N6									18221			
N5→20→N12→19→N13→22→N4											115762	

5.7 CONCLUSÕES

No presente capítulo detalha-se o modelo de Planejamento PLIM, o qual determina o volume mensal e as rotas a serem utilizadas no transporte dos produtos, dentro de um horizonte pré-determinado (30 dias). O modelo matemático apresentado sugere uma forma otimizada para as movimentações dos produtos dentro da rede de dutos. A determinação dos volumes dos produtos a serem movimentados, dentro do horizonte de planejamento, é realizada considerando o tempo médio que o produto levará para se deslocar na rede entre a sua área de origem até o seu destino, os dutos que serão utilizados para realizar esses movimentos, além da minimização do uso dos dutos em ambos os sentidos (reversões de fluxo).

Os resultados indicam que o modelo de Planejamento PLIM obtém soluções computacionais ótimas em poucos segundos para cenários reais da rede de dutos em estudo. A partir dos resultados, pode-se perceber que os limites de estoque, em geral, apresentam pequenas violações. Variáveis de relaxação para esses limites foram acrescentadas para viabilizar a obtenção de uma solução, quando não é possível o atendimento a estes limites. Na maioria dos casos onde há escassez ou excesso de produtos, é procedimento operacional da companhia degradar um produto mais nobre para o atendimento da demanda de um produto menos nobre. Além disso, é possível que tanques operem com troca de serviço, ou seja, hora armazenam um produto, ora armazenam outro produto, geralmente do mesmo grupo. Ambas as condições não são modeladas na presente tese e podem ser objetos de estudos futuros. A utilização dos dutos é feita de modo que, se um duto apresentar uma taxa de utilização maior que a desejada, essa violação é também penalizada na função objetivo. Como objeto de trabalhos futuros, ressalta-se que o modelo de planejamento pode apresentar uma solução otimizada em função de custos monetários a serem incorporados na função de avaliação.

6 ALOCAÇÃO E SEQUENCIAMENTO PLIM

6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como principal objetivo adaptar o modelo VBS proposto na seção 3.6 para a rede de dutos apresentada no Capítulo 4. Como já mencionado, o problema de sequenciamento de bateladas tem um grande impacto na tomada de decisão em formulações PLIM, também tendo um grande impacto no tempo computacional para resolver esse problema combinatorial. Se alguns parâmetros são previamente determinados, o modelo pode ter uma menor dificuldade combinatorial, considerando a redução no número de variáveis a serem determinadas. Portanto, a formulação do modelo de alocação de recursos e sequenciamento proposta busca fornecer uma solução para o problema da rede de dutos utilizando métodos exatos. Os benefícios e limitações dessa abordagem serão aqui explorados.

6.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS

O modelo de alocação e sequenciamento aqui proposto utiliza técnicas de programação linear inteira mista (PLIM). As considerações gerais utilizadas para formular o modelo são enumeradas a seguir:

1. Os tanques são considerados de forma agregada por área e produto. Os níveis de inventário, dentro dos limites operacionais, podem ser incrementados ou decrementados. Isto ocorre de acordo com o volume de cada produto recebido, enviado, ou devido às taxas de produção do órgão e consumo local (mercado consumidor local).
2. Toda produção, demanda e limites de tancagem para cada produto e área são determinados previamente.
3. Os montantes mensais a serem transferidos entre uma área de origem e uma área de destino são determinados pelo Modelo de Planejamento PLIM (Capítulo 5).

4. As rotas e dutos utilizados para a movimentação dos produtos são determinados pelo Modelo de Planejamento PLIM (Capítulo 5).
5. Os dutos devem ser utilizados dentro do horizonte previamente determinado e devem realizar o transporte das bateladas.
6. Para implementar a reversão de fluxo, um conjunto de bateladas é bombeado em uma direção. Após, é necessário inserir uma batelada auxiliar com o mesmo volume do duto considerado para empurrar as bateladas que preenchem o duto. A direção de bombeio pode, então, ser revertida e os produtos podem ser bombeados na direção inversa. As bateladas auxiliares devem ser especificadas posteriormente, após a geração das bateladas e da determinação da sequência em que elas serão enviadas. Essa tarefa é realizada pelo modelo de alocação e sequenciamento PLIM.
7. Uma batelada pode ser recebida em um tanque e ser simultaneamente bombeada desse tanque para outro duto (operação pulmão). Para considerar a operação de pulmão, a rota da batelada é dividida em duas ou mais¹ rotas. A primeira rota contém a área de origem até a área intermediária em que existe o tanque que será utilizado para a operação pulmão. A última rota contém a área intermediária até a área de destino final. Dessa forma, a sequência das bateladas deve ser construída de maneira que o balanço de massa dos produtos na área de pulmão, bem como os limites de inventário sejam satisfeitos.
8. Todas as bateladas previamente armazenadas nos dutos no início do horizonte de planejamento (bateladas em trânsito) são adicionadas ao estoque do seu destino pré-determinado.
9. Restrições de bombeio/recebimento, por questões de custo elétrico e troca de turno dos operadores, são tratados no escopo de *scheduling* (Capítulo 8).
10. As restrições locais são consideradas *a posteriori*, sendo satisfeitas durante o horizonte de *scheduling* (Capítulo 8).

Após apresentadas as principais considerações a serem observadas pelo modelo de alocação e sequenciamento, de maneira simplificada, devemos ter como entrada deste modelo os seguintes parâmetros:

- Horizonte de tempo;
- Produtos a serem transportados;

¹No caso de existirem operações pulmão sucessivas.

- Áreas operacionais;
- Tempo médio de deslocamento na rota;
- Áreas onde ocorrem a operação pulmão;
- Produção por produto e área;
- Demanda por produto e área;
- Estoque inicial nos dutos;
- Limites de estocagem por produto e área;
- Inventário inicial nos tanques por produto e área;
- Listas de rotas;
- Trechos de duto inicial (saindo da origem) e final (chegando no destino);
- Limites de vazão por produto e duto;
- Tamanho de lotes mínimo e máximo de transporte das bateladas por produto;
- Quantidade mensal por produto a ser transportada entre uma área de origem até uma área de destino por uma determinada rota.

O modelo de alocação e sequenciamento PLIM, como o próprio nome já diz, define o volume das bateladas a serem movimentadas para todos os produtos, conforme os volumes e rotas sugeridas pelo modelo de Planejamento PLIM². Além disso, o modelo determina a melhor sequência de envio dessas bateladas, de modo que o inventário seja satisfeito. A satisfação do inventário é feita através de cálculo do tempo médio das movimentações evitando que bateladas distintas sejam movimentadas simultaneamente em um duto de origem, ou sejam recebidas simultaneamente em um duto adjacente à área de destino. Além disso, o menor estoque de cada produto para as áreas de destino é maximizado.

Ressalta-se que, conforme a figura 17 (página 89), o modelo de alocação PLIM está inserido em uma abordagem hierarquizada de solução (figura 21). Aspectos temporais e demais restrições (ex.: restrições locais) são tratadas nos módulos subsequentes do sistema.

Na formulação do modelo de alocação e sequenciamento PLIM, utilizou-se representação contínua tanto em termos de volume quanto tempo. Os volumes dos produtos a serem

²Aqui, o termo “alocação” está associado à definição do volume das bateladas para cada produto.

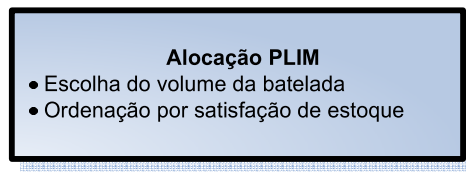


Figura 21 – Modelo de alocação e sequenciamento PLIM

enviados são escolhidos dentro de limites mínimo e máximo de lotes. O nível de inventário é considerado durante todo o horizonte de tempo, com a finalidade de obter a melhor sequência a ser bombeada, respeitando a capacidade de estocagem. Dessa maneira, são calculados os tempos de bombeio e recebimento de uma batelada de um dado produto e o inventário desse produto é atualizado no intervalo de tempo correspondente.

6.3 NOTAÇÃO

A notação adotada para a formulação do modelo matemático é indispensável para o entendimento do modelo e é apresentada no Apêndice C (página 227). Notações apresentadas em apêndices prévios podem eventualmente ser utilizadas nesse capítulo. Os volumes são representados por unidades de volume genéricas (uv).

Como definido no capítulo 3, as bateladas que são identificadas como bateladas fictícias, isto é, as quais assumem o valor zero, indicam que nenhum produto p deve ser bombeado a partir da área de origem n , com destino à área n' utilizando a rota r , ou seja; nenhuma combinação da tupla (p, n, n', r) é alocada à batelada b . Essas bateladas são geradas por não ser possível identificar *a priori* o número exato de bateladas necessárias a ser enviado durante o horizonte de planejamento. O número máximo de bateladas foi escolhido de forma heurística.

6.4 FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo (expressão 58) envolve os seguintes fatores:

Fator 1 Minimização da variação do volume total enviado em relação ao volume total sugerido pelo modelo PLIM de Planejamento (*dif*).

Fator 2 Penalização da solução em relação às violações na satisfação dos limites mínimos e máximos de estoque nas áreas de origem e destino ($ao_{b,p,n}$, $do_{b,p,n}$, $ad_{b,p,n}$ e $dd_{b,p,n}$). Idealmente, a partir dos valores estabelecidos para $ID_{p,n}^{min}$ e $ID_{p,n}^{max}$, violações de tancagem e de demanda não deveriam ocorrer. Contudo, dependendo dos parâmetros de entrada, há

necessidade de que violações sejam aceitas para diagnóstico de problemas do sistema. Assim, parte da função objetivo é penalizada por um parâmetro α , que faz com que violações sejam evitadas majoritariamente.

Fator 3 Minimização do número de bateladas geradas. Minimizando na função objetivo a variável binária ls , o número de bateladas é gerado e sequenciado evitando que produtos iguais com a mesma rota permaneçam juntos na sequência, além de evitar a geração de bateladas com volumes muito pequenos.

Fator 4 Maximização do estoque mínimo nos órgãos de destino. A variável $mind$ assume o valor do menor nível de estoque durante o horizonte temporal para cada área de destino e produtos. Então, essa variável é maximizada na função objetivo e ponderada por um fator μ para que o menor estoque no destino seja o maior possível, dentro dos limites de estocagem.

Os fatores apresentados para a função objetivo (58) são penalizados de forma distinta, pois os valores não estão dimensionados. Dessa forma, pesos maiores são dados às violações nos estoques que devem ser evitadas majoritariamente. Os pesos definidos para os parâmetros α e μ são definidos na seção 6.6.

$$\begin{aligned}
& \text{minimizar} \\
& \underbrace{\sum_{p \in P} \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} (dif_{p,n,n',r}^+ + dif_{p,n,n',r}^-)}_{\text{Fator 1}} \\
& + \underbrace{\alpha \cdot \sum_{b \in B} \sum_{p \in P} \sum_{n \in N} (ao_{b,p,n} + do_{b,p,n}) + \alpha \cdot \sum_{b \in B} \sum_{p \in P} \sum_{n \in N} (ad_{b,p,n} + dd_{b,p,n})}_{\text{Fator 2}} \quad (58) \\
& + \underbrace{\sum_{b \in B} \sum_{p \in P} \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} ls_{b,p,n,n',r}}_{\text{Fator 3}} - \underbrace{\mu \cdot \sum_{p \in P} \sum_{n \in N} mind_{p,n}}_{\text{Fator 4}}
\end{aligned}$$

6.5 RESTRIÇÕES

6.5.1 Restrições de balanço de massa

Todas as restrições físicas e operacionais foram modeladas considerando tamanho de lotes variáveis. A restrição 59 estabelece que a soma de todo o volume das bateladas b do produto p a serem enviadas do nó n até o nó n' deve ser igual ao volume sugerido pelo modelo

de planejamento PLIM. As variáveis dif^+ e dif^- assumem valores não negativos e correspondem à variação (para mais e para menos, respectivamente) em relação à quantidade de volume movimentada.

$$\sum_{b \in B} W_{b,p,n,n',r} + dif_{p,n,n',r}^+ - dif_{p,n,n',r}^- = Q_{n,n',p,r} \quad (59)$$

$$\forall p \in P, n \in N, n' \in N, r \in RFX$$

O volume de cada batelada deve permanecer entre os limites mínimos e máximos de lotes, como indicado na equação 60. Se a batelada b é uma batelada fictícia, o volume deve ser igual a zero.

$$lots_p^{min} \cdot ls_{b,p,n,n',r} \leq W_{b,p,n,n',r} \leq lots_p^{max} \cdot ls_{b,p,n,n',r} \quad (60)$$

$$\forall b \in B, p \in P, n \in N, n' \in N, r \in RFX$$

6.5.2 Restrições de sequenciamento

Para cada batelada, pode ser alocado somente um produto p a ser enviado da área n para a área n' pela rota r (restrição 61). Se a batelada não for utilizada (batelada fictícia), $ls = 0$ e nenhum volume é a ela alocado.

$$\sum_{p \in P} \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} ls_{b,p,n,n',r} \leq 1 \quad \forall b \in B \quad (61)$$

As bateladas fictícias são forçadas a permanecer no final da lista de bateladas (inequação 62).

$$\sum_{p \in P} \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} ls_{b,p,n,n',r} \leq \sum_{p \in P} \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} ls_{b-1,p,n,n',r} \quad \forall b \in B, b > 1 \quad (62)$$

6.5.3 Restrições de inventário

Como a demanda e a produção da rede de dutos é considerada de forma contínua, o cálculo do inventário é realizado através da utilização de eventos. Dessa forma, o índice temporal é suprimido e o índice b da batelada é considerado com sendo um evento para o

cálculo do estoque. Ou seja, durante o bombeio/recebimento da batelada b o estoque na área de origem/destino é atualizado. As restrições de inventário são divididas em dois grupos:

- Restrições nas áreas de origem: o estoque é calculado nas áreas de origem em função do tempo de bombeio das bateladas;
- Restrições nas áreas de destino: o estoque é calculado nas áreas de destino em função do tempo de recebimento das bateladas.

O inventário nas áreas de origem para o primeiro evento (batelada) deve ser igual ao inventário inicial, mais a quantidade disponível (quantidade produzida subtraída da demanda local) durante o tempo de bombeio da primeira batelada, menos o volume bombeado da batelada b . (equação 63).

$$ID_{b,p,n}^{orig} = ID_{n,p}^0 + \frac{disp_{n,p}}{H} \cdot \sum_{d \in D} \sum_{r \in RFX} TF_{b,d,r}^{bomb} - \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} W_{b,p,n,n',r} \quad (63)$$

$$\forall b \in B | b = 1, p \in P, n \in N$$

Para os demais eventos, (equação 64), o inventário nas áreas de origem deve ser igual ao inventário do evento anterior ($b - 1$), mais a quantidade disponível (produzida menos consumida) durante o intervalo de tempo entre o bombeio da batelada b e $b - 1$, menos a quantidade de volume bombeado de n , mais a quantidade de volume recebida em n (nesse caso, n pode ser um nó onde ocorre a operação pulmão).

$$ID_{b,p,n}^{orig} = ID_{b-1,p,n}^{orig} + \frac{disp_{n,p}}{H} \cdot \left(\sum_{d \in D} \sum_{r \in RFX} TF_{b,d,r}^{bomb} - \sum_{d \in D} \sum_{r \in RFX} TF_{b-1,d,r}^{bomb} \right) - \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} W_{b,p,n,n',r} + \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} W_{b-1,p,n',n,r} \quad (64)$$

$$\forall b \in B | b > 1, p \in P, n \in N$$

Quando a batelada b é bombeada ($ls = 1$), o inventário deve respeitar as capacidades mínima e máxima de armazenagem, dada pelas restrições 65 e 66. Se houver violação no estoque, as variáveis ao e do assumem valores diferentes de zero e são penalizadas na função objetivo.

$$ID_{b,p,n}^{orig} + ao_{b,p,n} \geq ID_{n,p}^{min} - M \cdot \left(1 - \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} ls_{b,p,n,n',r}\right) \quad (65)$$

$$\forall b \in B, p \in P, n \in N$$

$$ID_{b,p,n}^{orig} - do_{b,p,n} \leq ID_{n,p}^{max} + M \cdot \left(1 - \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} ls_{b,p,n,n',r}\right) \quad (66)$$

$$\forall b \in B, p \in P, n \in N$$

O inventário nas áreas de destino para o primeiro evento (batelada) deve ser igual ao inventário inicial, menos a quantidade requerida (demanda subtraída da produção local) durante o tempo de recebimento da primeira batelada, mais o volume da batelada b recebida. (equação 67).

$$ID_{b,p,n}^{dest} = ID_{n,p}^0 - \frac{flt_{n,p}}{H} \cdot \sum_{d \in D} \sum_{r \in RFX} TF_{b,d,r}^{rec} + \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} W_{b,p,n',n,r} \quad (67)$$

$$\forall b \in B | b = 1, p \in P, n \in N$$

Para os demais eventos (exceto o último evento), a equação 68 calcula o inventário nas áreas de destino que deve ser igual ao inventário do evento anterior ($b - 1$), menos a quantidade requerida durante o intervalo de tempo entre o recebimento da batelada b e $b - 1$, mais a quantidade de volume recebida em n , menos a quantidade de volume bombeada de n (nesse caso, n pode ser um nó onde ocorre a operação pulmão).

$$ID_{b,p,n}^{dest} = ID_{b-1,p,n}^{dest} - \frac{flt_{n,p}}{H} \cdot \left(\sum_{d \in D} \sum_{r \in RFX} TF_{b,d,r}^{rec} - \sum_{d \in D} \sum_{r \in RFX} TF_{b-1,d,r}^{rec} \right) \\ + \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} W_{b,p,n',n,r} - \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} W_{b+1,p,n,n',r} \quad (68)$$

$$\forall b \in B | b > 1 \text{ e } b < nb, p \in P, n \in N$$

Para o último evento, a equação 69 calcula o inventário nas áreas de destino. Porém, nesse caso não é subtraída a batelada de pulmão que poderia ser enviada no evento seguinte.

$$ID_{b,p,n}^{dest} = ID_{b-1,p,n}^{dest} - \frac{flt_{n,p}}{H} \cdot \left(\sum_{d \in D} \sum_{r \in RFX} TF_{b,d,r}^{rec} - \sum_{d \in D} \sum_{r \in RFX} TF_{b-1,d,r}^{rec} \right) + \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} W_{b,p,n',n,r} \quad (69)$$

$$\forall b \in B | b = nb, p \in P, n \in N$$

Quando a batelada b é recebida ($ls = 1$), o inventário deve respeitar as capacidades mínima e máxima de armazenagem, dada pelas restrições 70 e 71. Se houver violação no estoque, as variáveis ad e dd assumem valores diferentes de zero e são penalizadas na função objetivo.

$$ID_{b,p,n}^{dest} + ad_{b,p,n} \geq ID_{n,p}^{min} - M \cdot \left(1 - \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} ls_{b,p,n',n,r} \right) \quad \forall b \in B, p \in P, n \in N \quad (70)$$

$$ID_{b,p,n}^{dest} - dd_{b,p,n} \leq ID_{n,p}^{max} + M \cdot \left(1 - \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} ls_{b,p,n',n,r} \right) \quad \forall b \in B, p \in P, n \in N \quad (71)$$

Além da satisfação dos limites de inventário nas áreas de destino (70 e 71), busca-se maximizar o estoque mínimo na área do destino em qualquer dos eventos (restrição 72). Dessa forma, como a variável $mind$ é maximizada na função objetivo, ela indica o valor do menor estoque por área e produto.

$$mind_{n,p} \leq \frac{ID_{b,p,n}^{dest}}{ID_{n,p}^{max}} + \left(1 - \sum_{n' \in N} \sum_{r \in RFX} ls_{b,p,n',n,r} \right) \quad \forall b \in B, p \in P, n \in N \quad (72)$$

6.5.4 Restrições temporais

O tempo de fim de bombeio de qualquer batelada deve acontecer dentro do horizonte de planejamento (restrição 73). Quando a batelada b é uma batelada fictícia, $TF_{b,d,r}^{bomb}$ assume o valor zero.

$$TF_{b,d,r}^{bomb} \leq H \cdot \sum_{p \in P} \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} ls_{b,p,n,n',r} \quad \forall b \in B, d \in D, r \in RFX \quad (73)$$

O tempo de fim de bombeio da batelada b deve ser maior que o tempo de início de bombeio da própria batelada, acrescido de seu tempo de seu bombeio. O tempo de bombeio é dado pela divisão de seu volume pelos limites mínimo e máximo de vazão (restrições 74 e 75).

$$TF_{b,d,r}^{bomb} \leq TI_{b,d,r}^{bomb} + \sum_{p \in P} \sum_{n \in N} \left(\frac{1}{vb_{d,p,n}^{min}} \cdot \sum_{n' \in N} W_{b,p,n,n',r} \right) \quad (74)$$

$$\forall b \in B, d \in D, r \in RFX$$

$$TF_{b,d,r}^{bomb} \geq TI_{b,d,r}^{bomb} + \sum_{p \in P} \sum_{n \in N} \left(\frac{1}{vb_{d,p,n}^{max}} \cdot \sum_{n' \in N} W_{b,p,n,n',r} \right) \quad (75)$$

$$\forall b \in B, d \in D, r \in RFX$$

Para a construção das restrições referentes à precedência temporal entre bateladas que utilizam o mesmo duto, utiliza-se a variável temporal auxiliar de bombeio tdb . Quando b é uma batelada fictícia, tdb deve ser maior que a variável auxiliar para o evento anterior (restrição 76). Caso contrário, a variável auxiliar deve assumir um valor maior que $TF_{b,d,r}^{bomb}$ (restrição 77).

$$tdb_{b,d} \geq tdb_{b-1,d} \quad \forall b \in B | b > 1, d \in D \quad (76)$$

$$tdb_{b,d} \geq TF_{b,d,r}^{bomb} \quad \forall b \in B, d \in D, r \in RFX \quad (77)$$

Sabendo-se, por intermédio da variável tdb , o instante de tempo em que a última batelada não-fictícia foi bombeada, é possível, então, realizar a precedência temporal entre duas bateladas que serão bombeadas para um mesmo duto, conforme restrição (78).

$$TI_{b,d,r}^{bomb} \geq tdb_{b-1,d} - M \cdot \left(1 - \sum_{p \in P} \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} l_{S_{b,p,n',n,r}} \right) \quad (78)$$

$$\forall b \in B | b > 1, d \in D, r \in RFX$$

O cálculo de recebimento das bateladas é realizado considerando o bombeio e o deslo-

camento de uma quantidade equivalente ao volume da rota (vr_r). O tempo é dado pela divisão do volume da rota pelo tempo médio de transporte (restrições 79 e 80).

$$TI_{b,d,r}^{rec} = TI_{b,d',r}^{bomb} + \frac{vr_r}{vb_r^{med}} \cdot \left(\sum_{p \in P} \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} ls_{b,p,n',n,r} \right) \quad (79)$$

$$\forall b \in B, d, d' \in D, r \in RFX$$

$$TF_{b,d,r}^{rec} = TF_{b,d',r}^{bomb} + \frac{vr_r}{vb_r^{med}} \cdot \left(\sum_{p \in P} \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} ls_{b,p,n',n,r} \right) \quad (80)$$

$$\forall b \in B, d, d' \in D, r \in RFX$$

Para a construção das restrições referentes à precedência temporal entre bateladas que utilizam o mesmo duto, também é utilizada a variável temporal auxiliar de recebimento tdr . Quando b é uma batelada fictícia, tdr deve ser maior que a variável auxiliar para o evento anterior (restrição 81). Caso contrário, a variável auxiliar deve assumir um valor maior que $TF_{b,d,r}^{rec}$ (restrição 82).

$$tdr_{b,d} \geq tdr_{b-1,d} \quad \forall b \in B | b > 1, d \in D \quad (81)$$

$$tdr_{b,d} \geq TF_{b,d,r}^{rec} \quad \forall b \in B, d \in D, r \in RFX \quad (82)$$

Sabendo-se, por intermédio da batelada tdr , o instante de tempo que a última batelada não-fictícia foi recebida, é possível, então, realizar a precedência temporal entre duas bateladas que serão recebidas através de um mesmo duto, conforme restrição (83).

$$TI_{b,d,r}^{rec} \geq tdr_{b-1,d} - M \cdot \left(1 - \sum_{p \in P} \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} ls_{b,p,n',n,r} \right) \quad (83)$$

$$\forall b \in B | b > 1, d \in D, r \in RFX$$

Para áreas e produtos onde ocorre a operação pulmão, o início de bombeio na área de pulmão n deve acontecer após o início de recebimento da batelada anterior nessa mesma área n .

A inequação 84 verifica essa condição, caso ambas as bateladas b e $b + 1$ não sejam bateladas fictícias. No caso de bateladas fictícias, não é necessário verificar essa condição.

$$TI_{b+1,d',r'}^{bomb} \geq TI_{b,d,r}^{rec} - M \cdot (2 - ls_{b,p,n',n,r} - ls_{b+1,p,n,n'',r'}) \quad (84)$$

$$\forall \{b, b+1\} \in B | b < nb, p \in P, \{n, n', n''\} \in N, \{d, d'\} \in D, \{r, r'\} \in RFX$$

6.6 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

O modelo foi aplicado à rede de dutos apresentada no capítulo 4. Para a obtenção da solução, foi utilizado como parâmetro de entrada a saída do modelo de planejamento, apresentado no capítulo anterior. Os dados utilizados, comuns em todos os cenários são apresentados na tabela 15. Além dos dados apresentados nesta tabela, tem-se:

- Horizonte de *scheduling*: $H = 180h$;
- Constante suficientemente grande: $M = 1.000.000$;
- Constante suficientemente pequena: $eps = 0,01$;
- Fator de ponderação $\alpha = 2$;
- Fator de ponderação $\mu = 5$;
- Numero máximo³ de bateladas: $nb = 60$.

Tabela 15 – Dados: Tamanho de lotes mínimo e máximo (em uv)

	Produto		
	10, 14	19	Demais
$lots_p^{min}$	1350	3000	5000
$lots_p^{max}$	5400	15000	25000

A tabela 16 permite visualizar as dimensões do modelo de alocação e sequenciamento PLIM resultante, para 8 cenários distintos, todos considerando o horizonte de planejamento de 1 semana. O volume mensal de movimentação sugerido pelo modelo de planejamento é dividido em 4 porções de igual valor, indicando um volume semanal planejado. No horizonte de 1 semana, deseja-se obter uma lista de bateladas, cuja soma dos volumes apresente um valor próximo do volume semanal planejado. Esta divisão em horizontes semanais foi realizada

³Cardinalidade do conjunto B . Deve ser proporcional ao horizonte de *scheduling*

porque não foi viável a aplicação do modelo de alocação e sequenciamento PLIM utilizando horizonte mensais. O *solver* retornou *out of memory status* para vários cenários mensais estudados. Nos experimentos realizados, utilizando horizontes semanais, o tempo computacional foi limitado em 5 horas para todos os cenários. Em nenhum caso foi possível provar a otimalidade da solução. Além disso, o *gap* relativo apresenta valores muito altos na maioria dos cenários apresentados (ex: para C6, C7 e C8, $Gap(\%)$ igual a, respectivamente, 91,04; 94,93; e 98,40).

Os rótulos apresentados na tabela 16 são os mesmos apresentados pela tabela 3 (página 71). Adicionalmente, o número de bateladas sugerido pelo modelo (não fictícias) é dado por “Nº Bateladas”. Para a obtenção dos resultados, utilizou-se o *software* ILOG OPL Studio 6.3, CPLEX 12 em um computador Intel Core 2 Duo 6400, 2.13 GHz, 3GB RAM.

Tabela 16 – Resultados do Modelo de Alocação/Sequenciamento

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Tempo (s)	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000
F. Objetivo	114802,1	105400,9	17409,4	35068,7	134236,9	72499,3	107985,9	615620,2
F.O. Relaxada	10433,5	11022,0	14956,9	15140,1	15264,1	6499,0	5476,0	9847,4
<i>Gap</i> (%)	90,91	89,54	14,09	56,83	88,63	91,04	94,93	98,40
Iterações	4136120	3032431	3761195	4533903	2848258	3541994	3785356	3300278
Variáveis	22038	21802	21623	23248	22163	20957	19999	21446
Var. Int.	1920	1980	1980	2160	1980	1860	1860	2040
Restrições	31437	30904	30781	33238	31321	30056	28625	30427
Nº Bateladas	51	42	48	60	48	51	50	51

Apesar da dificuldade computacional observada, o modelo de alocação e sequenciamento desenvolvido permite obter detalhes operacionais acerca do sequenciamento de bombeio. Por exemplo, a partir do resultado do modelo de planejamento para o cenário C3 (tabela 14, página 106), além dos dados de limite de estocagem apresentados no Anexo A e dos órgãos, onde ocorre a operação pulmão (tabela 8, página 84), o modelo de alocação e sequenciamento PLIM foi executado, obtendo-se informações para 48 bateladas (tabela 17). A variável $W_{b,p,n,n',r}$ e índices apresentados nesta tabela, (*labels* da tabela 17) são definidos no Apêndice C (página 227) ou em Apêndices anteriores. Observa-se que, por exemplo, o volume total a ser transportado do produto 14 (p) com origem em N10 (n) e destino N2 (n') pela rota (r) N10→14→N9→8→N5→7→N12→29→N2 é dividido em 5 bateladas ($b = 3, 5, 10, 32$ e 42).

Com exceção da batelada 5, o volume de cada batelada ($W_{b,p,n,n',r}$) é idêntico ao tamanho máximo de transporte ($lots_{14}^{max} = 5400$ uv). A batelada 5 tem um volume inferior para complementar o volume sugerido pelo modelo de planejamento no período de 1 semana (4669 uv).

Tabela 17 – Sequência e volume das bateladas para 1 semana - Cenário C3

b	p	n	n'	r	$W_{b,p,n,n',r}$ (uv)
1	31	N3	N10	N3→12→N9→15→N10	14087
2	10	N3	N5	N3→10→N9→8→N5	1361
3	14	N10	N2	N10→14→N9→8→N5→7→N12→29→N2	5400
4	14	N3	N5	N3→10→N9→8→N5	1805
5	14	N10	N2	N10→14→N9→8→N5→7→N12→29→N2	4669
6	21	N4	N13	N4→23→N13	10848
7	31	N3	N9	N3→12→N9	19048
8	34	N6	N7	N6→25→N8→3→N7	25000
9	18	N6	N14	N6→25→N8→2→N11→5→N12→18→N14	25000
10	14	N10	N2	N10→14→N9→8→N5→7→N12→29→N2	5400
11	25	N6	N11	N6→24→N8→28→N1→4→N11	25000
12	18	N3	N14	N3→11→N9→17→N12→18→N14	5000
13	21	N3	N10	N3→11→N9→30→N10	25000
14	21	N5	N12	N5→6→N12	18135
15	27	N4	N13	N4→23→N13	5000
16	18	N4	N14	N4→1→N8→2→N11→5→N12→18→N14	6998
17	31	N4	N11	N4→1→N8→28→N1→4→N11	11492
18	25	N6	N11	N6→24→N8→28→N1→4→N11	15607
19	34	N6	N7	N6→25→N8→3→N7	5000
20	31	N9	N13	N9→17→N12→19→N13	19130
21	14	N10	N5	N10→14→N9→8→N5	1350
22	34	N6	N7	N6→25→N8→3→N7	15410
23	31	N3	N9	N3→12→N9	17521
24	34	N8	N7	N8→3→N7	23978
25	18	N4	N14	N4→1→N8→2→N11→5→N12→18→N14	14046
26	31	N3	N9	N3→12→N9	5000
27	31	N9	N12	N9→17→N12	17460
28	26	N3	N10	N3→12→N9→15→N10	12644
29	10	N3	N5	N3→10→N9→8→N5	1954
30	35	N4	N13	N4→22→N13	7674
31	20	N6	N7	N6→25→N8→3→N7	25000
32	14	N10	N2	N10→14→N9→8→N5→7→N12→29→N2	5400
33	20	N6	N7	N6→25→N8→3→N7	19174
34	6	N4	N6	N4→1→N8→24→N6	5000
35	14	N3	N5	N3→10→N9→8→N5	3318
36	10	N3	N5	N3→10→N9→8→N5	4811
37	34	N6	N7	N6→25→N8→3→N7	5113
38	27	N8	N6	N8→26→N6	5000
39	31	N9	N12	N9→17→N12	5000
40	18	N6	N14	N6→25→N8→2→N11→5→N12→18→N14	8339
41	21	N5	N13	N5→7→N12→19→N13	5000
42	14	N10	N2	N10→14→N9→8→N5→7→N12→29→N2	5400
43	34	N5	N4	N5→20→N12→19→N13→22→N4	11413
44	21	N6	N11	N6→25→N8→2→N11	11178
45	31	N3	N10	N3→12→N9→15→N10	5444
46	26	N3	N10	N3→12→N9→15→N10	16570
47	21	N3	N10	N3→11→N9→30→N10	9383
48	34	N5	N4	N5→20→N12→19→N13→22→N4	25000

Obteve-se, portanto, como resultado parcial do modelo de alocação e sequenciamento PLIM, a lista de bateladas apresentada na tabela 17. Analisando a tabela, é possível visualizar que o volume das bateladas estão, em muitos casos, próximos dos limites mínimos e máximos para cada produto ($lots^{min}$ e $lots^{max}$). Ressalta-se que essa solução foi obtida após 5 horas de

processamento e possui um *gap* relativo de 14,09%, em relação a melhor solução relaxada. A tabela é construída de forma que os produtos que precisam ser bombeados (ou recebidos) com urgência tenham prioridade sobre os outros produtos.

Apesar da flexibilidade da variável de volume das bateladas ($W_{b,p,n,n',r}$) poder assumir valores contínuos, dentro dos intervalos mínimos e máximos, pode-se perceber através da tabela 18 que, em alguns casos, não é possível enviar o volume planejado. Essa diferença pode ser adicionada (ou diminuída, no caso de dif^-) na próxima semana que o modelo for executado, para o mesmo cenário.

Tabela 18 – Diferença do volume planejado \times sequenciado (uv)

p	r	dif^+	p	r	dif^-
10	N3→10→N9→8→N5	397	6	N4→1→N8→24→N6	133
20	N3→11→N9→30→N10	2142	14	N10→14→N9→8→N5	5
21	N3→11→N9→30→N10	1060	18	N3→11→N9→17→N12→18→N14	1530
21	N3→13→N9→9→N12→19→N13	277	21	N5→7→N12→19→N13	1048
21	N8→2→N11	1493	27	N4→23→N13	1389
25	N6→24→N8→21→N4	2080	27	N8→26→N6	444
31	N4→1→N8→24→N6	2421			
34	N8→21→N4	2032			
34	N5→20→N12→19→N13→22→N4	973			

6.7 CONCLUSÕES

Esse capítulo apresentou um modelo PLIM para realizar a alocação de volumes às bateladas, bem como o sequenciamento destas. A partir dos cenários avaliados, observa-se que o modelo de alocação e sequenciamento PLIM desenvolvido tende a apresentar uma carga computacional elevada, mesmo considerando-se cenários de planejamento de uma semana. Para entradas de planejamento mensais, a carga computacional tende a ser operacionalmente proibitiva. Isso ocorre de forma similar ao modelo de sequenciamento envolvendo 1 duto (Capítulo 3). Assim, observa-se que para obter um sequenciamento ótimo de bateladas, seja em um duto ou em uma rede de dutos, é requerida uma carga computacional elevada. Dessa forma, não é viável do ponto de vista operacional esperar várias horas para a obtenção de uma solução não ótima.

Vimos no capítulo 3 que é possível desenvolver modelos de sequenciamento de bateladas para complexos envolvendo um único duto. Quando o problema envolve uma rede de dutos, modelos semelhantes tendem a obter uma carga computacional elevada, como foi o caso de modelo de alocação e sequenciamento PLIM proposto. A partir dessas observações, surge a necessidade de uma abordagem alternativa para a obtenção das informações de sequências e volumes ilustrados na tabela 17. Esta abordagem é denominada alocação heurística (vide figura

17, página 89) e será explanada no capítulo a seguir. Resumidamente, a alocação de recursos heurística utiliza tamanhos de lotes típicos historicamente utilizados pelos programadores para a geração de bateladas, e, com base nessas bateladas, utiliza janelas de tempo para sequenciá-las. Mais detalhes poderão ser obtidos no capítulo 7.

7 DEMAIS BLOCOS UTILIZADOS NA DECOMPOSIÇÃO

7.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os demais blocos utilizados para a obtenção do *scheduling* da rede de dutos. Os blocos aqui apresentados são objetos de estudo de outros trabalhos aqui referenciados e, não fazem parte do foco da Tese. Eles são apresentados de forma sucinta, para o entendimento de todas as etapas a serem seguidas para a obtenção da solução final de *scheduling*. O esquema de decomposição mostrado na figura 17 (página 89) apresenta cada um dos blocos (representados por caixas brancas) que serão detalhados nas seções seguintes. Dentre os blocos apresentados na figura, serão abordados nesse capítulo:

- Alocação (de Recursos) Heurística;
- Reordenação (utilizando Meta-)Heurística;
- Reordenação PLIM;
- Pré-análise.

Os blocos aqui apresentados calculam parâmetros que serão utilizados no modelo PLIM de temporização. As notações e símbolos utilizados nesse capítulo podem ser encontradas no Apêndice D (página 231), ou em Apêndices prévios.

7.2 ALOCAÇÃO DE RECURSOS HEURÍSTICA

O bloco de Alocação de recursos heurística utiliza os volumes determinados pelo modelo de planejamento para o cálculo de volumes menores (bateladas), considerando volumes típicos de transporte (tamanhos das bateladas). Conforme introduzido por Bonacin *et al.* (2007), o objetivo da alocação de recursos heurística é determinar uma sequência possível de bombeamento, de forma que as bateladas sejam transportadas para a satisfação dos limites de estocagem em todas as áreas da rede.

7.2.1 Entrada de dados

Em relação aos dados de entrada a serem utilizados, ressaltam-se os seguintes itens:

- dados dos terminais (capacidade agregada, estoque inicial, oferta e demanda) para cada produto, referente ao cenário a ser programado;
- volume mensal por produto a ser movimentado (vide modelo de planejamento);
- áreas de origem e destino de movimentação do volume pré-determinado (vide modelo de planejamento);
- rota a ser utilizada para a movimentação do produto (vide modelo de planejamento).

Além do volume mensal a ser movimentado (solução do modelo de planejamento), bateladas adicionais são necessárias para auxílio nas operações de reversão dos dutos, e deslocamento de bateladas que permaneçam paradas no duto e precisem ser entregues em seu destino final. Essas bateladas adicionais (ou bateladas auxiliares) são adicionadas após o cálculo das bateladas criadas para o atendimento da demanda. Após a divisão do volume global a ser movimentado em bateladas, que possuem valores típicos de transporte, é realizada a ordenação dessas bateladas, através das janelas de tempo.

7.2.2 Cálculo das bateladas - Janelas de tempo

A divisão dos volumes mensais em bateladas é realizada considerando um valor típico de transporte, conforme sugerido pelos programadores da rede de dutos (veja item: Definição das Bateladas de bombeamento - página 80). Após a obtenção das bateladas, são calculadas as janelas de tempo para cada uma delas.

Dessa forma, o inventário nas áreas, tanto de origem quanto de destino, é gerenciado através das janelas de tempo. Se as operações de envio e recebimento ocorrem dentro das janelas, os limites de inventário em ambos os órgãos são, em tese, respeitados e a demanda é satisfeita.

Analisando a evolução dos estoques e os patamares de estoque limite para cada órgão, é definido como Tempo de Recebimento Crítico (trc_b) o instante em que um órgão de destino atinge o valor de estoque mínimo (ex: figura 22(a)). Analogamente, o Tempo de Envio Crítico (tec_b) é determinado como o instante em que um órgão de origem atinge o valor de estoque máximo (figura 22(b)). Na figura 22, o eixo das ordenadas representa o estoque, onde são

representadas as linhas para os estoques mínimo, máximo, capacidade (CP) e estoque inicial (ID^0). Os gráficos apresentam a evolução do estoque ao longo do tempo (t).

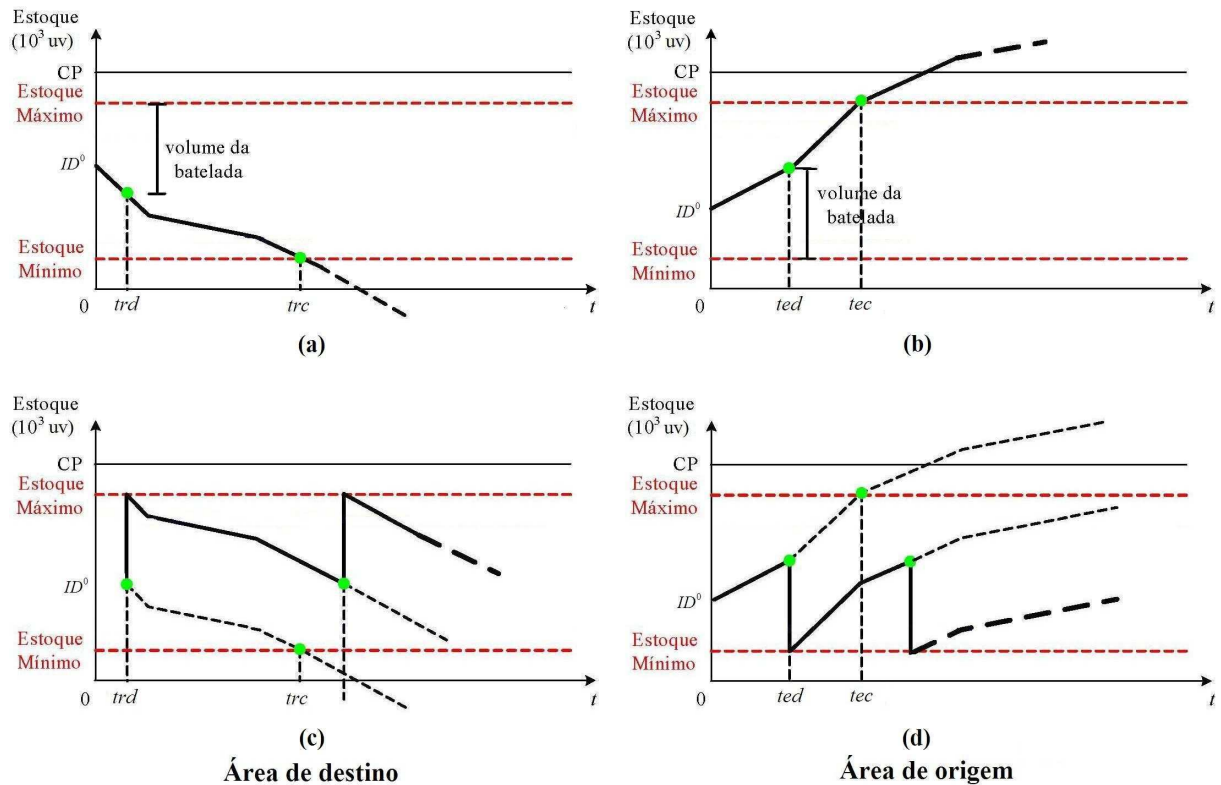


Figura 22 – Critérios para cálculo de trc_b , tec_b , trd_b e ted_b

O Tempo de Recebimento Disponível (trd_b) é definido como o instante imediatamente anterior ao trc_b no qual o órgão de destino detém um valor de estoque que possibilite o armazenamento completo de uma nova batelada (figura 22(a)). O Tempo de Envio Disponível (ted_b) é determinado como o instante anterior ao tec_b no qual o órgão de origem detém um valor de estoque suficiente para enviar uma batelada completa (figura 22(b)).

São calculados 2 conjuntos de janelas de tempo distintos:

1. Janelas de tempo de capacidade: Indicam os tempos limites ted_b , tec_b , trd_b e trc_b de uma batelada específica. Se estas janelas são violadas, os limites de capacidades dos tanques, ou estoques mínimos das áreas são violados. Com isso, tem-se as janelas de tempo nos órgãos de origem e destino, indicando o intervalo quando o bombeio e o recebimento da batelada devem ocorrer, conforme ilustrado na figura 22. Na figura, a escala temporal (eixo das abcissas) no instante zero, representa o estoque inicial agregado por área e produto. Com o passar do tempo, ocorre a produção na área de origem (curva com inclinação positiva), o consumo na área de destino (curva com inclinação negativa) ou envio/recebimento de bateladas, representados por saltos no gráfico (figuras 22(c) e (d)).

Com a formação do movimento, cada órgão envolvido tem o seu controle de estoque modificado, a fim de possibilitar o cálculo dos próximos movimentos, e assim o critério de formação das bateladas segue sucessivamente.

2. Janelas de tempo “cortadas”: As janelas originais de capacidade são cortadas (ajustadas) em função do tempo mínimo de deslocamento das bateladas para seu recebimento no destino.

O procedimento de ajuste nas janelas, para uma batelada específica, é ilustrado na figura 23. A figura 23(a) apresenta as janelas de tempo de capacidade, enquanto a figura 23(b) apresenta o corte feito na respectiva janela. Dessa forma, o tempo de envio crítico (tec_b) passa a ser o menor valor entre o próprio tempo de envio crítico calculado anteriormente, e o tempo de recebimento crítico (trc_b) subtraído do tempo ideal de transporte, resultando, assim, em uma janela de tempo mais aderente à dinâmica da rede. Dessa forma, o novo valor de tec_b passa a ser dado por:

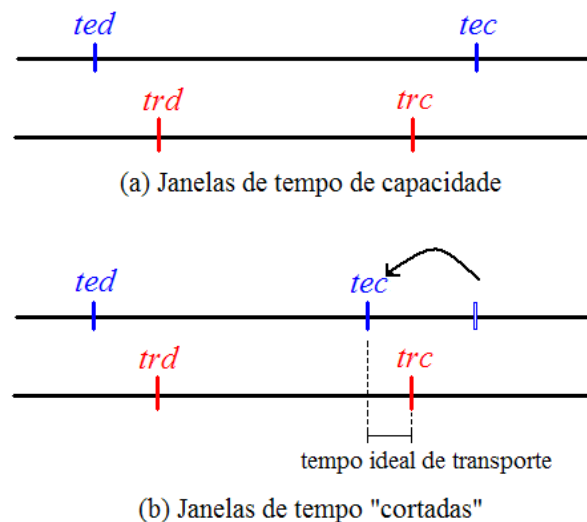


Figura 23 – Exemplos de janelas de tempo

$tec^{cut} = \min(tec, trc - t_t)$, onde t_t é o tempo ideal de transporte.

O parâmetro t_t é calculado considerando o volume da rota em que a batelada será transportada dividida por sua vazão máxima de transporte. Por exemplo, como pode ser observado na figura 23(b), o tempo de envio crítico é adiantado até o menor valor realizável, ou seja, o último instante de tempo em que a batelada pode ser enviada e tem alguma chance de atingir seu destino a tempo de respeitar o trc_b .

Após definido o conjunto de bateladas a serem bombeadas e suas janelas de tempo correspondentes, a alocação heurística sugere uma ordem inicial para o bombeio dessas bateladas. As bateladas são ordenadas com base nos valores das janelas de tempo da área de origem

(ted_b e tec_b) a da área de destino (trd_b e trc_b). Por exemplo, a batelada com o menor tec_b tem prioridade alta de envio. Esse procedimento reflete o envio lógico de uma área produtora. Baseado em uma série de procedimentos operacionais, uma função heurística (ex: equação 85) é usada para determinar a ordem inicial das bateladas. As bateladas com o menor valor de Cd tem prioridade de envio (BOSCHETTO *et al.*, 2010a). Uma equação semelhante utilizada para determinar a ordem das bateladas, além de detalhes adicionais, podem ser encontrados em Felizari (2009).

$$Cd_b = \left[ted_b + (tec_b + 1 - ted_b) \cdot \frac{ted_b + 1}{tec_b + 1} \right] + \left[trd_b + (trc_b + 1 - trd_b) \cdot \frac{trd_b + 1}{trc_b + 1} \right] \quad (85)$$

Ao final desta etapa do sequenciamento, o resultado corresponde a uma lista de movimentos já ordenada por prioridades de envio e recebimento no escopo de cada produto. A tabela 19 apresenta o resultado do modelo de alocação heurística para parte do cenário C3. Esses parâmetros (*labels* da tabela 19) são definidos no Apêndice D (página 231) e são utilizados nos blocos seguintes para a obtenção da solução final do *scheduling* da rede de dutos. Ao todo, são geradas 329 bateladas, incluindo 61 bateladas que já estão nos dutos da rede no início do horizonte (estoque em duto). A tabela apresenta os dados para as bateladas 62 a 90.

A partir da lista inicial de bateladas, ordenadas segundo suas janelas temporais, é possível identificar quais dutos devem operar em ambos os sentidos (direto e reverso) e em quais posições há a necessidade de adicionar as bateladas auxiliares de reversão. Após a identificação das duas bateladas que utilizam o duto em sentidos contrários, a batelada auxiliar de reversão é incluída na lista entre elas. Na tabela 19, as bateladas com o índice b elevados (por exemplo, batelada 321) foram inseridas posteriormente e representam quebras de bateladas (rotas) para operação pulmão, ou bateladas auxiliares, como no exemplo da batelada 321 (batelada auxiliar de reversão).

As janelas de tempo de envio (ted_b e tec_b) e recebimento (trd_b e trc_b) também são especificadas na tabela 19. Em alguns casos, (ex: bateladas 321, 88 e 259) as janelas de tempo sugeridas podem ser maiores que o horizonte de *scheduling* típico (720 horas, ou 1 mês). Nesse caso, a batelada pode ser bombeada (ou recebida) em qualquer momento do horizonte temporal. O modelo PLIM de temporização irá gerenciar essas decisões temporais, que normalmente envolvem bateladas auxiliares.

Analisando a tabela 19 pode-se observar que, após a batelada 68, as próximas bateladas que utilizarão o duto 24 serão as bateladas 321 e 80 (vide coluna rfx_b). Logo, a precedência da batelada 68 sobre a batelada 321 deve ser respeitada e, de forma análoga, a precedência

Tabela 19: Tabela Bateladas - Cenário C3

b	$prod_b$	vol_b	ted_b^{cut}	tec_b^{cut}	trd_b^{cut}	trc_b^{cut}	ted_b	tec_b	trd_b	trc_b	rfx_b
...											
62	34	7177	0	10,6	0	21,1	0	10,6	0	21,1	N12→19→N13
63	34	14658	0	26,9	0	53,7	0	26,9	0	53,7	N13→22→N4
64	31	12000	0	0,5	0	22,9	0	172	0	89,5	N3→12→N9
251	31	12000	0	0,5	0	22,9	0	172	0	89,5	N9→17→N12
252	31	12000	0	0,5	0	22,9	0	172	0	89,5	N12→19→N13
65	20	10000	0	8,9	33,1	146	0	8,9	33,1	208,9	N6→25→N8→3→N7
66	31	6000	0	12,8	3,3	14,5	0	205,7	3,3	17,7	N3→12→N9→15→N10
67	14	5400	0	13,3	4,2	25,6	0	131,7	4,2	60,2	N10→14→N9→8→N5→7→N12→29→N2
68	31	9684	0	80,5	0	720	0	136,4	0	720	N4→1→N8→24→N6
321	34	4300	0	9999	0	9999	0	9999	0	9999	N8→24→N8
69	34	9000	0	25,5	0	151,4	0	109,2	0	641,9	N5→20→N12
254	34	9000	0	25,5	42,5	151,4	0	109,2	0	641,9	N12→19→N13
253	34	9000	0	25,5	0	151,4	0	109,2	0	641,9	N13→22→N4
70	18	7000	0	44	0	62	0	521,6	0	250,6	N3→11→N9→17→N12→18→N14
71	18	19500	0	56,3	0	84,7	0	406,3	0	273,3	N6→25→N8→2→N11→5→N12→18→N14
72	34	21500	0	36,1	6,2	64,5	0	330,6	6,2	105,7	N6→25→N8→3→N7
73	21	10000	0	41,8	0	58,8	0	181,5	0	114,5	N5→6→N12
255	21	10000	0	41,8	0	58,8	0	181,5	0	114,5	N12→19→N13
74	10	2700	25,7	38,6	25,7	46,6	25,7	152	0	71,4	N3→10→N9→8→N5
75	27	12000	0	41,8	0	53,3	0	720	0	301,8	N8→26→N6
76	21	12000	31,8	42,1	35,1	44,5	31,8	123,4	35,1	71,4	N3→11→N9→30→N10
77	20	10000	0	51,2	74,4	187,3	0	51,2	74,4	250,2	N6→25→N8→3→N7
78	20	12000	0	93,5	122,5	260,1	0	93,5	122,5	291,5	N6→25→N8→3→N7
79	14	5400	0	53,9	44,8	66,2	0	169,6	44,8	100,8	N10→14→N9→8→N5→7→N12→29→N2
80	25	12300	0	60,3	40,4	77,9	0	167,4	40,4	119,9	N6→24→N8→28→N1→4→N11
81	31	12000	0	58	0	70,9	0	222,5	0	201,9	N3→12→N9
256	31	12000	0	58	0	70,9	0	222,5	0	201,9	N9→17→N12
82	26	18000	0	80,4	17,8	82,1	0	185,8	17,8	136	N3→12→N9→15→N10
83	14	2700	21,2	77,4	21,2	88,1	21,2	119,8	0	138,8	N3→10→N9→8→N5
84	18	19500	0	66,3	42,6	147,8	0	331,5	42,6	336,4	N4→1→N8→2→N11→5→N12→18→N14
85	31	6000	25,3	68,7	59,2	70,3	25,3	256,2	59,2	73,5	N3→12→N9→15→N10
86	20	12000	0	144,2	172,1	309,7	0	144,2	172,1	341,1	N6→25→N8→3→N7
87	34	9000	0	86,4	0	188,1	0	170	0	681,4	N5→20→N12
258	34	9000	0	86,4	76,2	188,1	0	170	0	681,4	N12→19→N13
257	34	9000	0	86,4	0	188,1	0	170	0	681,4	N13→22→N4
88	34	9000	0	147,3	0	224,9	0	230,9	0	9999	N5→20→N12
260	34	9000	0	147,3	0	224,9	0	230,9	0	9999	N12→19→N13
259	34	9000	0	147,3	0	224,9	0	230,9	0	9999	N13→22→N4
89	34	21500	0	89,4	59,5	117,8	0	402,5	59,5	159	N6→25→N8→3→N7
90	10	2700	84,8	92,9	84,8	100,9	84,8	211,1	0	125,7	N3→10→N9→8→N5
...											

da batelada 321 sobre a batelada 80 deve ser também respeitada. Nesse sentido, os valores numéricos das bateladas (índice b) não são um indicador válido de precedência, mas a posição relativa das bateladas na tabela 19. Por outro lado, se duas bateladas não compartilham um mesmo duto, a ordem não precisa ser necessariamente respeitada. Detalhes acerca dessa questão são ilustrados *a posteriori*, na seção de resultados (capítulo 9).

Além disso, é possível identificar também, através da rota (dutos) utilizados por cada batelada, quais irão permanecer paradas na rede de dutos por serem as últimas a utilizar um determinado duto. A alocação heurística gera bateladas auxiliares para o deslocamento dessas bateladas que permaneceriam nos dutos, viabilizando sua entrega e minimizando a quantidade

de produtos não entregues. Por exemplo, supondo que somente as bateladas apresentadas na tabela 19 serão bombeadas, a batelada 79 será a última batelada a ser bombeada para o duto 14. Desse forma, parte dela permanecerá no duto 14 e parte será empurrada para os demais dutos da rota. Nesse exemplo hipotético não há batelada adicional para empurrar a quantidade de produto da batelada 79 que fica parada no duto 14. Como o próximo duto a ser utilizado pela batelada 79 é o duto 8, e a batelada 83 também utiliza esse duto, há a quebra da batelada 79 excluindo-se o volume que permanece no duto inicial (duto 14). A pré-análise (seção 7.4) identifica todas as quebras, que serão utilizadas como parâmetros no modelo de temporização PLIM.

Os volumes das bateladas auxiliares (de reversão e deslocamento do duto) utilizam os volumes disponíveis nos órgãos que não serão contabilizados para a satisfação de demanda. Dessa forma, a quantidade de volume movimentada difere da quantidade de volume planejada, por consequência dessas bateladas auxiliares.

Uma abordagem semelhante a aqui apresentada para geração do sequenciamento das bateladas pode ser encontrada em Bonacin *et al.* (2007), que descreve o processo utilizado para a obtenção da lista de bateladas de forma detalhada.

7.3 SEQUENCIAMENTO/REORDENAÇÃO

Após a geração de uma sequência inicial de bateladas através do módulo alocação de recursos heurística, verificou-se a importância de buscar outras sequências viáveis de programação. Isso é necessário para fornecer soluções alternativas ao usuário, permitindo a escolha da programação que melhor prioriza os objetivos daquele dado momento.

Portanto, a reordenação realizada por Neves-Jr *et al.* (2007c), Yamamoto *et al.* (2007a, 2007b), Felizari (2009) tem por objetivo obter um melhor sequenciamento das bateladas dos diferentes produtos envolvidos em uma determinada lista. O procedimento de reordenação é alimentado pelos dados das bateladas que foram previamente geradas pela alocação de recursos para contemplar o balanço de massa da rede, considerando, por exemplo, demandas, estoques e curvas de produção. De forma geral, pode-se destacar alguns aspectos relevantes da reordenação:

- Pode representar uma diminuição no tempo total da programação;
- Possibilidade de melhoria na taxa de utilização dos dutos;
- Pode obter uma ordenação que contorne problemas de gargalos na rede;

- Boa ferramenta no auxílio da tomada de decisão, podendo apresentar várias ordenações de bateladas para análises e comparações.

A figura 24 mostra como a reordenação pode ser aqui tratada antes do modelo de temporização gerar a solução final. Observa-se que tanto a solução inicial (Alocação de Recursos) quanto a Reordenação podem ser encaminhadas aos blocos subsequentes do sistema.

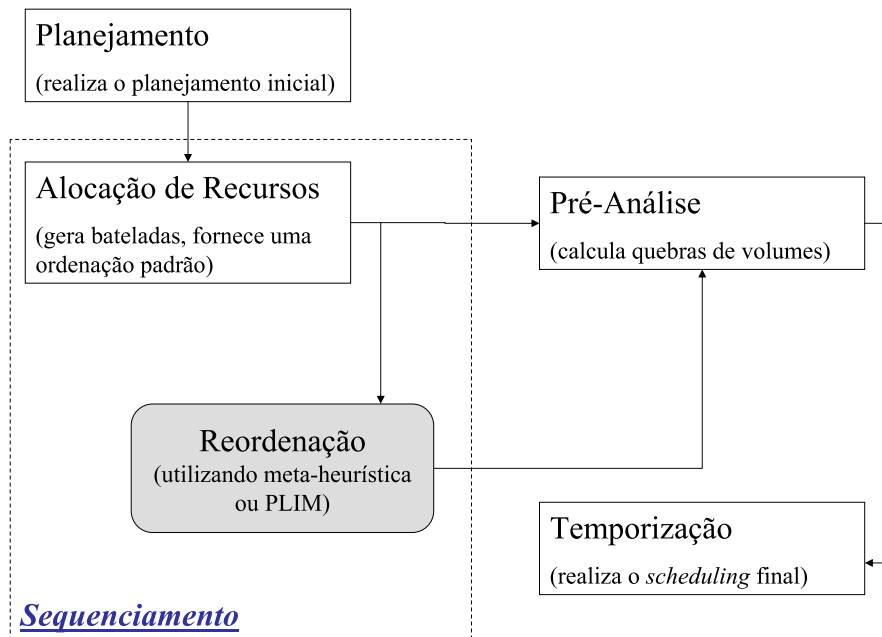


Figura 24 – Divisão das abordagens de sequenciamento utilizadas

7.3.1 Reordenação utilizando meta-heurísticas

A reordenação realizada pelo uso de meta-heurísticas considera como prioridade o tempo de disponibilidade do produto na origem, refinaria ou terminal, e o tempo de necessidade do produto no destino.

Em seu trabalho, Neves-Jr *et al.* (2007c) utilizam uma meta-heurística para determinar novas sequências de envio das bateladas. A técnica inicialmente empregada utiliza um algoritmo genético na busca de várias soluções viáveis, descartando ordenações que causem, *a priori*, inviabilidade. O objetivo da reordenação é, portanto, encontrar programações com melhor qualidade, uma vez que a sequência de bateladas utilizada impacta de forma significativa no *scheduling* obtido pelo módulo de temporização. A seguir, são apresentados os passos (P1 a P3) do processo heurístico empregado:

P1 Lê o arquivo de bateladas gerado pela Alocação de Recursos;

P2 Executa um método heurístico (ex: Algoritmos Genéticos) para melhor reordenar as bateladas;

P3 Fornece várias ordenações para as bateladas.

A abordagem heurística para geração de novas ordenações para as bateladas pode também ser encontrada em Yamamoto *et al.* (2007a) e Yamamoto *et al.* (2007b), onde é descrito detalhadamente o processo utilizado para a realização do sequenciamento. Pode-se verificar que há uma significativa melhoria das soluções do problema de *scheduling* ao otimizar o sequenciamento das bateladas. Por exemplo, pode-se reduzir o número total de violações das janelas de tempo geradas nos pontos de origem e destino dos produtos. Pode-se destacar a diminuição do tempo total para a realização das operações do *scheduling*, apresentando ainda uma solução com melhor taxa de utilização dos dutos.

7.3.2 Reordenação PLIM

Felizari (2009) propõe um modelo de reordenação para determinar uma melhor ordem de bombeio das bateladas em relação às áreas de origem, de forma a minimizar as violações dos limites de tancagem agregada.

Com base nas informações geradas pelo módulo de alocação heurística, um modelo matemático PLIM foi desenvolvido em conjunto com técnicas de programação lógica por restrições (PLR). A abordagem adotada considera a influência de gargalos dinâmicos da rede na obtenção de uma ordenação de bateladas. O objetivo do modelo PLIM-PLR é minimizar a violação temporal das operações de bombeio e recebimento de produtos originados pelos gargalos dinâmicos da rede.

Estimando o efeito da rede na propagação das bateladas, obtêm-se um ganho significativo na qualidade da solução quando comparada ao sequenciamento inicial, que pode falhar em alguns casos particulares.

7.4 PRÉ-ANÁLISE

A pré-análise auxilia o modelo matemático a identificar quais bateladas influenciarão o deslocamento dos volumes de outras bateladas ao longo da rede (CZAIKOWSKI *et al.*, 2008). A partir da saída do bloco de Alocação heurística (ou reordenação), a pré-análise auxilia na obtenção de um resultado exato, ou seja, retorna parâmetros calculados deterministicamente. Como a rede de dutos em estudo possui vários dutos podendo chegar e/ou sair de um mesmo

órgão, torna-se difícil identificar pontos onde possam haver “quebras” das bateladas, ou seja, onde uma batelada deve interromper o seu bombeio ou o seu deslocamento em pontos internos da rede. O deslocamento dessas bateladas na rede dependerá do bombeamento de uma batelada em sua origem que, por sua vez, deve respeitar o entroncamento da rede, deslocando as bateladas que estão nos dutos apenas em momentos que os dutos estejam “disponíveis” para trafegar a batelada. Evita-se, assim, o uso de dutos por duas ou mais bateladas em um mesmo instante de tempo.

De forma geral, pode-se deduzir que o recebimento de uma batelada b em um determinado duto será influenciado pelo bombeamento de outra batelada bo_b em sua origem. Porém, como identificar qual a origem de bombeamento que influenciará o deslocamento da batelada b no duto? A batelada bo_b que está sendo bombeada em sua origem não tem necessariamente a mesma rota que a batelada b e também pode não utilizar o duto em que se encontra a batelada b . A figura 25 apresenta um exemplo em que isso ocorre. Considere que a batelada $b1$ está inteiramente no duto $D3$ e a batelada $b2$ está inteiramente no duto $D2$. Suponha, ainda, que a rota da batelada $b2$ compreenda os dutos $D2$ e $D3$, e que a terceira batelada $b3$ será bombeada em seguida e passará pelos dutos $D2$ e $D1$. Assim a rota da batelada $b3$ não contém o duto $D3$. Porém, ao ser bombeada em sua origem, ela empurrará a batelada $b2$ para o duto $D3$. A batelada $b2$, por sua vez, empurra a batelada $b1$ no duto $D3$. Logo, o bombeamento de $b3$ no duto $D2$ influencia o recebimento da batelada $b1$ no final do duto $D3$. A batelada $b1$ será recebida na mesma vazão em que $b3$ é bombeada em sua origem, ou na vazão máxima suportada pelos dutos que terão volumes deslocados através dessa operação.

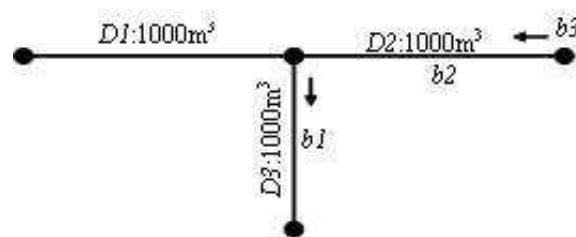


Figura 25 – Exemplo de influência de bombeamento

A pré-análise utiliza informações provenientes do bloco alocação de recursos, ou de um dos blocos de reordenação. Baseado na lista de bateladas determinada por um desses módulos, a pré-análise avalia, passo-a-passo, a batelada que será bombeada e analisa sua influência em outras bateladas que estão nos dutos. Dessa forma, a pré-análise permite que o modelo de temporização PLIM identifique condições em que a batelada pode permanecer parada nos dutos. Como resultado, o movimento da batelada ao longo da rede é analisado e frações volumétricas (partes dessa batelada) com condições de bombeio similares são identificadas. Por exemplo,

suponha que uma batelada com 10000uv tenha sido “dividida” pela pré-análise em três partes (sub-bateladas) como, por exemplo, 2000uv, 5000uv e 3000uv. Cada parte pode ter sua vazão específica. Entre cada parte, paradas podem (ou não) ocorrer. A tabela 20 apresenta alguns parâmetros determinados pela pré-análise para o cenário C3. Esses parâmetros (rótulos da tabela 20) são definidos no Apêndice D (página 231) e são utilizados no modelo de temporização PLIM para a obtenção da solução final do *scheduling* da rede de dutos.

Tabela 20 – Parâmetros determinados pela pré-análise - Cenário C3

b	d	bo_b	c_b	c_{bo}	$part_{bo,c_{bo}}$	\bar{n}_b
				...		
62	19	62	1	1	4750	12
63	22	63	1	1	246	13
63	22	63	2	2	8754	13
63	22	63	3	3	400	13
64	12	64	1	1	174	3
65	25	65	1	1	8300	6
65	3	65	1	2	1700	8
65	3	71	2	1	398	8
65	3	71	3	2	7902	8
65	3	72	4	10	398	8
65	3	72	5	11	2802	8
65	3	72	6	12	8300	8
66	12	66	1	1	174	3
66	15	66	1	2	904	9
66	15	66	2	3	174	9
67	14	67	1	1	582	10
67	8	67	1	2	1322	9
67	7	67	1	11	1200	5
67	29	67	1	12	30	12
67	8	67	2	3	30	9
67	8	67	3	4	670	9
67	8	67	4	5	30	9
67	8	67	5	6	356	9
67	8	67	6	7	30	9
67	8	67	7	8	84	9
67	8	67	8	9	30	9
67	8	67	9	10	548	9
68	1	68	1	1	820	4
68	1	68	2	2	934	4
68	1	84	5	1	436	4
				...		

Nesta tabela, pode-se visualizar pelas linhas destacadas (parâmetros em negrito), que o recebimento da batelada 65 (b) no duto 3 (d) (cuja origem do duto é o nó $\bar{n}_b=N8$) depende do bombeio das bateladas 65, 71 e 72 (bo_b) em suas origens, respectivamente. As influências ocorrem como segue:

1. O bombeio de 1700uv da parte 2 (c_{bo}) da batelada 65 (bo_b) influencia o recebimento da parte 1 (c_b) da batelada 65 (b) com o mesmo volume;

2. O bombeio de 398uv da parte 1 (c_{bo}) da batelada 71 (bo_b) influencia o recebimento da parte 2 (c_b) da batelada 65 (b) com o mesmo volume;
3. O bombeio de 7902uv da parte 2 (c_{bo}) da batelada 71 (bo_b) influencia o recebimento da parte 3 (c_b) da batelada 65 (b) com o mesmo volume;
4. O bombeio de 398uv da parte 10 (c_{bo}) da batelada 72 (bo_b) influencia o recebimento da parte 4 (c_b) da batelada 65 (b) com o mesmo volume;
5. O bombeio de 2802uv da parte 11 (c_{bo}) da batelada 72 (bo_b) influencia o recebimento da parte 5 (c_b) da batelada 65 (b) com o mesmo volume; e
6. O bombeio de 8300uv da parte 12 (c_{bo}) da batelada 72 (bo_b) influencia o recebimento da parte 6 (c_b) da batelada 65 (b) com o mesmo volume.

Essa abordagem permite a determinação de parâmetros auxiliares para o modelo PLIM. Utilizando as informações da conexão entre o bombeio de uma batelada com as outras que terão seu deslocamento influenciados por esse bombeio, o modelo de Temporização pode ser construído mais facilmente. Um exemplo (página 147) é detalhado no capítulo seguinte para clarificar a conexão entre a pré-análise e o modelo de temporização PLIM. Além disso, a complexidade das restrições temporais pode variar de acordo com o cenário, sendo que o bloco pré-análise auxilia na descrição destas restrições inclusas no modelo de temporização PLIM.

Algumas inconsistências relacionadas em modelos de Felizari *et al.* (2007), Neves-Jr *et al.* (2007b, 2007a), como a dificuldade no cálculo de tempos quando diversas bateladas utilizam um mesmo trecho de duto, são solucionadas nesta abordagem devido à utilização da pré-análise. Detalhes a respeito da conexão entre a pré-análise e o modelo de temporização PLIM são apresentados no capítulo seguinte, quando são definidas as restrições do modelo de *scheduling* proposto. Uma descrição detalhada a respeito da pré-análise pode ser encontrado em Czaikowski *et al.* (2008).

7.5 CONCLUSÕES

Esse capítulo apresentou todos os blocos auxiliares que são (ou podem ser) utilizados para a obtenção do *scheduling* final da rede de dutos. Dentre os blocos apresentados nesse capítulo, a alocação de recursos heurística é necessária para a construção de uma lista de bateladas em um tempo computacional viável. Os blocos de reordenação da lista inicial proposta pela alocação de recursos podem ou não ser utilizados. Na presente tese, não foi utilizado nenhum

bloco de reordenação, já que esses métodos fazem parte do foco do trabalho de Felizari (2009) e Yamamoto *et al.* (2007a, 2007b).

Finalmente, a pré-análise é realizada em uma etapa anterior ao modelo de temporização PLIM, o qual será apresentado no capítulo seguinte. Esse bloco é imprescindível para a obtenção do *scheduling* da rede de dutos, já que o modelo de temporização PLIM foi construído utilizando os parâmetros calculados pela pré-análise.

Para os cenários da rede de dutos apresentados nos capítulos anteriores (C1 a C8 - vide tabelas 12 e 16), a execução da alocação de recursos heurística juntamente com a pré-análise utiliza menos de trinta segundos¹ para a geração dos parâmetros a serem utilizados no modelo de temporização PLIM (Capítulo 8). Somado ao tempo computacional do modelo de planejamento PLIM (Capítulo 5), todos os blocos anteriores ao modelo de temporização PLIM (Planejamento PLIM, Alocação Heurística e Pré-análise) apresentam soluções em menos de um minuto, para todos os cenários avaliados.

¹computador Intel Core 2 Duo 6400, 2.13 GHz, 3GB RAM

8 MODELO PLIM DE TEMPORIZAÇÃO - *SCHEDULING*

8.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta um modelo PLIM de temporização para o cálculo dos tempos de início e fim de bombeamentos e recebimentos, bem como os tempos de paradas de bombeamentos para a rede de dutos em estudo. A temporização das bateladas é calculada considerando várias restrições operacionais, respeitando instantes onde operações de bombeamentos e recebimentos são proibidas, considerando limitações físicas da rede através do uso de restrições locais, além de considerar a satisfação de estoques através do uso de janelas de tempo. A temporização é realizada utilizando dados previamente calculados pelos blocos anteriormente apresentados. Como resultado final, retorna-se o *scheduling* da rede de dutos.

8.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS

O modelo de temporização utiliza técnicas de programação linear inteira mista (PLIM) com uma abordagem em tempo contínuo. As considerações gerais utilizadas para formular o modelo são enumeradas a seguir:

1. Durante o horizonte de *scheduling*, toda produção e demanda para cada produto e área é determinada previamente. Assim, o volume total a ser movimentado de cada produto (determinado pelo modelo de planejamento PLIM) deve ser dividido em volumes menores (bateladas), para que sejam enviadas. A divisão dos volumes em bateladas é realizada pela Alocação de Recursos.
2. Os produtos podem ser bombeados a partir de diferentes áreas. Para cada área, é determinado um número de bateladas a ser enviado. Todas as bateladas da rede de dutos devem ser ordenadas em uma lista (sequenciamento das bateladas). A sequência de bateladas é gerada de acordo com o horizonte de *scheduling*. Essa tarefa é primeiramente realizada pela Alocação de Recursos. Uma melhora na ordenação pode ainda ser obtida utilizando reordenação heurística ou PLIM.

3. O volume da batelada para cada produto deve corresponder ao volume da capacidade de tanques disponíveis na área de origem/destino, ou igual ao volume de um duto específico da rota desta batelada.
4. Dentro das práticas operacionais, existem rotas preferenciais para cada produto a ser enviado. As rotas utilizadas por cada produto são selecionadas pelo modelo de planejamento PLIM.
5. A lista de bateladas contém: o produto alocado a ela, a rota utilizada, o volume da batelada a ser enviada e as janelas de tempo calculadas. Esses são os dados de entrada supridos pela Alocação de Recursos.
6. Para cada produto, duto e sentido de bombeio, existem limites de vazão mínimos e máximos. Essa vazão dos produtos que estão nos dutos influencia o bombeio de bateladas que serão bombeadas em suas origens e deslocarão esses produtos. Com o *link* realizado pela pré-análise da batelada que é bombeada na origem (bo_b) com a batelada que será recebida (b), é possível fazer com que o bombeio de uma batelada respeite os limites de vazão das bateladas que serão movimentadas nos dutos¹.
7. Na operação pulmão, uma batelada pode ser recebida a uma vazão específica em um tanque e simultaneamente ser bombeada desse tanque para outro duto com vazão diferente, ou não. Para considerar a operação de pulmão, a rota da batelada é dividida em duas rotas. A primeira rota contém a área de origem até a área intermediária em que existe o tanque que será utilizado para a operação pulmão e a segunda rota contém a área intermediária até a área de destino final.
8. Em dutos onde ocorrem a reversão de fluxo, procedimentos específicos são requeridos para executar essa condição operacional. Para implementar a reversão de fluxo, um conjunto de bateladas é bombeado em uma direção. Após, é necessário inserir uma batelada auxiliar com o mesmo volume do duto considerado para empurrar as bateladas que preenchem o duto. A direção de bombeio pode então ser revertida e os produtos podem ser bombeados na direção inversa. A batelada auxiliar que foi utilizada para executar a reversão de fluxo deve ser especificada *a priori*, quando as bateladas são sequenciadas.
9. As restrições locais são consideradas no modelo de temporização, sendo satisfeitas durante o horizonte de *scheduling*.
10. Os tanques são considerados de forma agregada por área e produto. Os níveis de inventário podem ser incrementados ou decrementados de acordo com o volume e vazão de cada

¹A seção 7.4 explora essas funcionalidades da Pré-Análise.

produto recebido, enviado, ou devido às taxas de produção e consumo local, dentro dos limites operacionais. Os limites mínimos e máximos de inventário em cada área são respeitados no modelo PLIM através das janelas de tempo. Considera-se que, se o modelo PLIM satisfaz às janelas de tempo previamente calculadas, as restrições de inventário serão também satisfeitas.

11. Os dutos sempre operam completamente preenchidos e possuem volumes não desprezíveis (vide tabela 7, página 79). Logo, eles podem armazenar produtos durante os procedimentos de envio. Esses produtos podem ser enviados para tanques ou direcionados para outros trechos de dutos.
12. Todas as bateladas previamente armazenadas nos dutos no início do horizonte de planejamento (bateladas em trânsito) são consideradas e apresentadas no início da lista de bateladas suprida pela Alocação de Recursos Heurística (inicialização da rede). O modelo de temporização calcula, portanto, os tempos de recebimento destas bateladas que já foram bombeadas.
13. Todo produto que está sendo enviado tem seu próprio destino e, produtos armazenados nos dutos devem ser enviados para seu destino pré-determinado.
14. Quando uma batelada b é bombeada a uma vazão vaz_b a partir de sua área de origem, os produtos previamente armazenados nos dutos são deslocados de acordo com a vazão de bombeio da batelada b .
15. Durante o horizonte de planejamento, o bombeio deve ser periodicamente interrompido, em algumas áreas operacionais, por causa de restrições de custo elétrico (STEBEL, 2006).

Ressalta-se que, conforme a figura 17 (página 89), o modelo de alocação PLIM está inserido em uma abordagem hierarquizada de solução (figura 26). Alocação de volume às bateladas e determinação da quantidade de volume movimentada foram tratadas nos módulos já apresentados.



Figura 26 – Modelo PLIM de temporização (agregado)

Grande parte dos dados de entrada do modelo PLIM é obtida através da tabela oriunda da Pré-análise (ex: tabela 20). A principal diferença na abordagem desse modelo em relação a trabalhos anteriores como, por exemplo, Felizari *et al.* (2007), Neves-Jr *et al.* (2007b, 2007a), deve-se à consideração de paradas de bombeamento. Tal consideração agrega precisão à determinação dos tempos de recebimento das bateladas em destinos intermediários e finais. Pode-se obter, inclusive, momentos em que o duto estará parado. É possível identificar a quantidade de cada volume de batelada bombeado ou recebido através dos dados de entrada passados pela Pré-análise. Além disso, a pré-análise informa a ordenação em que as operações são realizadas, através da conexão entre as bateladas de bombeamento que influenciam o recebimento de outras bateladas que, por sua vez, estão sendo recebidas nas áreas adjacentes aos dutos. Enquanto um produto é bombeado a partir de uma área de origem, produtos previamente armazenados nos dutos ao longo da rota são empurrados com a vazão imposta por esta nova batelada.

A figura 27 ilustra essas afirmações. O primeiro duto apresenta os blocos temporais de bombeio das bateladas, enquanto o segundo, apresenta os blocos temporais de recebimento. Pelo recebimento, é possível perceber que a batelada 68 contém 2 blocos temporais e há um instante em que essa batelada fica parada. Isso acontece porque, em um primeiro momento, a batelada 84 é bombeada para o duto 1 influenciando o recebimento do primeiro pedaço da batelada 68. O segundo pedaço da batelada 68 é deslocado pela influência de bombeio da batelada 92 que acontece algumas horas mais tarde e força essa parada de recebimento entre pedaços de uma mesma batelada.

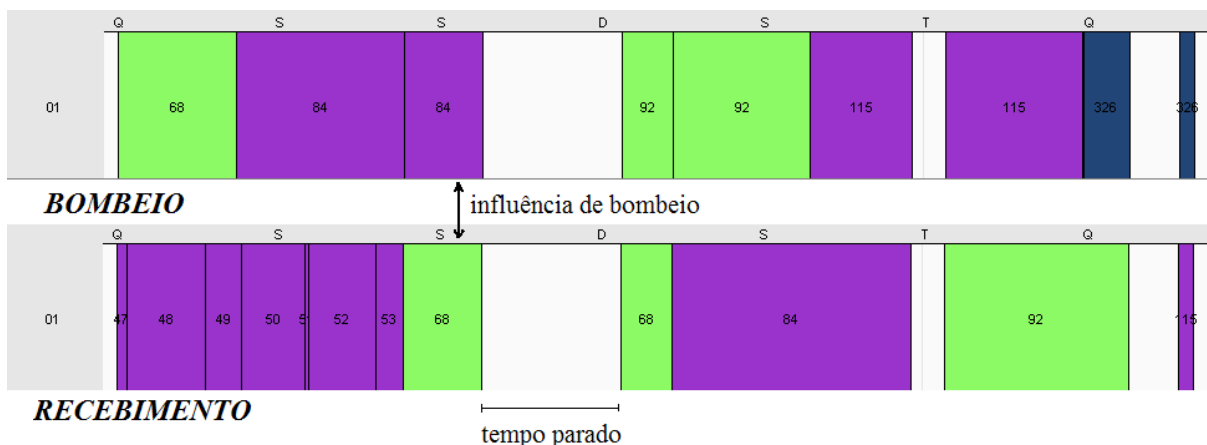


Figura 27 – Exemplo de parada no recebimento de uma batelada

Várias restrições operacionais são implementadas, orientando a correta temporização das operações a serem programadas, conforme detalha-se nas próximas seções.

8.3 NOTAÇÃO

A notação adotada para a formulação do modelo matemático é indispensável para entendimento do modelo e é apresentada no Apêndice E (página 233). Notações apresentadas previamente podem eventualmente ser utilizadas nesse capítulo. Os volumes são representados por unidades de volume genéricas (uv).

A criação dos índices de volumes (c) para cada batelada (b) tornou-se necessária para identificação de paradas de bombeamento de uma determinada batelada e mudança na vazão de deslocamento. Dessa forma, é possível obter todos intervalos de bombeamento e recebimento que ocorrem para uma mesma batelada, conforme ilustrado na figura 27.

8.4 FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo, dada pela expressão 86, envolve os seguintes fatores:

Fator 1 Otimização do tempo de envio dos produtos, para que sejam efetuados dentro do horizonte de planejamento. Caso operações de envio de bateladas ocorram fora do horizonte previamente determinado, a variável de violação do horizonte $vh_{oriz_{b,\bar{n},n,d,c}}$ assumirá valor diferente de zero e será penalizada;

Fator 2 Minimização das violações das janelas de tempo de capacidade. Caso as janelas de tempo de capacidade sejam violadas, provavelmente ocorrerá a violação nos limites de inventário. Dessa forma, um peso kc pode ser definido de forma a penalizar a solução em relação a atrasos ou adiantamentos de bombeamento/recebimento em relação às áreas de origem/destino. Desta forma, quanto maior o fator kc , maior importância é dada às variáveis que calculam as violações das janelas de tempo de capacidade. Além disso, as variáveis de violação são ponderadas pelo volume do pedaço da batelada ($part_{b,c}$) dando mais importância a violações cujo volume dos pedaços são maiores;

Fator 3 Minimização das violações das janelas de tempo cortadas. Assim como as janelas de tempo de capacidade, as janelas de tempo cortadas poderão sofrer violação. Essas janelas são calculadas considerando o tempo de deslocamento ideal da batelada nos dutos da rede, obtendo-se as janelas de tempo ideais para que ocorram as movimentações. Caso as janelas de tempo cortadas sejam violadas, um peso k ($k < kc$) pode ser definido de forma a penalizar a solução em relação a atrasos ou adiantamentos de bombeamento/recebimento em relação às áreas de origem/destino. Desta forma, quanto maior o fator k maior importância é dada às variáveis que calculam as violações das janelas de tempo cortadas.

Porém, importância maior deverá ser dada às janelas de tempo de capacidade, onde é verificado os limites de inventário. As variáveis de violação são também ponderadas pelo volume do pedaço da batelada ($part_{b,c}$), dando mais importância a violações cujo volume dos pedaços são maiores;

Fator 4 Penalização da solução em relação às violações de operações pulmão. As variáveis de relaxação $rpulm$ foram adicionadas para que o bombeio de bateladas nas áreas de pulmão ocorram o mais próximo possível do tempo de recebimento do produto nestes órgãos (casos de bombeio imediato). Dessa forma, problemas nos estoques das áreas de pulmão são evitados, já que a tancagem nessas áreas é limitada.

8.5 RESTRIÇÕES GERAIS

O modelo de otimização deve satisfazer uma série de restrições operacionais. Várias restrições são implementadas para o cálculo dos tempos das atividades de transferência. Restrições temporais são adicionadas para interconectar as variáveis temporais, calculando os tempos em que cada volume de um pedaço de uma batelada será deslocado nos dutos.

minimizar

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\sum_{b \in B} \sum_{\bar{n} \in N} \sum_{n \in N} \sum_{d \in D} \sum_{c \in PB_{b,\bar{n},n,d}}}_{\text{Fator 1}} v_{horiz_{b,\bar{n},n,d,c}} \\
& + k \cdot \sum_{b \in B} \sum_{no_b \in N} \sum_{c \in PB_{b,no_b,n,d}} (ao_{b,no_b,c} \cdot part_{b,c} + do_{b,no_b,c} \cdot part_{b,c}) \\
& \quad + k \cdot \sum_{b \in B} \sum_{nd_b \in N} \sum_{c \in PB_{b,\bar{n},nd_b,d}} (ad_{b,nd_b,c} \cdot part_{b,c} + dd_{b,nd_b,c} \cdot part_{b,c}) \\
& \underbrace{\hspace{15em}}_{\text{Fator 2}} \\
& + kc \cdot \sum_{b \in B} \sum_{no_b \in N} \sum_{c \in PB_{b,no_b,n,d}} (aoc_{b,no_b,c} \cdot part_{b,c} + doc_{b,no_b,c} \cdot part_{b,c}) \\
& \quad + kc \cdot \sum_{b \in B} \sum_{nd_b \in N} \sum_{c \in PB_{b,\bar{n},nd_b,d}} (adc_{b,nd_b,c} \cdot part_{b,c} + ddc_{b,nd_b,c} \cdot part_{b,c}) \\
& \underbrace{\hspace{15em}}_{\text{Fator 3}} \\
& + kp \cdot \sum_{b \in B} \sum_{\bar{b} \in B} \sum_{c \in PB_{b,\bar{n},n,d}} \sum_{\bar{c} \in PB_{\bar{b},\bar{n},n,d}} (rpulm^1_{b,\bar{b},c,\bar{c}} + rpulm^2_{b,\bar{b},c,\bar{c}} + \\
& \quad \underbrace{\hspace{15em}}_{\text{Fator 4}} rpulm^3_{b,\bar{b},c,\bar{c}} + rpulm^4_{b,\bar{b},c,\bar{c}})
\end{aligned} \tag{86}$$

As características operacionais de cada área devem ser consideradas pelo modelo. O número de recebimento e envio simultâneos em um determinado nó é limitado por conjuntos compartilhados de bombas e válvulas disponíveis. Por exemplo, na figura 12 (página 79), produtos podem ser enviados de N12 através dos dutos 5, 6, 7, 9, 17, 18, 19, 20 e 29. Contudo, esta área em específico possui recursos para bombear apenas uma batelada em um dado instante de tempo². Numa situação hipotética em que várias bateladas são enviadas a partir de N12, o modelo deve gerenciar os inícios e finais de bombeamento, respeitando as características locais de cada área. De maneira semelhante, os dutos podem sofrer reversão de fluxo, se for conveniente à operação da rede. Para tratar estas condições de reversão de dutos, considerações adicionais na geração das restrições são realizadas.

Por fim, outras restrições identificam quais bateladas sofrerão aumento no tempo de bombeamento (ou adiamento do início de bombeamento) devido à horossazonalidade de algumas áreas. Gerenciar tais situações em escalonamento de dutos é uma tarefa complexa, como abordam os trabalhos de Magatão (2005) e Stebel (2006).

Restrições específicas foram criadas de forma a atender o gerenciamento de inventários. O módulo Alocação de recursos heurística fornece janelas de tempo associadas a cada batelada (ex: janelas de tempo de capacidade). O modelo matemático procura então gerenciar o *scheduling* das atividades de envio e recebimento nas diversas áreas da rede, respeitando os limites temporais previamente calculados. Algumas violações das janelas de tempo podem ser aceitas em relação às operações de envio na origem ($ao_{b,no_b,c}$, $do_{b,no_b,c}$) ou recebimento no destino final ($ad_{b,nd_b,c}$, $dd_{b,nd_b,c}$), mas são indesejáveis, sendo penalizadas na função objetivo. Nesse caso, valores diferentes de zero são atribuídos a essas variáveis que violam os tempos sugeridos.

As restrições são construídas no modelo de otimização aqui proposto, considerando uma correspondência uma-a-uma entre uma parte específica da batelada que está bombeando (bo_b) em sua área de origem com outra batelada (b) que é movimentada em um duto por esse procedimento de bombeio. Essa correspondência uma-a-uma é fornecida pelos resultados obtidos através da pré-análise (seção 7.4), e será também exemplificada na tabela 21 (página 147).

8.5.1 Restrição de satisfação do horizonte

Como descrito na função objetivo, o primeiro item a ser otimizado envolve os tempos de envio dos produtos, para que sejam efetuados dentro do horizonte de planejamento. Dessa

²na operação de passagem quando N12 é uma área intermediária da rota, ou seja, não é uma origem de bombeio, não há restrição

forma, a restrição 87 identifica possíveis bombeamentos que ocorram fora do horizonte de planejamento, através da variável de violação $v_{horiz_{b,\bar{n},n,d,c}}$.

$$fb_{b,\bar{n},n,d,c} - v_{horiz_{b,\bar{n},n,d,c}} \leq H \quad \forall b \in B, \{\bar{n}, n\} \in N, d \in D, c \in PB_{b,\bar{n},n,d} \quad (87)$$

8.5.2 Restrições de sequenciamento

As restrições 88 e 89 determinam a precedência temporal entre volumes c de uma mesma batelada b para as variáveis de envio e recebimento.

$$\begin{aligned} ib_{b,\bar{n},n,d,c} &\geq fb_{b,\bar{n},n,d,c-1} \\ \forall b \in B, \{\bar{n}, n\} \in N, d \in D, c \in PB_{b,\bar{n},n,d} \mid c > npb_{b,\bar{n},n,d}^{min} \end{aligned} \quad (88)$$

$$\begin{aligned} ir_{b,\bar{n},n,d,c} &\geq fr_{b,\bar{n},n,d,c-1} \\ \forall b \in B, \{\bar{n}, n\} \in N, d \in D, c \in PR_{b,\bar{n},n,d} \mid c > npr_{b,\bar{n},n,d}^{min} \end{aligned} \quad (89)$$

A restrição 90 identifica em que instante ocorrerá o término do bombeamento de todas as bateladas sequenciadas em suas respectivas origens, inclusive as origens que páram no período horossazonal. Além do início de bombeamento da batelada e do tempo para bombear todo o volume com índice c , a restrição também considera o tempo em que a batelada permanecerá parada na origem devido ao horário de ponta. Esse tempo que a batelada pára por questões horossazonais, é adicionado ao tempo de bombeamento, permanecendo assim, inserido no bloco temporal ($fb - ib$).

$$fb_{b,no_b,n,d,c} \geq ib_{b,no_b,n,d,c} + \frac{part_{b,c}}{vaz_{prod_b,no_b,d}^{max}} + \omega \cdot \sum_{h \in HP} z_{b,c,no_b,h} \quad (90)$$

$$\forall b \in B, \{no_b, n\} \in N, d \in D, prod_b \in P, c \in PB_{b,no_b,n,d}$$

A flexibilização da vazão no modelo de temporização (entre valores mínimos e máximos) possibilita, quando necessário, uma diminuição do valor máximo sugerido. Isto viabiliza, por exemplo, o atraso do recebimento de alguma batelada para que ocorra o atendimento de sua janela de tempo de recebimento. Testes exaustivos têm demonstrado que esta abordagem tende a diminuir a soma das violações das janelas de tempo e, conseqüentemente, a incidência de vio-

lação nos limites de estocagem diminui. Dessa forma, a restrição 91 complementa a restrição 90, possibilitando que o tempo de envio seja calculado entre os limites de vazões máximo e mínimo.

$$fb_{b,no_b,n,d,c} \leq ib_{b,no_b,n,d,c} + \frac{part_{b,c}}{vaz_{prod_b,no_b,d}^{min}} + \omega \cdot \sum_{h \in HP} z_{b,c,no_b,h} \quad (91)$$

$$\forall b \in B, \{no_b, n\} \in N, d \in D, prod_b \in P, c \in PB_{b,no_b,n,d}$$

Para ilustrar a conexão entre os parâmetros da pré-análise usados neste modelo, um exemplo, baseado na tabela 21, é apresentado. A tabela 21 mostra exemplos de parâmetros determinados pela pré-análise. Analisando os dados, é possível notar que o bombeio da batelada 40 (bo_b) foi dividido em quatro partes ($c_{bo} = 1, 2, 3, 4$). Cada parte da batelada 40 influencia o recebimento (ou deslocamento) de uma ou mais bateladas que estão nos dutos da rede. Por exemplo, observando-se as linhas 2 e 3 da tabela 21 e a figura 28, nota-se que a segunda parte ($c_{bo} = 2$) bombeada da batelada 40 com 300uv ($part_{bo,c_{bo}}$) causa:

- o recebimento do mesmo volume da parte 2 (c) da batelada 14 (b) ao final do duto 18 (d), em sua área de destino;
- o deslocamento da parte 1 (c) da batelada 24 (b) (com o mesmo volume) do duto 5 (d) para outro duto (nesse caso, duto 18).

Assim, quando menciona-se que o bombeio de uma parte influencia o recebimento de outra parte com o mesmo volume, está implícito que o balanço de massa do duto é respeitado. O tempo de recebimento, ou de bombeio para o próximo duto, pode ser calculado, portanto, pela divisão do volume bombeado $part_{bo_b,c_{bo}}$ pela vazão do duto que passará o produto da batelada b (que pode variar de $vaz_{prod_b,\bar{n},d1}^{min}$ até $vaz_{prod_b,\bar{n},d1}^{max}$). Essa vazão limitará o bombeio da batelada bo_b em sua origem.

Tabela 21 – Exemplo de parâmetros determinados pela pré-análise

b	d	bo_b	c	c_{bo}	$part_{bo,c_{bo}}$	\bar{n}_b
14	18	40	1	1	1700	N12
14	18	40	2	2	300	N12
24	5	40	1	2	300	N11
24	5	40	2	3	1700	N11
24	5	40	3	4	350	N11
24	5	41	4	1	3350	N11

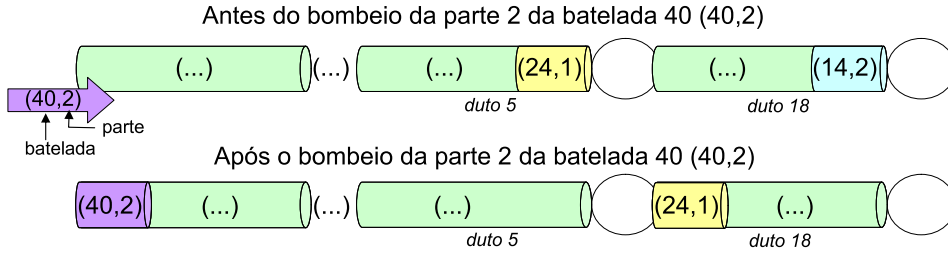


Figura 28 – Exemplo de movimentos pelo bombeio da batelada 40

Com base no exemplo ilustrado pela figura 28, pode-se construir as inequações 92 e 93. Essas restrições indicam o tempo de envio em áreas intermediárias. O final do envio (fb) da batelada b é calculado considerando seu início de bombeamento no mesmo duto, adicionado ao tempo de bombeamento de uma outra batelada bo_b que influencia seu deslocamento (ex: tabela 21). Logo, deve-se considerar que a duração do intervalo de tempo da parte c da batelada b que irá para outro duto $d1$ (um duto intermediário na rota da batelada b) e o bombeio da parte c_{bo} da batelada bo_b na área de origem no_{bo} , causa o movimento da parte (b, c) . A batelada bo_b pode ainda permanecer parada por questões horossazonais, acrescentando, portanto, ω horas no bloco temporal $(fb - ib)$ da batelada b .

$$fb_{b,\bar{n},n1,d1,c} \leq ib_{b,\bar{n},n1,d1,c} + \frac{part_{bo_b,c_{bo}}}{vaz_{prod_b,\bar{n},d1}^{min}} + \omega \cdot \sum_{h \in HP} z_{bo_b,c_{bo},no_{bo},h} \quad (92)$$

$$\forall \{b, bo_b\} \in B, \{no_{bo}, n, \bar{n}, n1\} \in N, \{d, d1\} \in D, \\ prod_b \in P, c \in PB_{b,\bar{n},n1,d1}, c_{bo} \in PB_{bo_b,no_{bo},n,d}$$

$$fb_{b,\bar{n},n1,d1,c} \geq ib_{b,\bar{n},n1,d1,c} + \frac{part_{bo_b,c_{bo}}}{vaz_{prod_b,\bar{n},d1}^{max}} + \omega \cdot \sum_{h \in HP} z_{bo_b,c_{bo},no_{bo},h} \quad (93)$$

$$\forall \{b, bo_b\} \in B, \{no_{bo}, n, \bar{n}, n1\} \in N, \{d, d1\} \in D, \\ prod_b \in P, c \in PB_{b,\bar{n},n1,d1}, c_{bo} \in PB_{bo_b,no_{bo},n,d}$$

O tempo de início de recebimento de uma batelada b é obtido através do tempo de início do bombeamento de uma outra batelada bo_b em sua origem no_{bo} , que influencia seu recebimento no nó $n1$ (restrição 94).

$$ir_{b,\bar{n},n1,d1,c} = ib_{bo_b,no_{bo},n,d,c_{bo}}$$

$$\begin{aligned} \forall \{b, bo_b\} \in B, \{no_{bo}, n, \bar{n}, n1\} \in N, \{d, d1\} \in D, \\ c \in PR_{b,\bar{n},n1,d1}, c_{bo} \in PB_{bo_b,no_{bo},n,d} \end{aligned} \quad (94)$$

A restrição referente ao tempo de final de recebimento de uma batelada b deve ser adicionada para a conservação de massa. Ela impede que o bombeio da batelada bo_b ocorra a uma vazão e o recebimento de b aconteça com uma vazão distinta (restrição 95).

$$fr_{b,\bar{n},n1,d1,c} = fb_{bo_b,no_{bo},n,d,c_{bo}}$$

$$\begin{aligned} \forall \{b, bo_b\} \in B, \{no_{bo}, n, \bar{n}, n1\} \in N, \{d, d1\} \in D, \\ c \in PR_{b,\bar{n},n1,d1}, c_{bo} \in PB_{bo_b,no_{bo},n,d} \end{aligned} \quad (95)$$

As inequações 96 e 97 dizem respeito ao cálculo do tempo de final de recebimento de uma batelada b no nó $n1$. O final de recebimento ocorrerá após o início do recebimento, somado o tempo de bombeamento da batelada bo_b , que é bombeada no nó no_{bo} , influenciando seu recebimento. As paradas por horossazonal nas bateladas bo_b que influenciam o recebimento da batelada b no nó $n1$ são também consideradas.

$$fr_{b,\bar{n},n1,d1,c} \leq ir_{b,\bar{n},n1,d1,c} + \frac{part_{bo_b,c_{bo}}}{vaz_{prod_b,\bar{n},d1}^{min}} + \omega \cdot \sum_{h \in HP} z_{bo_b,c_{bo},no_{bo},h} \quad (96)$$

$$\begin{aligned} \forall \{b, bo_b\} \in B, \{no_{bo}, n, \bar{n}, n1\} \in N, \{d, d1\} \in D, \\ prod_b \in P, c \in PR_{b,\bar{n},n1,d1}, c_{bo} \in PB_{bo_b,no_{bo},n,d} \end{aligned}$$

$$fr_{b,\bar{n},n1,d1,c} \geq ir_{b,\bar{n},n1,d1,c} + \frac{part_{bo_b,c_{bo}}}{vaz_{prod_b,\bar{n},d1}^{max}} + \omega \cdot \sum_{h \in HP} z_{bo_b,c_{bo},no_{bo},h} \quad (97)$$

$$\begin{aligned} \forall \{b, bo_b\} \in B, \{no_{bo}, n, \bar{n}, n1\} \in N, \{d, d1\} \in D, \\ prod_b \in P, c \in PR_{b,\bar{n},n1,d1}, c_{bo} \in PB_{bo_b,no_{bo},n,d} \end{aligned}$$

A sequência de bombeamento pré-estabelecida deve ser respeitada. Ou seja, os bombeamentos e recebimentos, não só nas origens mas também nos órgãos intermediários, devem

ocorrer em ordem, conforme carteira de bateladas disponibilizada pelo bloco alocação de recursos ou reordenação. A restrição 98 viabiliza essa precedência temporal entre diferentes bateladas, fazendo com que uma batelada \bar{b} comece a ser bombeada em um duto d após a batelada anterior b terminar o seu bombeamento.

$$ib_{\bar{b},\bar{n}1,n1,d,\bar{c}} \geq fb_{b,\bar{n},n,d,c} \quad (98)$$

$$\forall (b, \bar{b}, d) \in BBD, \{\bar{n}, n, \bar{n}1, n1\} \in N,$$

$$c \in PB_{b,\bar{n},n,d} \mid c = npb_{b,\bar{n},n,d}^{max} \text{ e } \bar{c} \in PB_{\bar{b},\bar{n}1,n1,d} \mid \bar{c} = npb_{\bar{b},\bar{n}1,n1,d}^{min}$$

As áreas inicial ($\bar{n}, \bar{n}1$) e final ($n, n1$) para cada batelada (b e \bar{b}) podem ser diferentes. Ambas as condições devem ser consideradas ($\bar{n} \neq n$ ou $\bar{n} = n$) para viabilizar a operação de reversão de fluxo do duto d (ex: tabela 22).

Tabela 22 – Possibilidades de movimentos entre \bar{n} e n em um duto d

b	\bar{n}	n	d
1,2	N8	N7	3
3	N8	N8	3
4	N7	N8	3
5	N7	N7	3

A figura 29 também ilustra o procedimento de reversão de fluxo para a tabela 22. O caso (a) apresenta as bateladas 1 e 2 dentro do duto em um instante inicial. Os casos (b) e (c) mostram o bombeio da batelada auxiliar 3 deslocando as bateladas 1 e 2 em direção à N7. O caso (d) apresenta a ocupação de todo o duto pela batelada 3. Após esse momento, a reversão de fluxo inicia. Finalmente, os casos (e) e (f) ilustram o duto operando com fluxo inverso e o movimento da batelada 4 em direção à N8, sendo deslocada pela batelada auxiliar 5.

O início de bombeamento de uma batelada b em um nó intermediário n deve ocorrer quando esta batelada b começa a ser recebida nessa mesma área n . O alinhamento dos dutos da rota da batelada b deve ser realizado, e a tancagem no nó n , neste caso, não é utilizada. Assim, ao receber a batelada, esta é alinhada a outro duto, iniciando imediatamente seu bombeamento. A equação 99 impõe esta condição. A desigualdade não pode ser aqui considerada ($ib \neq ir$) pois, neste caso, o recebimento da batelada b poderia ocorrer, por exemplo, antes do início do bombeamento, forçando a utilização de tanques para armazenar os produtos na área intermediária n .

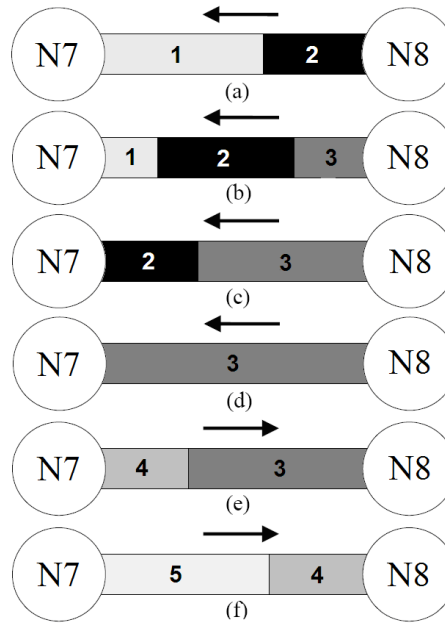


Figura 29 – Exemplo de reversão de fluxo

$$ib_{b,n,n1,d1,c} = ir_{b,\bar{n},n,d,c}$$

$$\forall b \in B, \{\bar{n}, n, n1\} \in N \mid \bar{n} \neq n1, \{d, d1\} \in D, \quad (99)$$

$$c \in PB_{b,n,n1,d1} \cap PR_{b,\bar{n},n,d}$$

De forma similar à restrição 99, a restrição 100 identifica o final de bombeamento de uma batelada em um nó intermediário n , que deve ocorrer em tempo igual ao tempo de final de recebimento nessa área n . Essa restrição 100 identifica o instante final do alinhamento da batelada b em dutos distintos.

$$fb_{b,n,n1,d1,c} = fr_{b,\bar{n},n,d,c}$$

$$\forall b \in B, \{\bar{n}, n, n1\} \in N \mid \bar{n} \neq n1, \{d, d1\} \in D, \quad (100)$$

$$c \in PB_{b,n,n1,d1} \cap PR_{b,\bar{n},n,d}$$

8.5.3 Restrições de pulmão

Para tratar casos de pulmão, a rota de uma batelada é separada em, ao menos, duas rotas complementares. Uma rota compreende a origem onde será ofertado o produto até a área onde ocorrerá o pulmão. A última rota envolve a área onde ocorrerá o pulmão até o destino

final.

A figura 30 apresenta um exemplo onde a rota de um produto contém as áreas **A**, **B** e **C**, respectivamente. Ou seja, o produto deve ser enviado de **A** para **C** passando pela área **B**. Porém, como o duto entre **A** e **B** suporta vazão inferior ao duto entre **B** e **C**, é recomendado fazer a operação pulmão em **B**. Logo, uma batelada \bar{b} é sequenciada utilizando uma rota com origem em **A** e destino em **B**, e outra batelada b é sequenciada³ utilizando a rota com origem em **B** e destino em **C**.

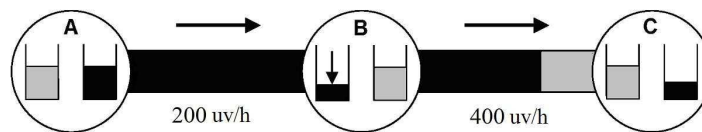


Figura 30 – Exemplo de pulmão

Desse modo, é necessário elaborar restrições para estabelecer conexão entre essas duas rotas. É necessário que os tempos de recebimento na área de pulmão e envio para o destino final ocorram de forma coerente. O bloco Alocação de recursos cria o sequenciamento das bateladas de pulmão de modo que as duas bateladas que utilizam as duas rotas de pulmão permaneçam juntas na carteira. Ou seja, as bateladas \bar{b} e b terão a relação:

- Os produtos das bateladas \bar{b} e b devem ser iguais: $prod_b = prod_{\bar{b}}$;
- O nó de origem da batelada b deve ser igual ao nó de destino da batelada \bar{b} : $no_b = nd_{\bar{b}}$;
- O volume das bateladas \bar{b} e b devem ser iguais: $vol_b = vol_{\bar{b}}$;
- O tempo de envio disponível (das janelas cortadas) das bateladas \bar{b} e b devem ser iguais:
 $ted_b^{cut} = ted_{\bar{b}}^{cut}$;
- O tempo de envio crítico (das janelas cortadas) das bateladas \bar{b} e b devem ser iguais:
 $tec_b^{cut} = tec_{\bar{b}}^{cut}$;
- A tupla $(no_b, prod_b)$ deve pertencer ao conjunto PLM .

Além disso, as restrições de pulmão foram divididas em 2 grupos:

1. Áreas de pulmão que podem fazer tancagem intermediária: existe a possibilidade de armazenar o produto no órgão intermediário e bombear o produto em um momento posterior.

³mesma batelada \bar{b} , porém é criado outro identificador de batelada, pois não é possível atribuir a uma mesma batelada duas rotas distintas

2. Áreas de pulmão que devem fazer bombeio imediato: quando um produto é recebido na área de pulmão, ele deve ser bombeado o mais breve possível por causa de limitações na tancagem.

Porém, como a pré-análise considera que não há nenhuma conexão entre as bateladas \bar{b} e b , os volumes calculados pela pré-análise $part_{b,c}$ e $part_{\bar{b},\bar{c}}$ podem ser, e na maioria dos casos são, de tamanhos diferentes, dificultando o processo de modelagem. O cálculo das restrições de pulmão faz uso do cálculo do volume recebido na área de pulmão, a partir dessas frações volumétricas. Caso o volume das frações volumétricas recebidas na área ($part_{b,c}$) seja maior que o volume da fração volumétrica a ser enviada ($part_{\bar{b},\bar{c}}$), o bombeio na área intermediária poderá ser realizado. A equação 101 verifica essa condição:

$$\sum_{c'=npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{\min}}^{\bar{c}} part_{\bar{b},c'} \geq \sum_{c'=npb_{b,no_b,n,d}^{\min}}^c part_{b,c'} \quad (101)$$

Como o volume dos pedaços que chegam a um órgão de pulmão pode diferir do volume que é bombeado a partir desse órgão, as restrições de início de bombeio são divididas em três casos:

1. O bombeio do primeiro pedaço da batelada b (ou seja, pedaço $c = npb_{b,no_b,n,d}^{\min}$) ocorre quando é realizado o recebimento do primeiro pedaço da batelada \bar{b} (ou seja, pedaço $\bar{c} = npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{\min}$). Nesse caso o volume c de bombeio de b é menor ou igual ao volume \bar{c} recebido de \bar{b} . A figura 31 ilustra esse caso. Assim, tem-se: $part_{\bar{b},\bar{c}} \geq part_{b,c}$, onde $\bar{c} = npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{\min}$ e $c = npb_{b,no_b,n,d}^{\min}$.

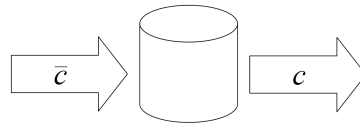


Figura 31 – Exemplo de pulmão - Caso 1: $part_{\bar{b},\bar{c}} \geq part_{b,c}$

2. O bombeio do primeiro pedaço da batelada b (ou seja, pedaço $c = npb_{b,no_b,n,d}^{\min}$) ocorre após o recebimento de mais de 1 pedaço da batelada \bar{b} (ou seja, pedaço $\bar{c} > npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{\min}$), conforme ilustrado pela figura 32. Nesse caso, o início do bombeio de c pode ser adiantado em função do volume já recebido anteriormente ($\bar{c} - 1$) e o volume c de bombeio de b é menor ou igual a soma dos volumes recebidos de \bar{b} . Assim, tem-se: $\sum part_{\bar{b},\bar{c}} \geq part_{b,c}$, onde $\bar{c} > npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{\min}$ e $c = npb_{b,no_b,n,d}^{\min}$.

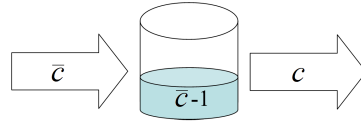


Figura 32 – Exemplo de pulmão - Caso 2: $\sum part_{\bar{b},\bar{c}} \geq part_{b,c}$

3. O bombeio dos demais pedaços da batelada b (excetuando-se o primeiro pedaço, ou seja, pedaço $c > npb_{b,no_b,n,d}^{min}$) ocorre após o recebimento dos demais pedaços da batelada \bar{b} (ou seja, pedaço $\bar{c} > npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{min}$). Nesse caso deve ser considerado o volume remanescente no tanque. O adiantamento do bombeio de c pode ser realizado em função desse volume remanescente (figura 33). Assim, tem-se: $\sum_{\bar{c}} part_{\bar{b},\bar{c}} \geq \sum part_{b,c}$, onde $\bar{c} > npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{min}$ e $c > npb_{b,no_b,n,d}^{min}$.

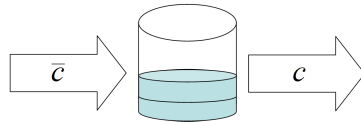


Figura 33 – Exemplo de pulmão - Caso 3: $\sum_{\bar{c}} part_{\bar{b},\bar{c}} \geq \sum part_{b,c}$

Possibilidade de tancagem intermediária

Quando a área de pulmão possui tancagem suficiente para receber uma batelada e posteriormente bombeá-la, é possível realizar a tancagem intermediária. Nesse caso, o bombeio (início ou final) deve ser maior ou igual ao tempo de recebimento do produto na área de pulmão. A tancagem intermediária é uma operação possível de ser realizada somente em algumas áreas de pulmão com alguns dos produtos.

As restrições 102 a 108 limitam o pulmão para os três casos apresentados, quando é possível a realização de tancagem intermediária. Na restrição 102, o início de bombeio do pedaço c da batelada b no nó de pulmão no_b ($nd_{\bar{b}} = no_b$), deve ser maior ou igual ao início de recebimento do produto da batelada \bar{b} nessa área. Com essa desigualdade, os recebimentos da batelada \bar{b} em $nd_{\bar{b}}$ podem ocorrer antes do bombeamento para o próximo duto e, nesse caso, há utilização de tanques em órgãos intermediários.

$$ib_{b,no_b,n,d,c} \geq ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}}$$

$$\forall \{d,d1\} \in D, \{b,\bar{b}\} \in B \mid b \neq \bar{b}, \{no_b,\bar{n},n\} \in N \mid no_b = nd_{\bar{b}} \quad (102)$$

$$\{prod_b, prod_{\bar{b}}\} \in P \mid prod_b = prod_{\bar{b}}, (no_b, prod_b) \in PLM, vol_b = vol_{\bar{b}}, ted_b = ted_{\bar{b}},$$

$$part_{\bar{b},c'} \geq part_{b,c}, \bar{c} \in PR_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1} \mid \bar{c} = npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{min}, c \in PB_{b,no_b,n,d} \mid c = npb_{b,no_b,n,d}^{min}$$

A restrição 106 contempla o caso 2 onde ocorre bombeio do primeiro pedaço da batelada b , realizado após o recebimento de mais de um pedaço da batelada \bar{b} . Nesse caso, $\Sigma(\bar{c} - 1) < c$ e $\Sigma\bar{c} > c$. O início do bombeio de c pode ser adiantado em função do volume já recebido anteriormente ($\Sigma\bar{c} - 1$).

Neste caso, então, qual o tempo que o início do bombeio da batelada b pode ser adiantado? Como apresentado na seção anterior, a vazão está sendo tratada no modelo de forma variável, logo, não é possível calcular, de forma linear, o tempo com base na divisão do volume do pedaço da batelada pela vazão. De forma sintética, busca-se encontrar um tempo dado por:

$$tempo = \frac{\sum_{c'=npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{min}}^{\bar{c}-1} part_{\bar{b},c'}}{vazao_{\bar{c}}} \quad (103)$$

Mas, a vazão pode ser determinada da seguinte maneira:

$$vazao_{\bar{c}} = \frac{part_{\bar{b},\bar{c}}}{fr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}} - ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}}} \quad (104)$$

Logo, o tempo que o pedaço c da batelada b pode ter o seu bombeio adiantado é dado por:

$$tempo = \left(\sum_{c'=npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{min}}^{\bar{c}-1} part_{\bar{b},c'} \right) \cdot \frac{fr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}} - ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}}}{part_{\bar{b},\bar{c}}} \quad (105)$$

Além do tempo já calculado, o bombeio de b pode ser adiantado em função do tempo em que o duto permanece parado entre o recebimento de um pedaço e outro ($ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}} - fr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}-1}$). Então, a restrição 106 pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
ib_{b,no_b,n,d,c} &\geq ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}} - (ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}} - fr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}-1}) \\
&\quad - \left(\sum_{c'=npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{\min}}^{\bar{c}-1} part_{\bar{b},c'} \right) \cdot \frac{fr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}} - ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}}}{part_{\bar{b},\bar{c}}}
\end{aligned} \tag{106}$$

$$\begin{aligned}
\forall \{d,d1\} \in D, \{b,\bar{b}\} \in B \mid b \neq \bar{b}, \{no_b,\bar{n},n\} \in N \mid no_b = nd_{\bar{b}}, vol_b = vol_{\bar{b}}, ted_b = ted_{\bar{b}}, \\
\{prod_b, prod_{\bar{b}}\} \in P \mid prod_b = prod_{\bar{b}}, (no_b, prod_b) \in PLM, \sum_{c'=npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{\min}}^{\bar{c}} part_{\bar{b},c'} \geq part_{b,c} \\
\bar{c} \in PR_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1} \mid \bar{c} > npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{\min}, c \in PB_{b,no_b,n,d} \mid c = npb_{b,no_b,n,d}^{\min}
\end{aligned}$$

Seguindo o mesmo raciocínio do cálculo de vazão realizado anteriormente, o terceiro caso deve identificar a diferença de volume entre os pedaços recebidos e bombeados, ou seja, o volume remanescente no tanque. Dessa forma o tempo de adiantamento do bombeio pode ser calculado sobre esse volume remanescente. Além disso, deve-se considerar o tempo em que o duto permanece parado entre o recebimento de um pedaço e outro ($ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}} - fr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}-1}$). Assim, define-se a restrição 107 como sendo:

$$\begin{aligned}
ib_{b,no_b,n,d,c} &\geq ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}} - (ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}} - fr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}-1}) \\
&\quad - \left(\sum_{c'=npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{\min}}^{\bar{c}-1} part_{\bar{b},c'} - \sum_{c'=npb_{b,no_b,n,d}^{\min}}^{c-1} part_{b,c'} \right) \cdot \frac{fr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}} - ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}}}{part_{\bar{b},\bar{c}}}
\end{aligned} \tag{107}$$

$$\begin{aligned}
\forall \{d,d1\} \in D, \{b,\bar{b}\} \in B \mid b \neq \bar{b}, \{no_b,\bar{n},n\} \in N \mid no_b = nd_{\bar{b}}, vol_b = vol_{\bar{b}}, ted_b = ted_{\bar{b}}, \\
\{prod_b, prod_{\bar{b}}\} \in P \mid prod_b = prod_{\bar{b}}, (no_b, prod_b) \in PLM, \\
\sum_{c'=npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{\min}}^{\bar{c}} part_{\bar{b},c'} \geq \sum_{c'=npb_{b,no_b,n,d}^{\min}}^c part_{b,c'} \\
\bar{c} \in PR_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1} \mid \bar{c} > npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{\min}, c \in PB_{b,no_b,n,d} \mid c > npb_{b,no_b,n,d}^{\min}
\end{aligned}$$

Além de limitar o início de bombeio em relação ao recebimento do produto no órgão de pulmão, o final de bombeio também precisa ser limitado para casos onde a vazão de bombeio do órgão de pulmão é maior que a vazão de recebimento do produto neste mesmo órgão. Nesse caso, não importa qual será o pedaço a ser bombeado, o cálculo pode ser realizado pela equação 108 para todos os 3 casos apresentados anteriormente (o volume considerado no cálculo do

final de bombeio considera o volume do próprio pedaço em questão, diferente das equações que limitam o início de bombeio, que considerava apenas volumes dos pedaços anteriormente recebidos).

$$fb_{b,no_b,n,d,c} \geq fr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}}$$

$$- \left(\sum_{c'=np_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{\min}}^{\bar{c}} part_{\bar{b},c'} - \sum_{c'=np_{b,no_b,n,d}^{\min}}^c part_{b,c'} \right) \cdot \frac{fr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}} - ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}}}{part_{\bar{b},\bar{c}}} \quad (108)$$

$$\forall \{d,d1\} \in D, \{b,\bar{b}\} \in B \mid b \neq \bar{b}, \{no_b,\bar{n},n\} \in N \mid no_b = nd_{\bar{b}}, vol_b = vol_{\bar{b}}, ted_b = ted_{\bar{b}},$$

$$\{prod_b, prod_{\bar{b}}\} \in P \mid prod_b = prod_{\bar{b}}, (no_b, prod_b) \in PLM,$$

$$\sum_{c'=np_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{\min}}^{\bar{c}} part_{\bar{b},c'} \geq \sum_{c'=np_{b,no_b,n,d}^{\min}}^c part_{b,c'}, \bar{c} \in PR_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}, c \in PB_{b,no_b,n,d}$$

Bombeio imediato

Quando a área de pulmão possui tancagem limitada, ela irá receber uma batelada e bombeá-la assim que possível, não sendo recomendada a realização da tancagem intermediária. Nesse caso, o bombeio (inicial ou final) deve ser igual ao tempo de recebimento do produto na área de pulmão. Como a igualdade muitas vezes não pode ser satisfeita devido a outras restrições da rede de dutos, variáveis de relaxação são adicionadas para flexibilizar essa condição. Contudo, essas variáveis de relaxação são minimizadas na função objetivo, induzindo com que o bombeio seja feito assim que exista volume suficiente para sua realização.

Como a tancagem intermediária é possível de ser realizada somente em algumas áreas, as restrições de bombeio imediato devem ser aplicadas a todos os demais casos. Além disso, as restrições são similares às equações que permitem a tancagem intermediária. Resumidamente, a diferença entre elas é a adição das variáveis de relaxação e do sinal de igualdade. A restrição 109 contempla o caso 1, quando é recebido o primeiro pedaço na área de pulmão. Ela restringe o início de bombeio da fração volumétrica c da batelada b no nó de pulmão, que deve ser igual ao início de recebimento do produto nessa área.

$$ib_{b,no_b,n,d,c} - rplm_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1 = ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}}$$

$$\begin{aligned} & \forall \{d, d1\} \in D, \{b, \bar{b}\} \in B \mid b \neq \bar{b}, \{no_b, \bar{n}, n\} \in N \mid no_b = nd_{\bar{b}} \\ & \{prod_b, prod_{\bar{b}}\} \in P \mid prod_b = prod_{\bar{b}}, (no_b, prod_b) \in PLM, vol_b = vol_{\bar{b}}, ted_b = ted_{\bar{b}}, \\ & part_{\bar{b},c'} \geq part_{b,c}, \bar{c} \in PR_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1} \mid \bar{c} = npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{min}, c \in PB_{b,no_b,n,d} \mid c = npb_{b,no_b,n,d}^{min} \end{aligned} \quad (109)$$

A restrição 110 contempla o caso 2, onde ocorre bombeio do primeiro pedaço da batelada b , realizado após o recebimento de mais de uma fração volumétrica da batelada \bar{b} . O bombeio de b pode ser adiantado em função do volume de produto restante no duto e do tempo em que o duto permanece parado entre o recebimento de um pedaço e outro ($ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}} - fr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}-1}$).

$$\begin{aligned} ib_{b,no_b,n,d,c} - rplm_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2 &= ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}} - (ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}} - fr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}-1}) \\ &- \left(\sum_{c'=npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{min}}^{\bar{c}-1} part_{\bar{b},c'} \right) \cdot \frac{fr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}} - ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}}}{part_{\bar{b},\bar{c}}} \end{aligned} \quad (110)$$

$$\begin{aligned} & \forall \{d, d1\} \in D, \{b, \bar{b}\} \in B \mid b \neq \bar{b}, \{no_b, \bar{n}, n\} \in N \mid no_b = nd_{\bar{b}}, vol_b = vol_{\bar{b}}, ted_b = ted_{\bar{b}}, \\ & \{prod_b, prod_{\bar{b}}\} \in P \mid prod_b = prod_{\bar{b}}, (no_b, prod_b) \in PLM, \sum_{c'=npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{min}}^{\bar{c}} part_{\bar{b},c'} \geq part_{b,c} \\ & \bar{c} \in PR_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1} \mid \bar{c} > npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{min}, c \in PB_{b,no_b,n,d} \mid c = npb_{b,no_b,n,d}^{min} \end{aligned}$$

O terceiro caso deve identificar a diferença de volume entre os pedaços recebidos e bombeados. Dessa forma o tempo de adiantamento do bombeio pode ser calculado como função desse volume remanescente e do tempo em que o duto permanece parado entre o recebimento de um pedaço e outro ($ir_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}} - fr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1,\bar{c}-1}$). Assim, define-se a restrição 111 como sendo:

$$\begin{aligned}
& ib_{b, no_b, n, d, c} - rplm_{b, \bar{b}, c, \bar{c}}^3 = ir_{\bar{b}, \bar{n}, nd_{\bar{b}}, d1, \bar{c}} - (ir_{\bar{b}, \bar{n}, nd_{\bar{b}}, d1, \bar{c}} - fr_{\bar{b}, \bar{n}, nd_{\bar{b}}, d1, \bar{c}-1}) \\
& - \left(\sum_{c'=npr_{\bar{b}, \bar{n}, nd_{\bar{b}}, d1}^{\min}}^{\bar{c}-1} part_{\bar{b}, c'} - \sum_{c'=npb_{b, no_b, n, d}^{\min}}^{c-1} part_{b, c'} \right) \cdot \frac{fr_{\bar{b}, \bar{n}, nd_{\bar{b}}, d1, \bar{c}} - ir_{\bar{b}, \bar{n}, nd_{\bar{b}}, d1, \bar{c}}}{part_{\bar{b}, \bar{c}}} \\
& \forall \{d, d1\} \in D, \{b, \bar{b}\} \in B \mid b \neq \bar{b}, \{no_b, \bar{n}, n\} \in N \mid no_b = nd_{\bar{b}}, vol_b = vol_{\bar{b}}, ted_b = ted_{\bar{b}}, \\
& \{prod_b, prod_{\bar{b}}\} \in P \mid prod_b = prod_{\bar{b}}, (no_b, prod_b) \in PLM, \\
& \sum_{c'=npr_{\bar{b}, \bar{n}, nd_{\bar{b}}, d1}^{\min}}^{\bar{c}} part_{\bar{b}, c'} \geq \sum_{c'=npb_{b, no_b, n, d}^{\min}}^c part_{b, c'} \\
& \bar{c} \in PR_{\bar{b}, \bar{n}, nd_{\bar{b}}, d1} \mid \bar{c} > npr_{\bar{b}, \bar{n}, nd_{\bar{b}}, d1}^{\min}, c \in PB_{b, no_b, n, d} \mid c > npb_{b, no_b, n, d}^{\min}
\end{aligned} \tag{111}$$

Além de limitar o início de bombeio em relação ao recebimento do produto no órgão de pulmão, o final de bombeio também precisa ser limitado para casos onde a vazão de bombeio do órgão de pulmão é maior que a vazão de recebimento do produto neste mesmo órgão. Nesse caso, o cálculo pode ser realizado pela equação 112, para todos os três casos apresentados anteriormente. O volume considerado no cálculo do final de bombeio é o volume da própria fração em questão. Esta lógica difere das equações que limitam o início de bombeio, as quais consideravam o volume das frações anteriormente recebidas.

$$\begin{aligned}
& fb_{b, no_b, n, d, c} - rplm_{b, \bar{b}, c, \bar{c}}^4 = fr_{\bar{b}, \bar{n}, nd_{\bar{b}}, d1, \bar{c}} \\
& - \left(\sum_{c'=npr_{\bar{b}, \bar{n}, nd_{\bar{b}}, d1}^{\min}}^{\bar{c}} part_{\bar{b}, c'} - \sum_{c'=npb_{b, no_b, n, d}^{\min}}^c part_{b, c'} \right) \cdot \frac{fr_{\bar{b}, \bar{n}, nd_{\bar{b}}, d1, \bar{c}} - ir_{\bar{b}, \bar{n}, nd_{\bar{b}}, d1, \bar{c}}}{part_{\bar{b}, \bar{c}}} \\
& \forall \{d, d1\} \in D, \{b, \bar{b}\} \in B \mid b \neq \bar{b}, \{no_b, \bar{n}, n\} \in N \mid no_b = nd_{\bar{b}}, vol_b = vol_{\bar{b}}, ted_b = ted_{\bar{b}}, \\
& \{prod_b, prod_{\bar{b}}\} \in P \mid prod_b = prod_{\bar{b}}, (no_b, prod_b) \in PLM, \\
& \sum_{c'=npr_{\bar{b}, \bar{n}, nd_{\bar{b}}, d1}^{\min}}^{\bar{c}} part_{\bar{b}, c'} \geq \sum_{c'=npb_{b, no_b, n, d}^{\min}}^c part_{b, c'}, \bar{c} \in PR_{\bar{b}, \bar{n}, nd_{\bar{b}}, d1}, c \in PB_{b, no_b, n, d}
\end{aligned} \tag{112}$$

8.5.4 Restrições horossazonais

Conforme apresentado no capítulo 4 (página 4.3.1), alguns órgãos devem obedecer a horossazonalidade, horários em que não pode ocorrer nenhum tipo de operação, devido princi-

palmente ao custo elevado da energia elétrica em certos períodos de pico de consumo. Dessa maneira, o bombeamento deve ser, em alguns casos, interrompido periodicamente ao longo dos dias úteis da semana.

A tarifação horossazonal só faz sentido quando for analisado o local em que está sendo bombeado o produto, ou seja, na origem do mesmo. Desse forma, quando identificada que ocorrerá tarifação horossazonal em alguma origem de bombeamento, essa tarifação influenciará o deslocamento de outras bateladas que estão nos dutos da rede, aumentando os tempos de trânsito, já que o bombeamento de uma batelada bo_b influencia o deslocamento das demais bateladas na rede de dutos.

A identificação das bateladas que sofrerão influência da tarifação horossazonal é viável para o modelo de temporização elaborado. No contexto de estudo, a pré-análise identifica quais são as bateladas que influenciarão o deslocamento de outras na rede. Por sua vez, o modelo está estruturado de forma que todos esses deslocamentos ocorram em função do bombeamento de uma batelada em sua origem. Dessa forma, as restrições 90, 92 e 96, já apresentadas, aumentam o tempo referente ao período horossazonal para as bateladas que estão sendo bombeadas, e influenciadas por um bombeamento.

Além disso, a partir da observação da prática operacional, adotou-se que as restrições horossazonais devem ser ativadas somente quando essas operações não ocasionem a violação nas janelas de tempo de estoque. Portanto, se durante o período horossazonal for necessário o envio de um produto para que este não viole a tancagem, esse produto deve ser enviado, pois o atendimento à demanda e aos limites máximos de estocagem estão sendo priorizados. Essa limitação é realizada na criação do conjunto BOH (apêndice E).

A identificação das bateladas que sofrerão essa tarifação está compreendida nas restrições 113 até 122. As restrições 113 e 114 calculam o valor da variável binária x . Se,

$$x = 1 \quad \rightarrow \quad ib_{b,no_b,n,d,c} \leq ih_h.$$

Caso contrário,

$$x = 0 \quad \rightarrow \quad ih_h < ib_{b,no_b,n,d,c}.$$

$$\begin{aligned} ih_h - ib_{b,no_b,n,d,c} &\geq -M \cdot (1 - x_{b,c,no_b,h}) \\ \forall n \in N, d \in D, (b, c, no_b, h) &\in BOH \end{aligned} \tag{113}$$

$$\begin{aligned} ih_h - ib_{b,no_b,n,d,c} &\leq ((M + eps) \cdot x_{b,c,no_b,h}) - eps \\ \forall n \in N, d \in D, (b, c, no_b, h) &\in BOH \end{aligned} \quad (114)$$

As restrições 115 e 116 calculam os valores das variáveis binárias y . Se,

$$y = 1 \quad \rightarrow \quad ih_h \leq fb_{b,no_b,n,d,c}.$$

Caso contrário,

$$y = 0 \quad \rightarrow \quad fb_{b,no_b,n,d,c} < ih_h.$$

$$\begin{aligned} fb_{b,no_b,n,d,c} - ih_h &\geq -M \cdot (1 - y_{b,c,no_b,h}) \\ \forall n \in N, d \in D, (b, c, no_b, h) &\in BOH \end{aligned} \quad (115)$$

$$\begin{aligned} fb_{b,no_b,n,d,c} - ih_h &\leq ((M + eps) \cdot y_{b,c,no_b,h}) - eps \\ \forall n \in N, d \in D, (b, c, no_b, h) &\in BOH \end{aligned} \quad (116)$$

As restrições horossazonais anteriores (113 a 116) relacionam o início de bombeamento com o início do período de tarifação bem como o final do bombeamento com o início do período de tarifação. As restrições 117 e 118 calculam os valores das variáveis binárias w de modo a relacionar o início de bombeamento com o final do período de tarifação horossazonal. Se,

$$w = 1 \quad \rightarrow \quad ib_{b,no_b,n,d,c} \leq fh_h.$$

Caso contrário,

$$w = 0 \quad \rightarrow \quad fh_h < ib_{b,no_b,n,d,c}.$$

$$\begin{aligned} fh_h - ib_{b,no_b,n,d,c} &\geq -M \cdot (1 - w_{b,c,no_b,h}) \\ \forall n \in N, d \in D, (b, c, no_b, h) &\in BOH \end{aligned} \quad (117)$$

$$\begin{aligned} fh_h - ib_{b,c,n,d,p_b} &\leq ((M + eps) \cdot w_{b,c,no_b,h}) - eps \\ \forall n \in N, d \in D, (b, c, no_b, h) &\in BOH \end{aligned} \quad (118)$$

As restrições 119 a 122 relacionam as variáveis binárias x , y e w para o cálculo da variável z . A variável $z_{b,c,no_b,h}$ indicará quando ocorre parada de bombeamento do volume c da

batelada b no nó de origem no_b .

Para determinar quando um bombeamento deve parar ou não, devem ser analisados seis casos de possíveis posições de um bloco temporal ($fb - ib$) relacionados ao intervalo de custo elétrico elevado, de acordo com a figura 34 e tabela 23.

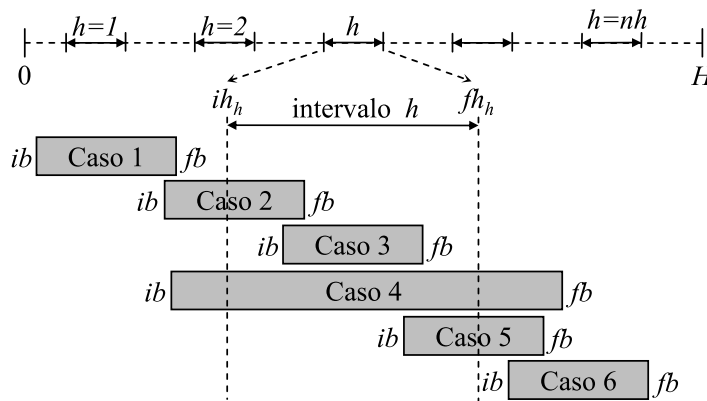


Figura 34 – Casos a serem analisados durante período horossazonal
 Fonte: Magatão (2005), Stebel (2006)

A tabela 23 mostra todos os casos de custo elétrico elevado. O valor da variável $z_{b,c,no_b,h}$ é determinado de acordo com o valor das outras três variáveis binárias: $x_{b,c,no_b,h}$, $y_{b,c,no_b,h}$ e $w_{b,c,no_b,h}$. Se $x_{b,c,no_b,h} = 1$, o início de bombeio ocorre antes do período de custo elétrico elevado; $y_{b,c,no_b,h} = 1$ indica que o final de bombeio ocorre depois do início de custo elétrico elevado; e, $w_{b,c,no_b,h} = 1$ indica que o início de bombeio ocorre antes do final do período de custo elétrico elevado. Dessa forma, $z_{b,c,no_b,h}$ irá indicar se o bloco temporal ($fb - ib$) de uma batelada irá aumentar ω horas ou não. Em particular, para o problema abordado, as condições 3 e 5 não são aceitas (restrição 122). Nesse caso, a realização do bombeio é forçada a iniciar após o final do período horossazonal, de forma similar ao que ocorre no caso 6.

Tabela 23 – Variáveis binárias em casos de custo elétrico elevado

	$x_{b,c,no_b,h}$	$y_{b,c,no_b,h}$	$w_{b,c,no_b,h}$	$z_{b,c,no_b,h}$
Caso 1	1	0	1	0
Caso 2	1	1	1	1
Caso 3	0	1	1	*
Caso 4	1	1	1	1
Caso 5	0	1	1	*
Caso 6	0	1	0	0

* - Casos não aceitos

A inequação 119, permite que a variável binária z assumo o valor 1, somente quando a variável binária x assumir valor 1. Caso contrário, o valor de z deve ser zero. Como x recebe o valor 1 se o início do bombeamento de uma batelada b em sua origem ocorre antes do início

do período de tarifação horossazonal ih_h , z poderá penalizar o tempo de envio a partir de uma origem no_b somente nesta condição.

$$z_{b,c,no_b,h} \leq x_{b,c,no_b,h} \quad \forall (b,c,no_b,h) \in BOH \quad (119)$$

A restrição 120 faz a conexão entre as variáveis $z_{b,c,no_b,h}$ e $y_{b,c,no_b,h}$. Se o final de bombeamento de uma batelada b em sua origem ocorre antes do início do período de tarifação horossazonal ih_h ($y_{b,c,no_b,h} = 0$), não haverá parada de bombeamento do volume p da batelada b , na área no_b ($z_{b,c,no_b,h} = 0$).

$$z_{b,c,no_b,h} \leq y_{b,c,no_b,h} \quad \forall (b,c,no_b,h) \in BOH \quad (120)$$

A restrição 121 por sua vez, faz a conexão entre as variáveis $z_{b,c,no_b,h}$, $y_{b,c,no_b,h}$ e $x_{b,c,no_b,h}$. Se o final de bombeamento de uma batelada b em sua origem ocorre após o início do período de tarifação horossazonal ih_h ($y_{b,c,no_b,h} = 1$) e⁴ o início do bombeamento de uma batelada b em sua origem ocorre antes do início do período de tarifação horossazonal ih_h ($x_{b,c,no_b,h} = 1$), deve ocorrer parada de bombeamento do volume c da batelada b , na área no_b ($z_{b,c,no_b,h} = 1$).

$$z_{b,c,no_b,h} \geq x_{b,c,no_b,h} + y_{b,c,no_b,h} - 1 \quad \forall (b,c,no_b,h) \in BOH \quad (121)$$

Por fim, a restrição 122 impõe que, quando o início do bombeamento de uma batelada b em sua origem ocorre antes do início do período de tarifação horossazonal ih_h ($x_{b,c,no_b,h} = 1$), o início do bombeamento de uma batelada b em sua origem deve ocorrer antes do final do período de tarifação horossazonal fh_h ($w_{b,c,no_b,h} = 1$). Caso contrário, o início do bombeamento de uma batelada b deve esperar o final do período de tarifação horossazonal fh_h para ser bombeada.

$$x_{b,c,no_b,h} = w_{b,c,no_b,h} \quad \forall (b,c,no_b,h) \in BOH \quad (122)$$

⁴operação AND lógico

8.5.5 Restrições para troca de turno

Conforme apresentado no capítulo 4 (página 4.3.1), operações de recebimento e envio não devem ser nem iniciadas, nem terminadas, durante os intervalos das trocas de turno de trabalho nos vários órgãos.

Essas restrições são proibitivas e restringem os bombeamentos nas origens e recebimentos nos destinos em horários de troca de turno, desde que essas operações não ocasionem violações nas janelas de tempo de estoque. Portanto, se durante a troca de turno for necessário o envio de um produto para que este não viole a tancagem, esse produto deve ser enviado, pois o atendimento à demanda e aos limites máximos de estocagem estão sendo priorizados. Essa limitação é realizada na criação do conjunto *BOT* (apêndice E). Além disso, a troca de turno pode ou não ser ativada para o número de dias que o programador desejar especificar.

As restrições 123 e 124 evitam que a operação de bombeio nos órgãos de origem ocorram no intervalo de troca de turno ($it - ft$). Se $xtb_{b,c,no_b,t} = 1$, o início de bombeio deve ocorrer antes do início do período de troca de turno $it_{no_b,t}$ (inequação 123). Caso contrário, quando $xtb_{b,c,no_b,t} = 0$, o início de bombeio deve ocorrer após o final do período de troca de turno $ft_{no_b,t}$ (inequação 124).

$$\begin{aligned} ib_{b,no_b,n,d,c} &\leq it_{no_b,t} + M \cdot (1 - xtb_{b,c,no_b,t}) \\ \forall n \in N, d \in D, (b,c,no_b,t) \in BOT \end{aligned} \quad (123)$$

$$\begin{aligned} ib_{b,no_b,n,d,c} &\geq ft_{no_b,t} - M \cdot xtb_{b,c,no_b,t} \\ \forall n \in N, d \in D, (b,c,no_b,t) \in BOT \end{aligned} \quad (124)$$

Em relação ao recebimento de bateladas, só ocorrerá recebimento de uma batelada (ou uma fração dela) se acontecer um bombeio em alguma origem. Esse bombeio irá deslocar as bateladas que se encontram nos dutos e, no mesmo instante de tempo, ocorrerá um recebimento. Logo, quando os bombeamentos são limitados, consequentemente, os recebimentos também são limitados, não sendo necessária a criação de restrições para esses casos.

8.5.6 Restrições de inventário

O inventário nas áreas, tanto de origem quanto de destino, é gerenciado através das janelas de tempo, como explanado no capítulo anterior (seção 7.2.2, página 126). Se as operações de envio e recebimento ocorrem dentro das janelas, os limites de inventário em ambos os

órgãos são, em tese, respeitados e a demanda é satisfeita.

Dessa forma, dois conjuntos de restrições relativas à satisfação de janelas de tempo foram consideradas no modelo matemático. O primeiro conjunto calcula possíveis violações nas janelas de tempo de capacidade, enquanto o segundo determina violações com respeito as janelas de tempo cortadas.

Em relação a uma área de oferta de produtos, os tempos de envio disponível (ted_b) e envio crítico (tec_b) de uma batelada b devem ser respeitados. Há possibilidade de violação nestes tempos sob penalização na função objetivo. As variáveis $ao_{b,no_b,c}$ e $do_{b,no_b,c}$ armazenam as violações no tempo de envio da fração volumétrica c de uma batelada b , com origem na área de oferta no_b , em relação à janela de tempo de capacidade (restrições 125 e 126).

$$\begin{aligned} ib_{b,no_b,n,d,c} &\geq ted_b - ao_{b,no_b,c} \\ \forall b \in B, \{no_b, n\} \in N, d \in D, c \in PB_{b,no_b,n,d} \end{aligned} \quad (125)$$

$$\begin{aligned} ib_{b,no_b,n,d,c} &\leq tec_b + do_{b,no_b,c} \\ \forall b \in B, \{no_b, n\} \in N, d \in D, c \in PB_{b,no_b,n,d} \end{aligned} \quad (126)$$

Do mesmo modo, em relação a uma área de destino dos produtos, os tempos de recebimento disponível (trd_b) e recebimento crítico (trc_b) de uma batelada b devem ser respeitados, passíveis de violação sob penalização na função objetivo. As variáveis $ad_{b,nd_b,c}$ e $dd_{b,nd_b,c}$ representam as violações no tempo de recebimento da fração volumétrica c de uma batelada b , com destino na área nd_b , em relação à janela de tempo de capacidade (restrições 127 e 128).

$$\begin{aligned} ir_{b,\bar{n},nd_b,d,c} &\geq trd_b - ad_{b,nd_b,c} \\ \forall b \in B, \{\bar{n}, nd_b\} \in N, d \in D, c \in PR_{b,\bar{n},nd_b,d} \end{aligned} \quad (127)$$

$$\begin{aligned} ir_{b,\bar{n},nd_b,d,c} &\leq trc_b + dd_{b,nd_b,c} \\ \forall b \in B, \{\bar{n}, nd_b\} \in N, d \in D, c \in PR_{b,\bar{n},nd_b,d} \end{aligned} \quad (128)$$

As restrições 129 até 132 foram criadas para identificar possíveis violações nas janelas de tempo “cortadas” de origem (adiantamento e atraso) e destino (adiantamento e atraso). Além disso, essas violações são adicionadas na função objetivo com fatores de ponderação distintos: janelas de tempo de capacidade têm maior importância e devem ser ponderadas por um maior

fator.

Em relação a uma área de oferta de produtos, os tempos de envio disponível (ted_b^{cut}) e envio crítico (tec_b^{cut}) de uma batelada b devem ser respeitados, passíveis de violação sob penalização na função objetivo. As variáveis $aoc_{b,no_b,c}$ e $doc_{b,no_b,c}$ representam as violações no tempo de envio da fração volumétrica c de uma batelada b , com origem na área de oferta no_b , em relação à janela de tempo cortada (restrições 129 e 130).

$$\begin{aligned} ib_{b,no_b,n,d,c} &\geq ted_b^{cut} - aoc_{b,no_b,c} \\ \forall b \in B, \{no_b, n\} \in N, d \in D, c \in PB_{b,no_b,n,d} \end{aligned} \quad (129)$$

$$\begin{aligned} ib_{b,no_b,n,d,c} &\leq tec_b^{cut} + doc_{b,no_b,c} \\ \forall b \in B, \{no_b, n\} \in N, d \in D, c \in PB_{b,no_b,n,d} \end{aligned} \quad (130)$$

Do mesmo modo, em relação a uma área de destino dos produtos, os tempos de recebimento disponível (trd_b^{cut}) e recebimento crítico (trc_b^{cut}) de uma batelada b devem ser respeitados, passíveis de violação sob penalização na função objetivo. As variáveis adc_{b,nd_b} e ddc_{b,nd_b} armazenam as violações no tempo de recebimento de uma batelada b , com destino na área nd_b , em relação à janela de tempo cortadas (restrições 131 e 132).

$$\begin{aligned} ir_{b,\bar{n},nd_b,d,p} &\geq trd_b^{cut} - adc_{b,nd_b} \\ \forall b \in B, \{\bar{n}, nd_b\} \in N, d \in D, p \in PR_{b,\bar{n},nd_b,d} \end{aligned} \quad (131)$$

$$\begin{aligned} ir_{b,\bar{n},nd_b,d,p} &\leq trc_b^{cut} + ddc_{b,nd_b} \\ \forall b \in B, \{\bar{n}, nd_b\} \in N, d \in D, p \in PR_{b,\bar{n},nd_b,d} \end{aligned} \quad (132)$$

8.6 RESTRIÇÕES ESPECÍFICAS DA REDE EM ESTUDO - RESTRIÇÕES LOCAIS

Além das restrições até então apresentadas, cada área da rede de dutos tem limitações particulares que devem ser tratadas para viabilizar o perfeito funcionamento do modelo para cenários reais. Essas limitações, aqui chamadas de restrições locais, proíbem bombeamentos ou recebimentos simultâneos. A quantidade de limitações varia para cada área, dependendo do número de válvulas e bombas necessárias para efetuar o bombeio de um determinado produto. Esses bombeamentos simultâneos devem ocorrer se a área tratada corresponder a área de origem

da batelada, ou seja, a primeira área da rota onde ela é ofertada, ou ainda se a área que receberá o produto for a área final da rota, ou seja, a área onde será suprida a demanda.

As limitações nos órgãos e dutos são disponibilizadas através de uma tabela no Banco de Dados. Dessa forma, restrições locais são criadas de acordo com os dados fornecidos por essa tabela. Existem várias possibilidades a serem consideradas, dentre elas:

- restrição de bombeamento para 2 dutos simultaneamente;
- restrição de recebimento por 2 dutos simultaneamente;
- restrição de envio e recebimento simultâneo (considerando 2 dutos);
- restrição de bombeamento para 3 dutos simultaneamente;
- restrição de recebimento por 3 dutos simultaneamente;
- restrição de envio e recebimento simultâneo (considerando 3 dutos).

As restrições locais podem ser modeladas de formas distintas. Em trabalhos preliminares (FELIZARI, 2009), foram modeladas restrições que apenas limitavam o bombeio (ou recebimento) das bateladas respeitando a ordenação dada pela lista de bateladas. Esta lista pode ser gerada na alocação de recursos ou em um dos blocos de reordenação. Ressalta-se que, nos trabalhos preliminares, uma restrição distinta é construída de acordo com a necessidade de cada órgão, ou seja, uma restrição para cada caso. A figura 35 apresenta três condições hipotéticas para o recebimento de duas bateladas (bateladas 2 e 5) em uma área específica. Na condição (a) há o recebimento simultâneo; na condição (b) ocorre primeiro o recebimento da batelada 2 depois da batelada 5; na condição (c), primeiro há o recebimento da batelada 5. Assim, na condição (a) não há observação à restrição local de recebimento simultâneo; nos casos (b) e (c) respeita-se a restrição local. Contudo, no caso (b), respeita-se também a ordem previamente estabelecida na carteira, o que pode, em alguns casos, atrasar as operações de bombeio/recebimento. No caso (b), para que a ordem seja satisfeita, a batelada 5 atrasa muito seu bombeio, o que poder resultar em violações de tancagem.

O trabalho de Felizari (2009) trata a condição (b) da figura 35. A formulação aqui proposta utiliza variáveis binárias e, não respeita necessariamente a ordenação proposta pela alocação. Dessa forma, é possível que uma batelada com índice maior inicie seu bombeio (ou recebimento) antes de outra batelada com o índice menor, no mesmo órgão em dutos distintos (figura 35c). Além disso, as restrições locais envolvendo áreas, dutos e produtos são informadas através de uma tabela dinâmica do Banco de Dados. Dessa forma, as restrições são construídas

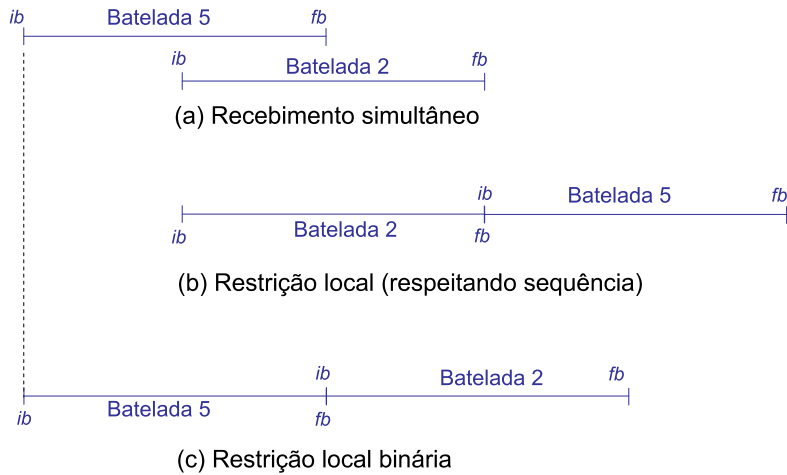


Figura 35 – Possibilidades de bombeamentos e recebimentos simultâneos

de forma generalizada, não sendo mais necessária a particularização da modelagem de restrições para cada caso de restrição local. As restrições do modelo são geradas a partir das condições especificadas na tabela do Banco de Dados.

Assim, todos os casos de restrições locais envolvendo 2 ou 3 dutos são satisfeitos. Além disso, as restrições podem ser ativadas para todos os pedaços de bateladas. Dessa forma, uma batelada pode iniciar o bombeio, interromper o bombeio para o início (ou continuação) do bombeio de outra batelada em outro duto, para então finalizar posteriormente seu bombeio de forma não simultânea, como na figura 36. Nessa figura observa-se que as bateladas 65 e 321, apesar de serem bombeadas utilizando dutos distintos, não podem ser bombeadas de maneira simultânea por limitações de bomba da área de origem. O primeiro pedaço da batelada 65 é bombeado. Após o fim de seu bombeio é bombeado o primeiro pedaço da batelada 321. Esse bombeio é interrompido para que o término do bombeio da batelada 65 ocorra. Após o final do bombeio da batelada 65, a batelada 321 finaliza seu bombeio.

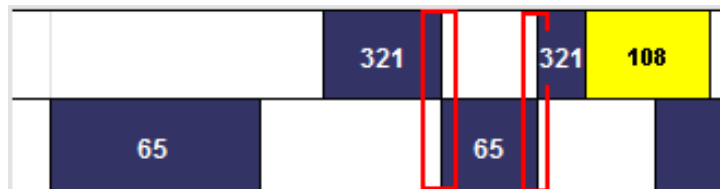


Figura 36 – Exemplo de quebra de batelada por restrição local

As restrições 133 e 134 limitam os bombeamentos simultâneos entre a fração c da batelada b e a fração \bar{c} da batelada \bar{b} , caso seja necessária a limitação quando $(\bar{b} > b)$, ou seja, quando ocorre a restrição de bombeamento para 3 dutos simultaneamente, duas bateladas podem ser bombeadas simultaneamente e não é necessária a limitação de b e \bar{b} . Casos de passagem não são limitados, apenas operações de envio em suas origens. O modelo decide qual

restrição ativar, de acordo com o melhor caso, através da variável binária $lb_{b,\bar{b},c,\bar{c}}$. Se $lb_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1 = 1$, o pedaço \bar{c} inicia seu bombeamento (ib) na área no_b após o final do bombeamento (fb) do pedaço c (restrição 133); caso contrário, se $lb_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2 = 1$, c inicia seu bombeamento (ib) na área no_b após o final do bombeamento (fb) do pedaço \bar{c} (restrição 134).

$$\begin{aligned} fb_{b,no_b,n,d,c} &\leq ib_{\bar{b},no_b,n1,d1,\bar{c}} + M \cdot (1 - lb_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1) \\ \forall (b,\bar{b},c,\bar{c}) \in LB, \{no_b,n,n1\} \in N, \{d,d1\} \in D \mid d \neq d1 \end{aligned} \quad (133)$$

$$\begin{aligned} fb_{\bar{b},no_b,n1,d1,\bar{c}} &\leq ib_{b,no_b,n,d,c} + M \cdot (1 - lb_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2) \\ \forall (b,\bar{b},c,\bar{c}) \in LB, \{no_b,n,n1\} \in N, \{d,d1\} \in D \mid d \neq d1 \end{aligned} \quad (134)$$

As restrições 135 e 136 limitam o recebimento entre frações volumétricas de b e \bar{b} , caso seja necessária a limitação quando ($\bar{b} > b$), ou seja, quando ocorre a restrição de recebimento para 3 dutos simultaneamente, duas bateladas podem ser recebidas simultaneamente e não é necessária a limitação de b e \bar{b} . O modelo decide qual restrição ativar, de acordo com o melhor caso, através da variável binária $lr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}$. Se $lr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1 = 1$, \bar{c} começa a ser recebida (ir) na área nd_b após o término do recebimento (fr) da fração c (restrição 135); caso contrário, se $lr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2 = 1$, c começa a ser recebida (ir) na área nd_b após o final do recebimento (fr) da fração \bar{c} (restrição 136).

$$\begin{aligned} fr_{b,n,nd_b,d,c} &\leq ir_{\bar{b},n1,nd_b,d1,\bar{c}} + M \cdot (1 - lr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1) \\ \forall (b,\bar{b},c,\bar{c}) \in LR, \{n,n1,nd_b\} \in N, \{d,d1\} \in D \mid d \neq d1 \end{aligned} \quad (135)$$

$$\begin{aligned} fr_{\bar{b},n1,nd_b,d1,\bar{c}} &\leq ir_{b,n,nd_b,d,c} + M \cdot (1 - lr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2) \\ \forall (b,\bar{b},c,\bar{c}) \in LR, \{n,n1,nd_b\} \in N, \{d,d1\} \in D \mid d \neq d1 \end{aligned} \quad (136)$$

As restrições 137 e 138 limitam a simultaneidade entre o bombeio de b e o recebimento de \bar{b} , caso seja necessária a limitação quando ($\bar{b} \neq b$), ou seja, quando ocorre a restrição de 3 dutos simultaneamente, duas bateladas podem ser bombeadas/recebidas simultaneamente e não é necessária a limitação de b e \bar{b} . O modelo decide qual restrição ativar, de acordo com o melhor caso, através da variável binária $lbr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}$. Se $lbr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1 = 1$, \bar{c} começa a ser recebida (ir) na área no_b após o término do envio (fb) da fração c (restrição 137); caso contrário, se $lbr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2 = 1$, c começa a ser bombeado (ib) na área no_b após o final do recebimento (fr) da fração \bar{c} (restrição 138).

$$fb_{b,no_b,n,d,c} \leq ir_{\bar{b},n1,nd_b,d1,\bar{c}} + M \cdot (1 - lbr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1) \quad (137)$$

$$\forall (b, \bar{b}, c, \bar{c}) \in LBR, \{n, n1, nd_b\} \in N, \{d, d1\} \in D \mid d \neq d1$$

$$fr_{\bar{b},n1,nd_b,d1,\bar{c}} \leq ib_{b,n,nd_b,d,c} + M \cdot (1 - lbr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2) \quad (138)$$

$$\forall (b, \bar{b}, c, \bar{c}) \in LBR, \{n, n1, nd_b\} \in N, \{d, d1\} \in D \mid d \neq d1$$

8.6.1 Limitações de bombeio e/ou recebimento em 2 dutos

As restrições 139, 140 e 141 fazem a conexão entre as variáveis binárias $lb_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1$, $lb_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2$, $lr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1$, $lr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2$, $lbr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1$ e $lbr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2$. Se no Banco de Dados o código cd^5 para o produto e área da batelada b é igual ao da batelada \bar{b} ($\sum cd = 2$), então pode ocorrer um bombeamento (ou recebimento) simultâneo, ativando as restrições 139, 140 e/ou 141. As restrições (133/135/137) são ativadas por $lx_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1 = 1$ (onde x em lx pode ser b , r ou br), e as restrições (134/136/138) são ativadas por $lx_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2 = 1$.

$$lb_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1 + lb_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2 \geq 1 \quad \forall (b, \bar{b}, c, \bar{c}) \in LB, \sum cd = 2 \quad (139)$$

$$lr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1 + lr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2 \geq 1 \quad \forall (b, \bar{b}, c, \bar{c}) \in LR, \sum cd = 2 \quad (140)$$

$$lbr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1 + lbr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2 \geq 1 \quad \forall (b, \bar{b}, c, \bar{c}) \in LBR, \sum cd = 2 \quad (141)$$

8.6.2 Limitações de bombeio e/ou recebimento em 3 dutos

Quando analisadas as bateladas b , \bar{b} e $b2$, ao menos uma deve ser restringida, isto é, não é possível receber três bateladas simultaneamente, quando o código cd aparece no Banco de Dados três vezes e, uma das variáveis binárias nas restrições 142 à 145 deve ser igual à 1. A restrição 142 limita 3 bombeamentos, a restrição 143 limita 3 recebimentos, a restrição 144 limita 2 bombeamentos e 1 recebimento e a restrição 145 limita 1 envio e 2 recebimentos.

⁵Quando dois produtos $prod_b$ e $prod_{\bar{b}}$ possuem o mesmo código cd , para uma mesma área $no_b = no_{\bar{b}}$, as bateladas b e \bar{b} não poderão ser bombeadas/recebidas simultaneamente

$$lb_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1 + lb_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2 + lb_{b,b2,c,c2}^1 + lb_{b,b2,c,c2}^2 + lb_{\bar{b},b2,\bar{c},c2}^1 + lb_{\bar{b},b2,\bar{c},c2}^2 \geq 1$$

$$\forall (b, \bar{b}, c, \bar{c}) \in LB, (b, b2, c, c2) \in LB, (\bar{b}, b2, \bar{c}, c2) \in LB, \sum cd = 3 \quad (142)$$

$$lr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1 + lr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2 + lr_{b,b2,c,c2}^1 + lr_{b,b2,c,c2}^2 + lr_{\bar{b},b2,\bar{c},c2}^1 + lr_{\bar{b},b2,\bar{c},c2}^2 \geq 1$$

$$\forall (b, \bar{b}, c, \bar{c}) \in LR, (b, b2, c, c2) \in LR, (\bar{b}, b2, \bar{c}, c2) \in LR, \sum cd = 3 \quad (143)$$

$$lbr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1 + lbr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2 + lbr_{b,b2,c,c2}^1 + lbr_{b,b2,c,c2}^2 + lbr_{\bar{b},b2,\bar{c},c2}^1 + lbr_{\bar{b},b2,\bar{c},c2}^2 \geq 1$$

$$\forall (b, \bar{b}, c, \bar{c}) \in LB, (b, b2, c, c2) \in LBR, (\bar{b}, b2, \bar{c}, c2) \in LBR, \sum cd = 3 \quad (144)$$

$$lbr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1 + lbr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2 + lbr_{b,b2,c,c2}^1 + lbr_{b,b2,c,c2}^2 + lbr_{\bar{b},b2,\bar{c},c2}^1 + lbr_{\bar{b},b2,\bar{c},c2}^2 \geq 1$$

$$\forall (b, \bar{b}, c, \bar{c}) \in LBR, (b, b2, c, c2) \in LBR, (\bar{b}, b2, \bar{c}, c2) \in LR, \sum cd = 3 \quad (145)$$

8.7 RESULTADOS

O modelo foi aplicado na rede de dutos apresentada no capítulo 4. Para a obtenção da solução, o modelo de planejamento apresentado no capítulo 5 sugere os volumes e rotas em que os produtos devem ser movimentados. Após essa etapa, é utilizada a alocação de recursos heurística juntamente com a pré-análise (capítulo 7). Nenhuma reordenação é utilizada. Os resultados desses modelos/algoritmos prévios fornecem os dados de entrada do modelo de temporização PLIM. Demais parâmetros utilizados, comuns a todos os cenários e definidos no Apêndice E (página 233) ou em Apêndices anteriores são apresentados como segue:

- $verao = 0$, não foi considerado horário de verão em nenhum dos cenários;
- $eps = 0,01$;
- $M = 1500,1$;
- $k = 1, kc = 10$ e $kp = 10.000$;
- $nh = 0, 7, 15$ e 30 dias;
- $N_{HOR} = \{N6, N7, N8\}$
- $\omega = 3$ horas;
- ih_h e fh_h : calculados de acordo com as equações 154 e 155 (página 240).

- $u_{n,t} = 7 + 8 \cdot (t - 1), \forall n, t = 1.. \frac{3H}{24}$;
- $f_{n,t} = 8 + 8 \cdot (t - 1), \forall n, t = 1.. \frac{3H}{24}$.

O horizonte de *scheduling* das bateladas é mensurado em horas. Logo, em um horizonte de planejamento de 30 dias, as operações de bombeio serão realizadas tipicamente, em menos de 720 horas. As violações das janelas de tempo foram normalizadas pelo volume de cada fração volumétrica, ou seja, se uma parte c de uma batelada b violar a janela de tempo, esta violação será penalizada pelo volume violado $part_{b,c}$. Como as janelas de tempo de capacidade têm maior importância, elas são penalizadas por $kc = 10$. Nas operações de pulmão (bombeio imediato), deve-se evitar ao máximo a realização de estoque intermediário, logo, qualquer violação é penalizada por $kp = 10.000$. O valor M foi escolhido considerando mais de duas vezes o horizonte de planejamento e eps é um valor pequeno de tolerância usado somente para evitar situações de igualdade nas restrições.

Além dos parâmetros apresentados, as áreas e produtos onde ocorrem operações pulmão (*PLM*) foram apresentados na tabela 8 (página 84). Considerando o presente modelo, as tabelas 24, 25, 26 e 27 apresentam os resultados computacionais do modelo de temporização PLIM para os oito cenários (C1 a C8) já utilizados nos capítulos anteriores para a rede de dutos. Considerou-se 0, 7, 15 e 30 dias de horossazonalidade e troca de turno, respectivamente. Todos os cenários consideram um horizonte de um mês (30 dias) e utilizou-se o *software* ILOG OPL Studio 6.3, CPLEX 12 em um computador Intel Core 2 Duo 6400, 2.13 GHz, 3GB RAM. O tempo para a procura de uma solução foi limitado em 5 horas (18000 segundos). Os rótulos apresentados nas tabelas 24 a 27 e 29 são os mesmos apresentados pela tabela 3 (página 71). Quando o *gap* relativo entre a solução encontrada (F. Objetivo) e a melhor solução relaxada (F.O. Relaxada) é menor que 0,01%, a solução encontrada é considerada ótima, conforme apresentado em *Status*. Esse é o valor de tolerância de *gap* padrão do *solver*, para que as soluções que possuam esse *gap* relativo sejam consideradas ótimas. Assim, diante das condições expostas, observa-se que os cenários foram executados até a otimalidade.

Por meio da tabela 24 é possível perceber que, se não considerarmos as restrições de horossazonalidade e troca de turno, a solução do modelo de temporização é obtida, no pior caso, em menos de oito minutos. Todos os cenários apresentam ao menos 15.000 variáveis, sendo mais de 2.000 delas inteiras. Além disso, ao menos 28.000 restrições são geradas.

Considerando-se 7 dias de horossazonalidade e troca de turno, pode-se visualizar a solução computacional através da tabela 25. Todos os cenários apresentam ao menos 23.000 variáveis, sendo mais de 10.000 delas inteiras. Além disso, ao menos 50.000 restrições são geradas. Observa-se que houve um incremento significativo na dimensão do modelo quando há

Tabela 24 – Resultados do Modelo de Temporização - sem horo. e troca

Cenário	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Status	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo
Tempo (s)	12,07	14,67	9,60	6,31	13,66	393,69	461,31	234,80
F. Objetivo	2,080E8	6,382E8	4,122E8	8,591E8	3,443E8	3,068E9	4,591E8	4,566E8
F.O. Relaxada	2,080E8	6,382E8	4,122E8	8,591E8	3,442E8	3,068E9	4,590E8	4,566E8
Gap (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Iterações	4525	6274	3711	2705	4782	316538	88418	81928
Variáveis	15180	18136	20225	20374	19431	25941	23867	22199
Var. Int.	2050	3362	4980	4680	4686	9688	8442	7558
Restrições	28727	32908	36518	36392	35589	44531	54200	43770

considerações acerca de horossazonalidade e troca de turno. Ressalta-se ao leitor, contudo, que no Apêndice E (página 240) há procedimentos otimizados para a geração dos conjuntos. Pode-se observar que, para os seis primeiros cenários (C1-C6), a solução ótima foi encontrada em menos de 4 minutos. O cenário C7 demandou 3h34 para convergir. No cenário C8, obteve-se uma solução próxima da melhor solução relaxada, mas não houve convergência dentro do limite de 5 horas. A melhor solução encontrada, para o cenário C8, possui *gap* relativo de 0,07%.

Tabela 25 – Resultados do Modelo de Temporização - 7 dias de horo. e troca

Cenário	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Status	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	viável
Tempo (s)	27,99	62,34	28,70	17,89	58,31	237,10	12854,06	18013,25
F. Objetivo	2,868E8	7,444E8	4,306E8	9,101E8	3,475E8	3,082E9	4,660E8	4,657E8
F.O. Relaxada	2,868E8	7,444E8	4,305E8	9,101E8	3,474E8	3,082E9	4,659E8	4,654E8
Gap (%)	< 0,01	0,00	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,07
Iterações	8369	16791	10654	4810	13022	71105	898210	2327029
Variáveis	23679	27622	29461	29030	27073	34406	31694	31970
Var. Int.	9998	12283	13653	12839	11902	17756	15786	16715
Restrições	49932	56133	59218	57263	54083	64292	73523	67879

A dimensão do modelo aumenta quando expande-se o número de dias considerados com horossazonalidade e troca de turno. A tabela 26 apresenta os resultados computacionais considerando 15 dias para essas restrições. É possível observar que, com exceção do cenário C4, são necessários alguns minutos para a obtenção da solução ótima. Os cenários C7 e C8, a exemplo da tabela 25, continuam sendo críticos para obtenção de soluções em tempo computacional baixo. Após mais de 2h30 de processamento para o cenário C7, o *solver* retornou o *status out of memory*, parando a busca por soluções melhores. O cenário C8 convergiu após quase 2 horas de processamento, apresentando uma solução ótima.

Finalmente, considerando 30 dias de horossazonalidade e troca de turno dos operadores, os resultados computacionais obtidos são apresentados na tabela 27. Os cenários C1-C5 demandaram, ao menos o dobro do tempo em relação à tabela 26 para que o *solver* encontrasse a solução ótima. Para os cenários C6-C8, observa-se que o tempo para provar a otimalidade tende a aumentar de maneira exponencial. Por exemplo, para o cenário C6, considerando 0, 7

Tabela 26 – Resultados do Modelo de Temporização - 15 dias de horo. e troca

Cenário	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Status	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	<i>out of memory</i>	ótimo
Tempo (s)	94,22	172,87	189,86	32,78	151,37	383,64	9344,33	6751,32
F. Objetivo	4,022E8	8,689E8	4,476E8	9,358E8	3,740E8	3,096E9	4,753E8	4,845E8
F.O. Relaxada	4,022E8	8,689E8	4,476E8	9,357E8	3,740E8	3,096E9	4,686E8	4,845E8
Gap (%)	0,00	0,00	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,42	< 0,01
Iterações	23099	38340	41478	9846	34145	114481	780925	2536714
Variáveis	33999	40000	41093	40692	38637	45299	42432	44016
Var. Int.	19644	23884	24533	23840	22776	28100	25828	28014
Restrições	83749	96558	97033	92382	88944	95927	108574	106800

e 15 dias de horossazonalidade e troca de turno, a solução ótima foi obtida em poucos minutos (\approx 6, 4 e 6 minutos, respectivamente) e, considerando 30 dias, foi necessário mais de 4 horas de processamento. Não foi possível provar a otimalidade dos cenários C7 e C8 dentro do tempo limite de 5 horas.

Tabela 27 – Resultados do Modelo de Temporização - 30 dias de horo. e troca

Cenário	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Status	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	viável	viável
Tempo (s)	210,66	863,56	344,97	91,11	362,79	14874,97	18035,19	18036,42
F. Objetivo	4,957E8	1,006E9	4,871E8	9,540E8	4,322E8	3,107E9	5,265E8	5,164E8
F.O. Relaxada	4,956E8	1,006E9	4,871E8	9,540E8	4,322E8	3,106E9	4,735E8	5,091E8
Gap (%)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	11,20	1,44
Iterações	47840	119697	79772	29931	63809	897836	1409904	1859294
Variáveis	51196	59531	58314	58960	57788	61964	60994	64530
Var. Int.	35805	42110	40720	41177	40771	44039	43216	47340
Restrições	155447	181970	165343	159373	160143	149090	184658	191088

Por meio dos resultados computacionais apresentados, observa-se que, para alguns cenários, é possível encontrar soluções ótimas em alguns minutos, considerando até 30 dias de horossazonalidade e troca de turno. Em outros casos, não é possível provar a otimalidade após algumas horas de processamento. Assim, pelos resultados observados nas tabelas 25 a 27, há uma tendência de tempo computacional de alguns minutos a horas quando considera-se restrições de horossazonalidade e troca de turno. Dentro do contexto abordado, tempos computacionais de horas, na prática operacional, tendem a ser proibitivos.

Buscando uma forma de obter boas soluções dentro de um tempo computacional aceitável considerando-se as restrições de horossazonalidade e troca de turno dos operadores para todo o horizonte temporal, uma abordagem de decomposição para o modelo de temporização é proposta na seção 8.8.

8.8 MODELO PLIM DE TEMPORIZAÇÃO DECOMPOSTO

Na literatura, existem várias propostas de algoritmos de decomposição para a resolução de modelos PLIM, como por exemplo, a decomposição de Benders (1962). Entretanto, Boschetto (2006) sugere estratégias de pré-processamento para modelos PLIM utilizando a teoria das restrições (*Theory of constraints* - TOC). Basicamente, um modelo de alocação de óleos crus presente na literatura, foi dividido buscando a obtenção de soluções em um tempo computacional aceitável para as práticas operacionais. Primeiramente, foi identificada a restrição “gargalo” do modelo. Esta foi retirada e o modelo sem a restrição “gargalo” foi executado. Após essa etapa, a partir do resultado obtido, algumas variáveis foram fixadas e o modelo foi executado novamente com a restrição “gargalo”.

Seguindo a mesma ideia apresentada por Boschetto (2006), o modelo PLIM proposto neste capítulo foi dividido em dois modelos: MRL (Modelo com Restrições Locais) e MHT (Modelo com Horossazonalidade e Troca de turno). O objetivo desta divisão é diminuir o tempo computacional, quando as restrições horossazonais e de troca de turno são utilizadas. Em linhas gerais, a figura 37 ilustra que, numa primeira fase, o MRL é executado. Nesta fase não se considera restrições horossazonais e de troca de turno, mas há considerações sobre restrições locais. Na sequência, fase 2, as variáveis binárias relativas às restrições locais são fixadas e são incluídas as restrições de horossazonalidade e troca de turno, e a solução final satisfazendo todas as restrições é obtida. Não houve ocorrências de soluções inviáveis. A tabela 28 indica quais restrições são utilizadas no modelo MRL e quais são usadas no modelo MHT. A função objetivo utilizada em ambos os modelos é a mesma (Expressão 86).

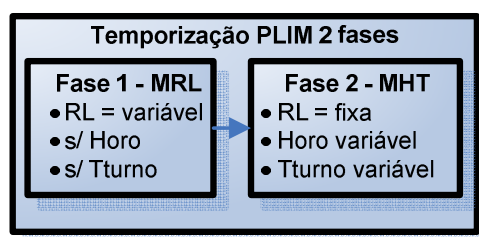


Figura 37 – Divisão do modelo de temporização

8.8.1 Modelo PLIM com restrições locais (MRL)

O MRL é similar ao modelo já apresentado neste capítulo. Contudo, as restrições horossazonais e as restrições de troca de turno são retiradas (restrições 113 até 124). Com isso, em geral, é possível obter uma solução preliminar, em baixo tempo computacional (poucos

Tabela 28 – Restrições utilizadas nos modelos MRL e MHT

Seção	Restrições	MRL	MHT
8.5.1	Satisfação do horizonte	✓	✓
8.5.2	Sequenciamento	✓	✓
8.5.3	Pulmão - Tancagem Intermediária	✓	✓
8.5.3	Pulmão - Bombeio Imediato	✓	✓
8.5.4	Horossazonais		✓
8.5.5	Troca de Turno		✓
8.5.6	Inventário	✓	✓
8.6	Locais - Gerais	✓	✓
8.6.1	Locais - Limitação em 2 dutos	✓	
8.6.2	Locais - Limitação em 3 dutos	✓	

segundos). Nesta solução obtida, ressalta-se que a ordem em que as bateladas devem ser bombeadas/recebidas para dutos distintos é determinada, visando a satisfação das restrições locais. O resultado do MRL é o mesmo apresentado na tabela 24, onde o modelo de temporização é executado para zero dias de horossazonalidade e troca de turno. Como os conjuntos são gerados de forma esparsa (vide Apêndice E, página 233), as restrições horossazonais e de troca de turno, automaticamente, não são criadas nesse caso.

8.8.2 Modelo PLIM com restrições horossazonais e troca de turno (MHT)

Obtidos os resultados do MRL, as variáveis binárias de decisão para as restrições locais são fixadas ($lb_{b,\bar{b}}^1$, $lb_{b,\bar{b}}^2$, $lr_{b,\bar{b}}^1$, $lr_{b,\bar{b}}^2$, $lbr_{b,\bar{b}}^1$, $lbr_{b,\bar{b}}^2$) e utilizadas no MHT. Como as variáveis binárias relativas às restrições locais são fixadas, as restrições 139 à 145 são eliminadas no modelo MHT. Além disso, conforme a figura 37, restrições horossazonais e de troca de turno são, neste estágio, criadas. A solução final do *scheduling* da rede de dutos é então obtida através da saída do MHT incluindo, por exemplo, os tempos de bombeio e recebimento das bateladas, vazão de bombeio, paradas por horossazonalidade e trocas de turno, tempos de início e término de parada das bateladas em cada trecho de duto, violações das janelas de tempo e incidência de restrições locais (previamente avaliadas pelo MRL).

8.8.3 Resultados obtidos

A tabela 29 apresenta o resultado da abordagem de subdivisão do modelo de temporização sugerida. Os resultados do MRL, para os oito cenários (C1 a C8) são os mesmos já apresentados na tabela 24. A partir das saídas do modelo MRL para cada um dos oito cenários e fixando-se as variáveis binárias relativas às restrições locais, executando-se o MHT, tem-se como resultado a tabela 29. Na tabela 29, são considerados 30 dias de horossazonalidade e

troca de turno para os oito cenários estudados. A plataforma computacional utilizada para os testes é um computador Intel Core 2 Duo 6400, 2.13 GHz, 3GB RAM. O *software* ILOG OPL Studio 6.3, CPLEX 12 também foi utilizado para a obtenção dessas soluções.

Tabela 29 – Resultados do MHT - 30 dias de horo. e troca

Cenário	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Status	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo
Tempo (s)	80,09	178,25	214,67	93,92	134,67	148,80	147,14	297,61
F. Objetivo	5,012E8	1,038E9	4,989E8	9,540E8	4,343E8	3,107E9	5,353E8	5,177E8
F.O. Relaxada	5,012E8	1,038E9	4,989E8	9,540E8	4,343E8	3,107E9	5,353E8	5,177E8
Gap (%)	0,00	0,00	< 0,01	0,00	0,00	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Iterações	36592	45993	57273	31341	43494	44317	49863	83840
Variáveis	49146	56169	53334	54280	53102	52276	52552	56972
Var. Int.	33755	38748	35740	36497	36085	34351	34774	39782
Restrições	154565	181481	163887	158813	158611	146811	169679	183674

Por meio da observação da tabela 29, é possível notar que, para a segunda fase (fase 2) da subdivisão do modelo matemático, uma solução pode ser obtida em menos de três minutos, para todos os cenários. Somando os tempos computacionais resultante pelo MHT com os tempos do MRL (tabela 24), uma solução é obtida, no pior caso (cenário C8), em menos de 6 minutos.

8.9 COMPARAÇÃO: MODELO AGREGADO \times DECOMPOSTO

O gráfico da figura 38 compara o valor da função objetivo de todos os cenários para as duas abordagens propostas. O modelo agregado, consiste no modelo contendo todas as restrições. O modelo decomposto consiste na decomposição do modelo agregado nos modelos MRL e MHT (seção 8.8). Nesta figura ressalta-se que é apresentado o valor da função objetivo do MHT porque esse modelo retorna a solução final do *scheduling* da rede de dutos considerando todas as restrições, inclusive as restrições locais, as quais foram previamente avaliadas pelo MRL. Dessa forma, a solução do modelo MHT é comparável à solução do modelo agregado.

Por meio da observação da figura 38 é possível notar que a variação do valor da função objetivo do modelo agregado para o modelo decomposto é pequena (menor que 3,13%). Para o cenário C4, a função objetivo obtida pelo MHT é idêntica à obtida pelo modelo agregado, considerando 30 dias de horossazonalidade e troca de turno. Vale lembrar que, apesar do valor da função objetivo ser igual em ambos os casos, a solução pode diferir (caso de soluções múltiplas). Nesse caso, mesmo dividindo o modelo agregado em MRL e MHT, uma solução ótima foi obtida. No pior caso, a função objetivo entre uma abordagem e outra varia 3,13%, para o cenário C2. A variação média, de todos os cenários estudados, considerando as duas abordagens, é de 1,14%.

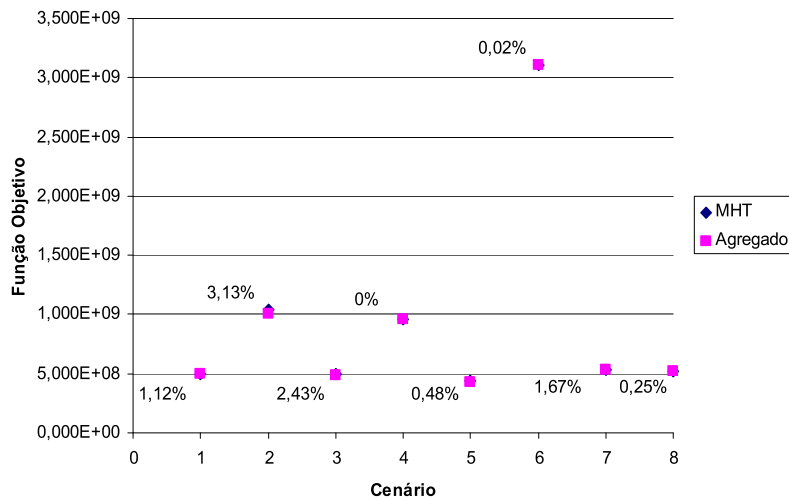


Figura 38 – Comparação das F.O.'s dos modelos agregado e decomposto (MHT)

O gráfico da figura 39 apresenta, de forma comparativa, duas curvas que representam o tempo para a obtenção da solução final considerando a abordagem agregada (em rosa) e a abordagem decomposta (em azul). Em particular, destaca-se o tempo computacional de C1 a C5 para facilitar a visualização dos resultados pelo leitor. Os dados temporais para a construção da curva da abordagem agregada são apresentados na tabela 27, enquanto os dados da abordagem decomposta são obtidos a partir da soma dos tempos computacionais obtidos pelo MRL (tabela 24) e MHT (tabela 29).

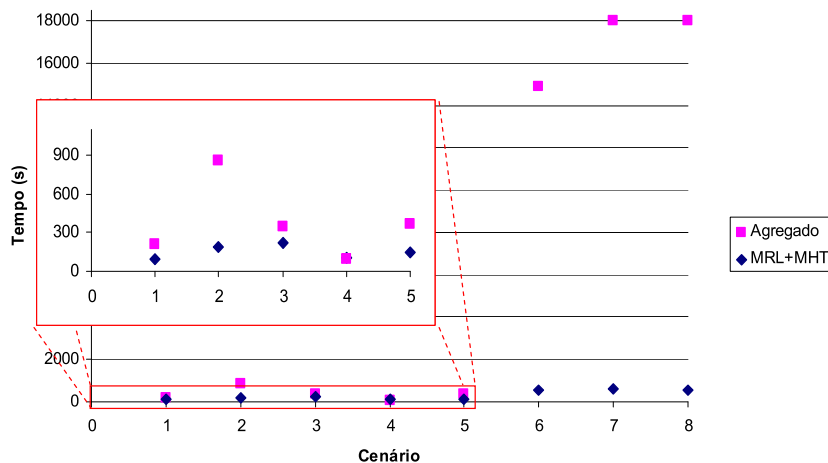


Figura 39 – Comparação temporal dos modelos agregado e decomposto

Observando-se a figura 39 para os cenários C1 à C5, nota-se que o tempo computacional para a obtenção da solução de ambas abordagens é muito próximo. Por esse motivo, foi realizado um *zoom* nessa região do gráfico para melhor evidenciar a diferença de tempo nesses cenários. Assim, é possível visualizar que, com exceção do cenário C4 onde a diferença no tempo computacional de ambas abordagens é pequena, o tempo computacional da abordagem

decomposta (MRL+MHT) é inferior ao tempo computacional da abordagem agregada. Para os cenários C6 à C8, essa diferença é ainda maior. Em particular, foi observado que houve a inclusão de um novo produto que passou a ser movimentado a partir do cenário C6. Isso pode ter causado o aumento no tempo computacional para o modelo agregado.

Finalmente, o gráfico da figura 40 apresenta o tempo computacional médio de todos os cenários estudados para a abordagem agregada e a decomposta (MRL + MHT). Pode-se perceber que, a divisão do modelo agregado em MRL e MHT propiciou a resolução dos cenários estudados (na média) em 4,62% do tempo gasto para a obtenção da solução utilizando a abordagem agregada.

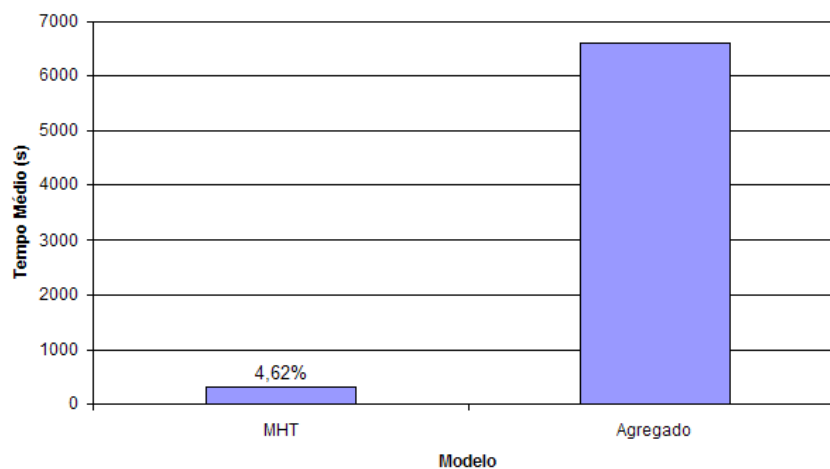


Figura 40 – Comparação do tempo médio dos modelos agregado e decomposto

Por meio da observação dos gráficos apresentados nesta seção (figuras 38 a 40) é possível perceber que, apesar do valor da função objetivo ser similar nos modelos agregado e decomposto (MRL + MHT), a estratégia de divisão do modelo PLIM tende a apresentar uma boa solução em um tempo computacional consideravelmente menor. Dessa forma, obteve-se soluções em tempos computacionais baixos (segundos a poucos minutos), sem comprometer a qualidade da solução encontrada.

8.10 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou o modelo de temporização PLIM que realiza o *scheduling* final da rede de dutos em estudo. Desta forma, foi elaborado um modelo de temporização de uma rede de dutos através das expressões 86 a 122. O modelo utiliza, basicamente, variáveis contínuas e binárias, interligadas através de restrições lineares, estruturado como um problema de programação linear inteira mista (PLIM) com domínio de tempo contínuo. Dentre as restrições contempladas pelo modelo de temporização, busca-se obter um *scheduling* ótimo em

termos temporais considerando como entrada a sequência e tamanhos de bateladas previamente definidos. Dessa forma, o modelo PLIM de temporização utiliza restrições para satisfação dessa sequência buscando a satisfação do horizonte de planejamento considerando restrições operacionais como, por exemplo, restrições de pulmão, horossazonais, troca de turno dos operadores, restrições de inventário (vide janelas de tempo), além de restrições locais da rede.

A partir dos cenários avaliados, observa-se que o modelo de temporização PLIM desenvolvido tende a apresentar uma carga computacional elevada, quando as restrições de horossazonalidade e de troca de turno são consideradas para o horizonte mensal (30 dias). A divisão do modelo de temporização em dois sub-modelos (MRL e MHT) mostrou-se adequada para a obtenção de respostas em um tempo computacional não elevado (segundos a poucos minutos), não comprometendo a qualidade da solução.

No capítulo seguinte, serão apresentados primeiramente alguns resultados gerais obtidos através da solução dos modelos propostos, incluindo diagramas de Gantt e gráficos de tancagem agregados por área e produto. Posteriormente, por meio dos resultados específicos é possível observar, com detalhes, a satisfação das restrições implementadas neste capítulo.

9 RESULTADOS OBTIDOS PARA A REDE DE DUTOS

Este capítulo apresenta resultados finais de planejamento e *scheduling* obtidos utilizando os seguintes blocos: Modelo de Planejamento PLIM (capítulo 5); Alocação de Recursos Heurística (capítulo 7); Pré-análise (capítulo 7); e Modelo de Temporização PLIM (capítulo 8). Os blocos de reordenação não foram utilizados por fazer parte do estudo de outros trabalhos (FELIZARI, 2009; YAMAMOTO *et al.*, 2007b). Como os resultados apresentados pelo modelo de alocação e sequenciamento PLIM não foram satisfatórios, não houve alimentação dos blocos posteriores com seus resultados.

Os diagramas de Gantt e gráficos de estoque foram obtidos por meio de uma ferramenta desenvolvida para um projeto de cooperação entre a UTFPR e o Centro de Pesquisas da PETROBRAS (CENPES). Através desta ferramenta, o programador pode escolher a estratégia de solução desejada como, por exemplo, a utilização (ou não) do bloco de reordenação, indicar os dias em que deseja que restrições horossazonais de troca de turno sejam ativadas, e escolha do cenário a ser trabalhado. Após a execução dos blocos e parâmetros escolhidos para a obtenção da solução, os resultados podem ser visualizados. A partir desta ferramenta, programações de curto-prazo podem ser propostas, programações existentes podem ser validadas e informações de diagnóstico da rede podem ser obtidas de forma a auxiliar o processo de tomada de decisão operacional.

Os resultados obtidos foram validados por especialistas (programadores experientes), que realizam o *scheduling* na rede de dutos em estudo. Os dados utilizados para a obtenção de soluções finais apresentadas nesse capítulo são os mesmos apresentados nos capítulos 5, 7 e 8. Contudo, focou-se os experimentos no cenário C3. Esse cenário foi escolhido porque, conforme a figura 19 (página 103), uma quantidade de produtos superior é movimentada. Adicionalmente, será apresentada uma comparação entre a utilização sugerida pelo modelo de planejamento, para cada duto, e a utilização final do *scheduling* proposto. Busca-se portanto, através desse cenário, verificar se é possível a realização do *scheduling* dentro do horizonte mensal de planejamento, quando grandes volumes precisam ser movimentados, satisfazendo todas as restrições impostas pelos modelos sugeridos.

Dentre os dados utilizados ressalta-se:

- informações de produção/consumo e limites de estocagem presentes no anexo A (página 243);
- solução do modelo de planejamento apresentada na tabela 14 (página 106);
- a lista de bateladas obtida pela alocação heurística (ex: tabela 19, página 130);
- dados oriundos da pré-análise (ex: tabela 20, página 135);
- as áreas e produtos onde ocorrem operações pulmão e estoque intermediário, apresentados na tabela 8 (página 84);
- informações de compatibilidade entre produtos (tabelas 9 e 10, página 87) também são respeitadas.

A seção 9.1 apresenta os resultados gerais obtidos, fornecendo diagramas de Gantt de bombeio/recebimento e gráficos de estocagem. Nessa seção objetiva-se apresentar uma visão geral do *scheduling* final. A seção 9.2 apresenta detalhes do *scheduling* obtido e respeito às restrições da rede em estudo como, por exemplo, influências das restrições de pulmão, locais, horossazonais e troca de turno nas soluções obtidas.

9.1 RESULTADOS GERAIS

As figuras 41 e 42 apresentam diagramas de Gantt de bombeamento e recebimento para o cenário C3, que considera 329 bateladas (incluindo bateladas auxiliares de reversão) ao longo de um horizonte de aproximadamente um mês. Todos os dutos com movimentações são apresentados, sendo possível, assim, obter uma visão geral da forma como é feita a utilização dos dutos da rede. Em todos os diagramas de Gantt apresentados, a nomenclatura associa o produto e seu código (ex: produtos 6, 10 e 14) por meio da cor representada nos blocos temporais.

É possível visualizar na figura 41 que, por exemplo, analisando o duto 1, o produto 31 é bombeado no início do horizonte, numa quinta-feira (dia 14). Após o bombeio do produto 31, ocorre o bombeio do produto 18 no mesmo duto, deslocando o produto 31. O bombeio do produto 18 é realizado até o dia 16 (sábado) quando ocorre a parada de bombeio.

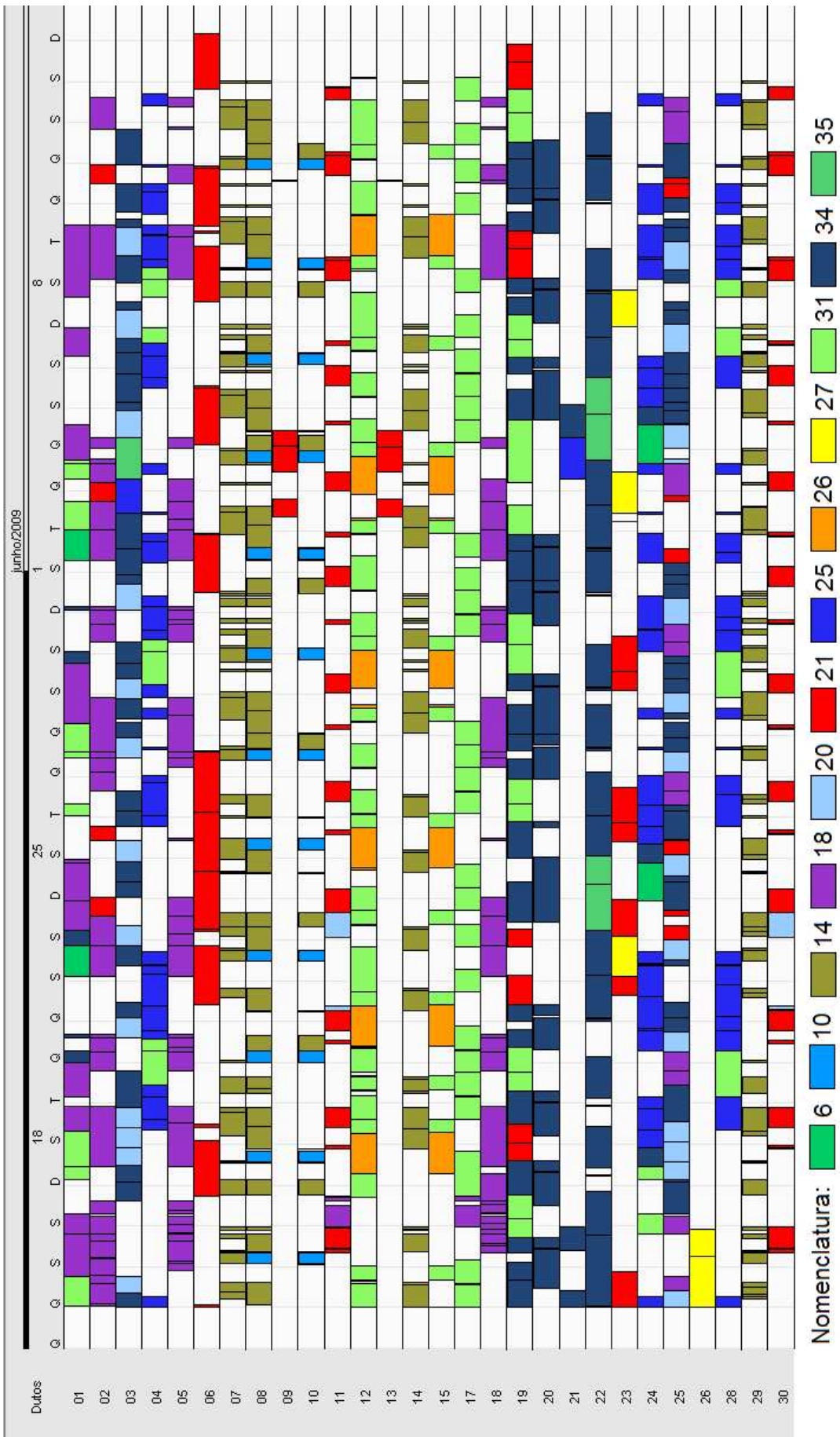


Figura 41 – Diagrama de Gantt de bombeamento

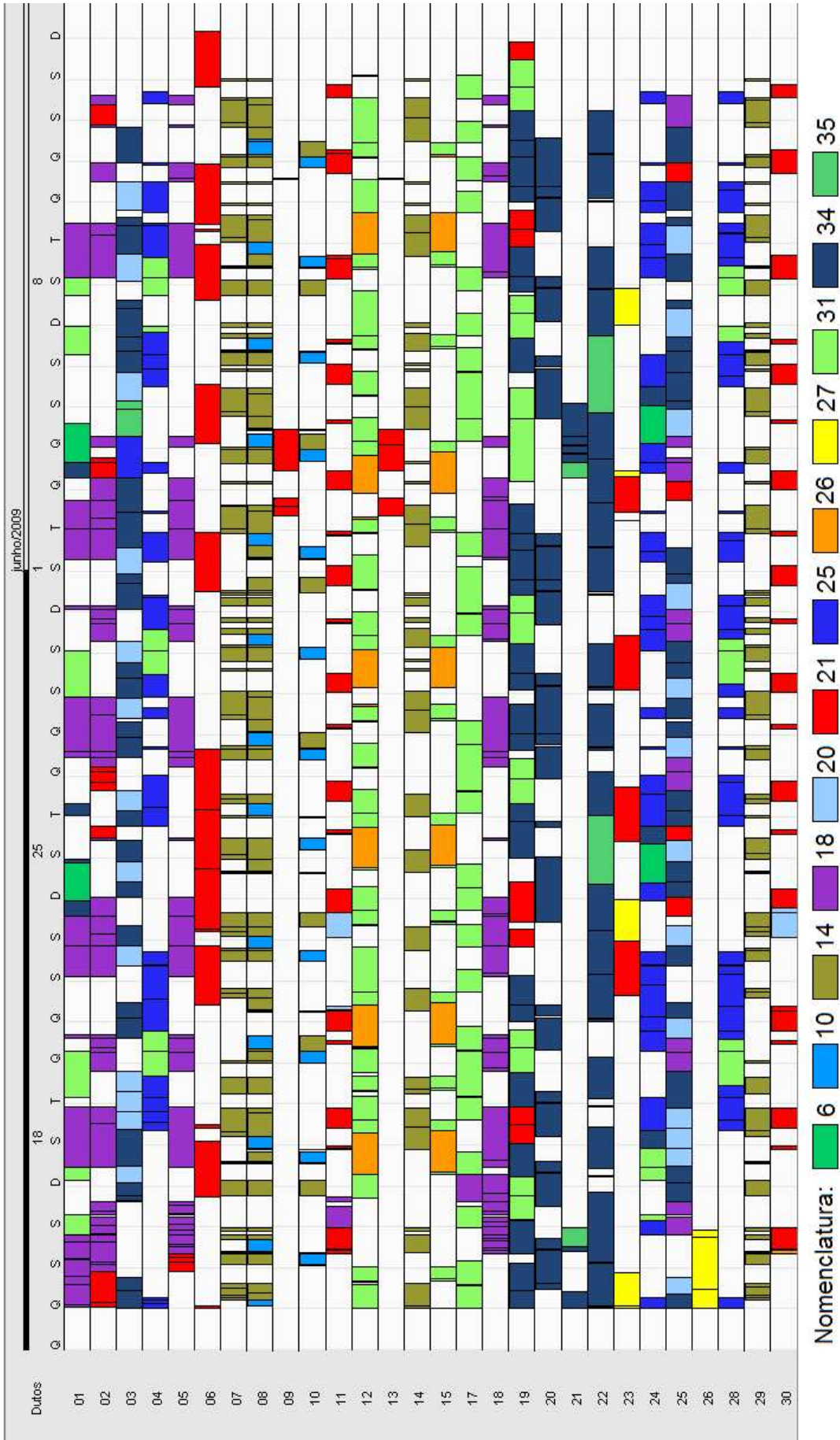


Figura 42 – Diagrama de Gantt de recebimento

Comparando os Gantt das figuras 41 e 42, é possível visualizar a diferença do produto que está sendo bombeado com o produto que está sendo recebido. Essa diferença já pôde ser notada pela figura 27 (página 142) apresentada no capítulo anterior. Ela é mais notória, principalmente nos dutos com maior volume (vide tabela 7, página 79), por exemplo, dutos 1, 3 e 21. É possível observar nas figuras 41 e 42 para os dutos maiores que, quando analisado um mesmo instante de tempo, enquanto há bombeio de um produto, há o recebimento de outro produto. Isso acontece porque após bombeado, o produto dever percorrer todo o duto, para em um instante de tempo posterior, ser recebido.

O *scheduling* obtido apresenta de forma detalhada, as informações para as várias frações volumétricas¹ (ou pedaços) para uma mesma batelada. Este fato é ilustrado na figura 43, que mostra o resultado da temporização para os 7 primeiros dias do horizonte de planejamento.

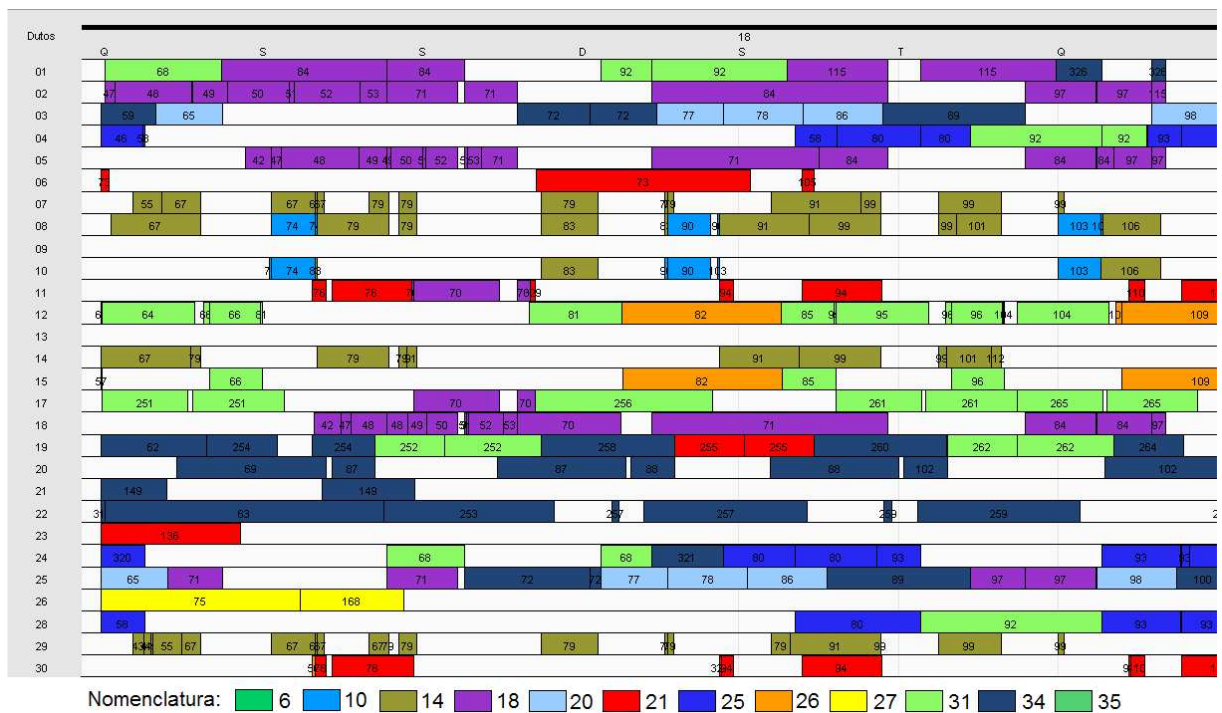


Figura 43 – Diagrama de Gantt de bombeamento - 7 dias

A figura 43 permite visualizar o índice b nas bateladas e as divisões nos blocos temporais de uma mesma batelada. O bloco temporal de uma batelada é dividido quando a vazão é alterada (ex: batelada 92 no duto 1) ou quando paradas de bombeio são necessárias. Por exemplo, no duto 25 é possível visualizar 2 pedaços da batelada 71. As paradas de bombeio ocorrem frequentemente quando os dutos são compartilhados por várias rotas e produtos distintos, conforme explicado na seção 7.4, página 133.

A figura 43 permite visualizar quando uma batelada passa por diferentes dutos. Por

¹As frações volumétricas de uma mesma batelada podem ser visualizadas de forma independente quando há mudança de vazão.

exemplo, é possível notar na figura que a batelada 67 (produto 14) passa pelos dutos 14, 8, 7 e 29. A rota dessa batelada é N10→14→N9→8→N5→7→N12→29→N2, conforme apresentado na figura 44. Além disso, um *zoom* da figura 43 pode ser visualizado através da figura 45, onde a batelada 67 está em destaque e, somente os dutos por onde ela se desloca são apresentados.

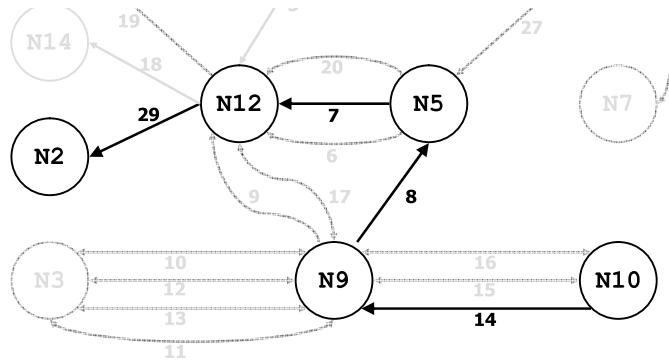


Figura 44 – Rota da batelada 67

Através da figura 45, é possível perceber que a batelada 67 permanece parada nos dutos 7 e 29 porque, só há a sua movimentação quando há o bombeio da batelada 74 (duto 8) deslocando a batelada 67 para que ela seja recebida. Mais detalhes a respeito de influências de bombeio são apresentados na seção seguinte, onde serão apresentados os resultados específicos.

Dutos	Q		S		S		D	
	Q	S	S	D	D	S	S	
14		67	79		79	79		
08		67		74	79	79		83
07		55	67	67	67	79	79	79
29	43	55	67	67	67	79	79	79

Figura 45 – Dutos por onde passa a batelada 67

Assim como a batelada 67, grande parte das bateladas apresentadas na tabela 19 (página 130) podem ser visualizadas na figura 43 para os 7 primeiros dias (A coluna *b* da tabela representa o número das bateladas nos blocos temporais da figura). É possível visualizar que o modelo de temporização PLIM respeita a sequência sugerida nesta tabela. Por exemplo, no duto 24, a batelada 321 é bombeada entre as bateladas 68 e 80, respeitando a sequência imposta na tabela 19 para bombeamentos nesse duto.

A partir dos tempos de bombeio e recebimento obtidos, é possível traçar o perfil de tancagem nas diversas áreas para os diferentes produtos. Nesse procedimento, leva-se em conta também o estoque inicial de cada tanque e possíveis produções e demandas locais. Nas figuras 46 a 57, são apresentados o perfil típico de tancagem para cada produto movimentado. Cada

linha apresenta a movimentação de uma determinada área que pode ser produtora, consumidora ou apenas possuir tanques para armazenagem (áreas que realizam operação pulmão ou tancagem intermediária). As figuras apresentam níveis agregados de estoque dentro de um horizonte de 30 dias.

O gráfico da figura 46 apresenta um exemplo onde só uma área produz o produto 10 (área N3 - linha azul) e há apenas um consumidor desse produto (área N5 - linha vermelha). Dessa forma, para a área N3, as linhas crescentes indicam que há produção do produto 10, aumentando o estoque e a linha decrescente indica que houve o envio de uma batelada do produto 10. Como a taxa de envio é maior que a taxa de produção, há o decaimento na curva de estoque nessa área. Em contrapartida, as curvas crescentes na área N5 indicam o recebimento de uma batelada, enquanto as curvas decrescentes indicam o consumo do produto.

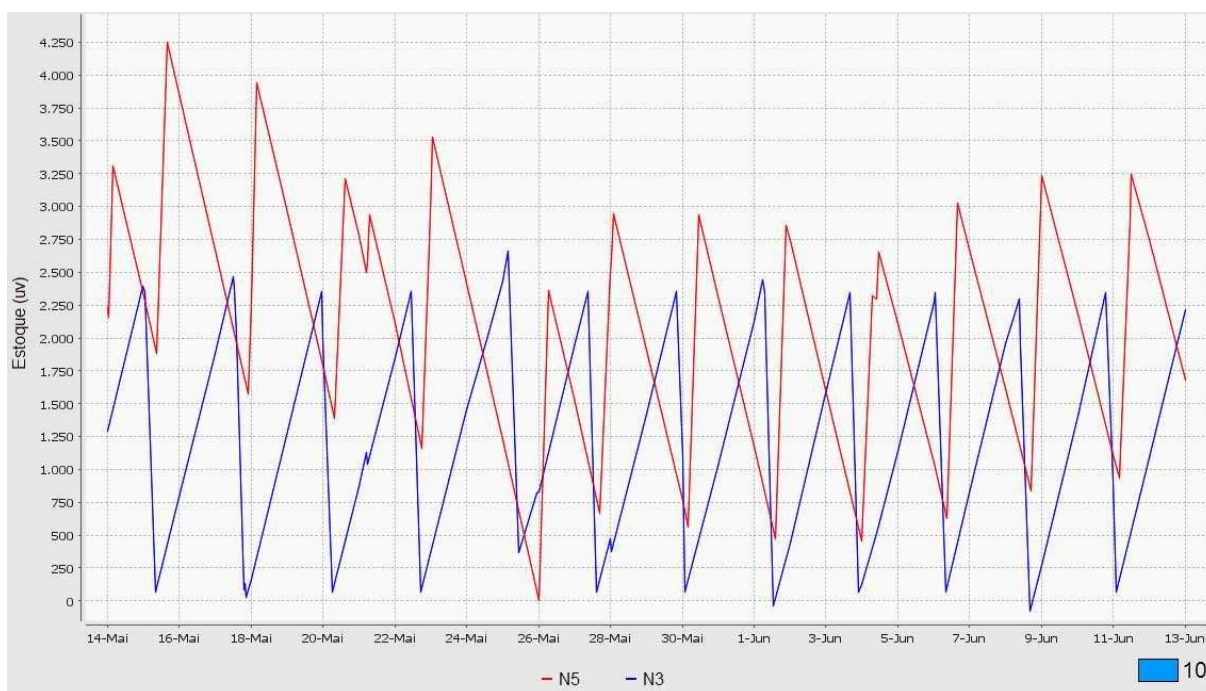


Figura 46 – Estoque do produto 10 em diferentes áreas

Através da análise do gráfico da figura 47, pode-se perceber que, neste estudo de caso, não há área consumidora dentro da rede de dutos estudada para o produto 6. A área N4 é uma área produtora e precisa enviar o produto para não estourar a capacidade. A área N6 possui tancagem desse produto, mas não há consumo. Por isso, o modelo de planejamento sugeriu o envio do produto 6 a partir de N4 para N6. Esse é um típico caso onde o produto deve ser degradado² no destino, para suprir demanda de outros produtos que pertençam ao mesmo grupo.

A observação da figura 48 permite evidenciar linhas constantes, como no caso da área

²Como explicado na seção 5.7, página 107, questões de degradação de produto podem vir a ser tratados em trabalhos futuros.

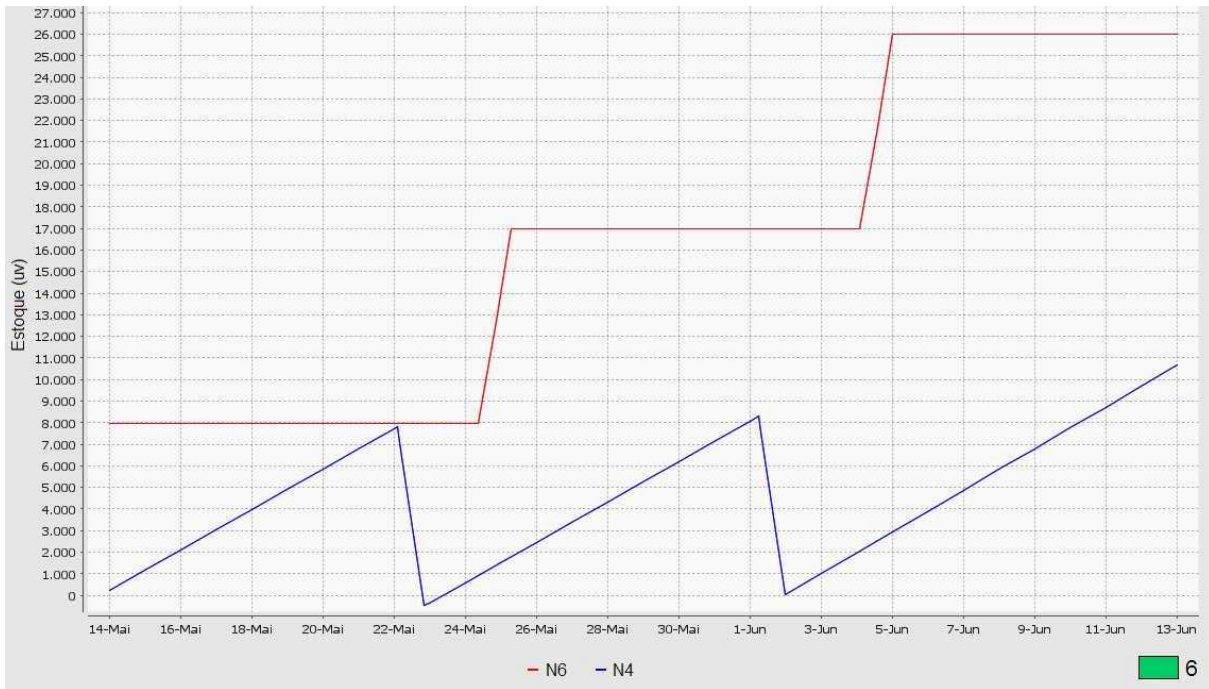


Figura 47 – Estoque do produto 6 em diferentes áreas

N9 (linha vermelha), indicando que há tanques para o armazenamento do produto, mas que esses tanques não são utilizados. Adicionalmente, pode-se inferir que não há consumo, produção, recebimento ou envio de bateladas do produto 14 em N9, pois a linha permanece constante durante todo o mês. Pela observação do gráfico na figura 48, pode-se perceber que a área N10 envia produto para N2, enquanto N3 envia para N5.

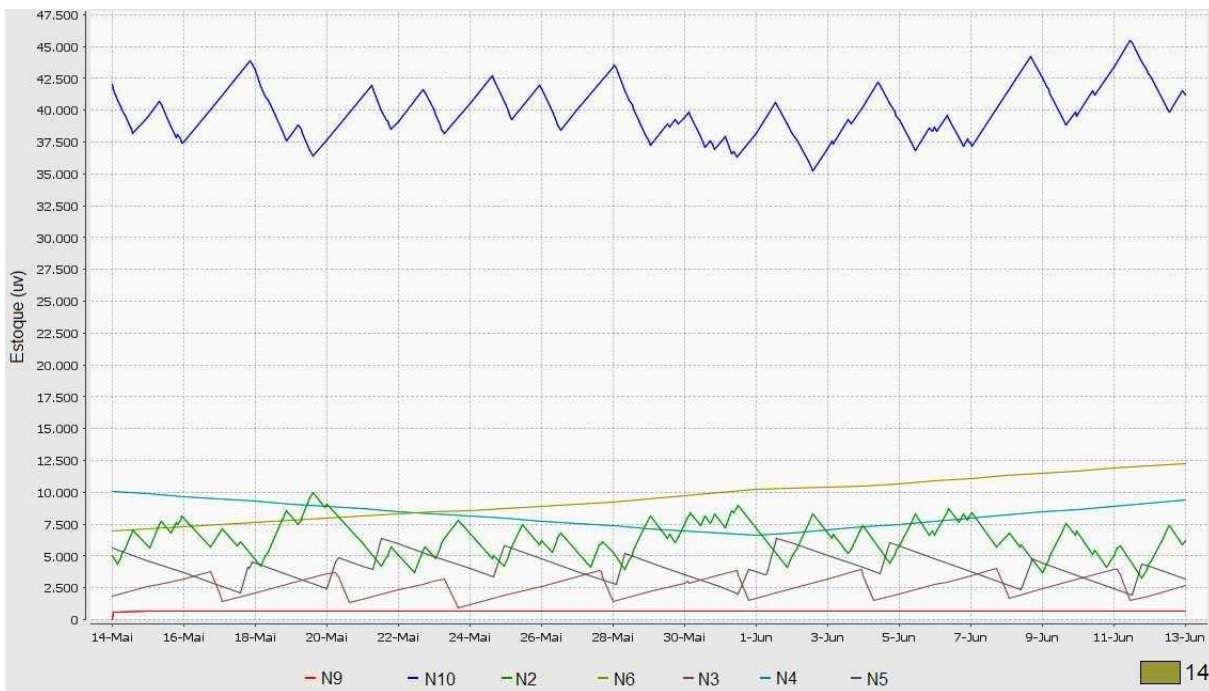


Figura 48 – Estoque do produto 14 em diferentes áreas

No caso do produto 18 (figura 49), a área N14 não tem produção local. Dessa forma, as curvas crescentes indicam o recebimento de bateladas, ou seja, a área N14 não envia o produto 18 (linha vermelha) para outras áreas. De fato, a área N14 é uma área consumidora exclusiva do produto 18. Dessa forma, as curvas decrescentes indicam o consumo local do produto 18 nessa área. O consumo de N14 é suprido através de várias áreas como N4, N6 e N7. As diferentes inclinações crescentes em N14 indicam o recebimento de (partes de) bateladas em diferentes vazões.

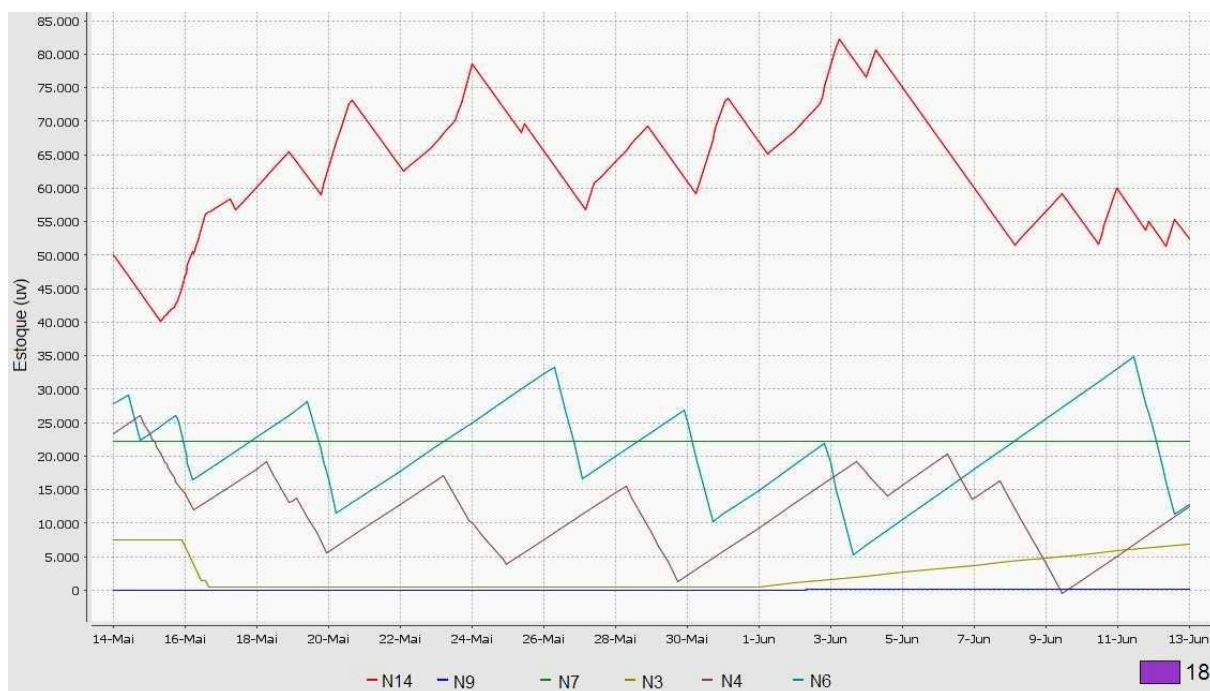


Figura 49 – Estoque do produto 18 em diferentes áreas

No gráfico na figura 50, a área N6 (produtora) envia o produto 20 para N7 (consumidora). Pelo fato do duto 3 (o qual conecta N7 a N8) transportar vários outros produtos, apesar de N7 ser suprido por apenas N6, a curva não é simétrica. No caso, os dutos da rota em que o duto 3 faz parte são compartilhados com outros produtos.

Semelhante ao que ocorre com o produto 20, a figura 51 apresenta o envio do produto 27 da área produtora N4 para o terminal consumidor N13, além do envio do produto, estocado em N8, para o suprimento da demanda em N6.

Na figura 52 ressalta-se um caso particular em que os dutos da rota são praticamente dedicados para o produto 27, possibilitando ao leitor notar a “simetria” entre as curvas. Na figura 52, a área N3 é uma refinaria que supre a demanda do produto 26 para o terminal portuário N10 durante todo o horizonte de *scheduling*. Os perfis dessas duas áreas são “quase” simétricos, ou seja, ao mesmo tempo que N3 está enviando uma batelada do produto 26, N10 está recebendo

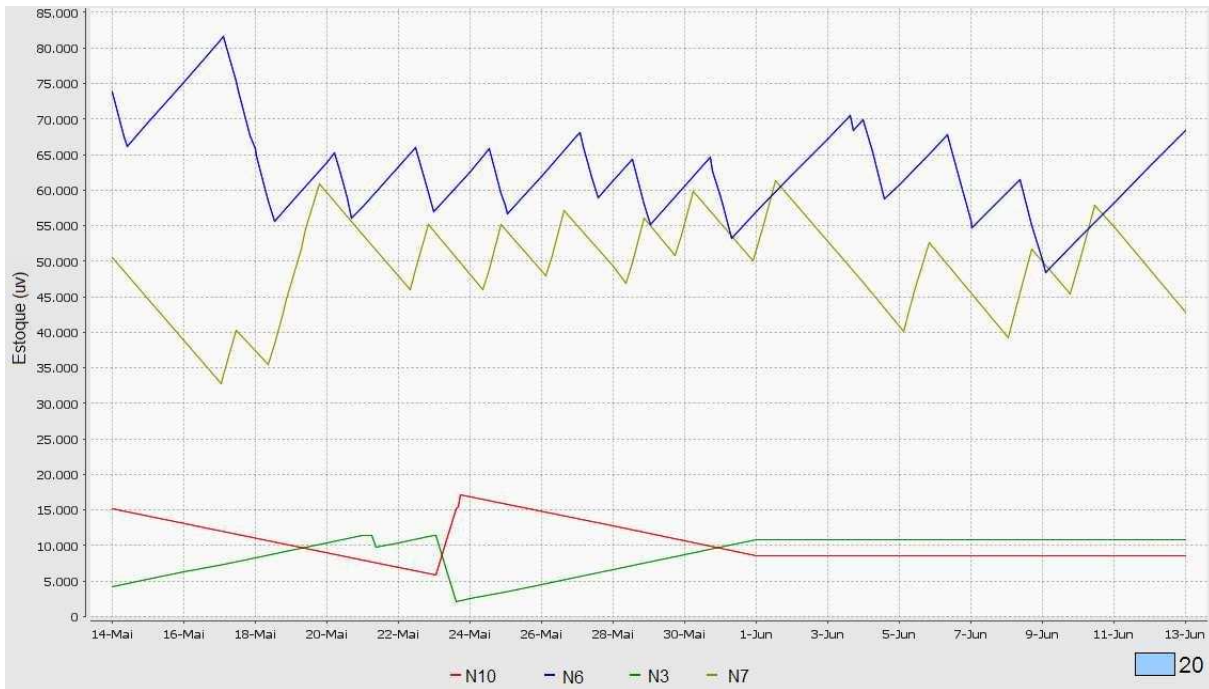


Figura 50 – Estoque do produto 20 em diferentes áreas

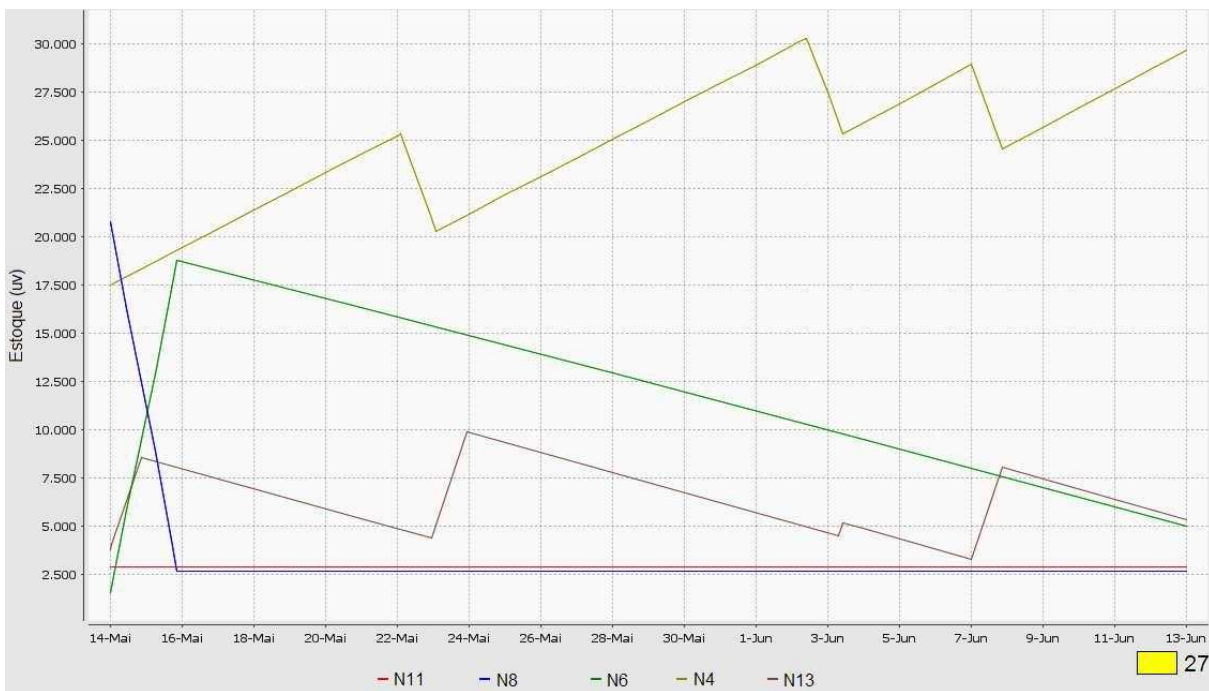


Figura 51 – Estoque do produto 27 em diferentes áreas

o mesmo produto. Em um momento inicial, N10 recebe o produto que está preenchendo a rota de N3 a N10, passando a receber posteriormente algumas partes da batelada bombeada. Isso ocorre porque a rota entre N3 e N10 é praticamente dedicada para o produto 26.

O gráfico da figura 53 apresenta a movimentação do produto 21. Como esse produto é bastante movimentado durante o cenário analisado e possui várias origens para um único

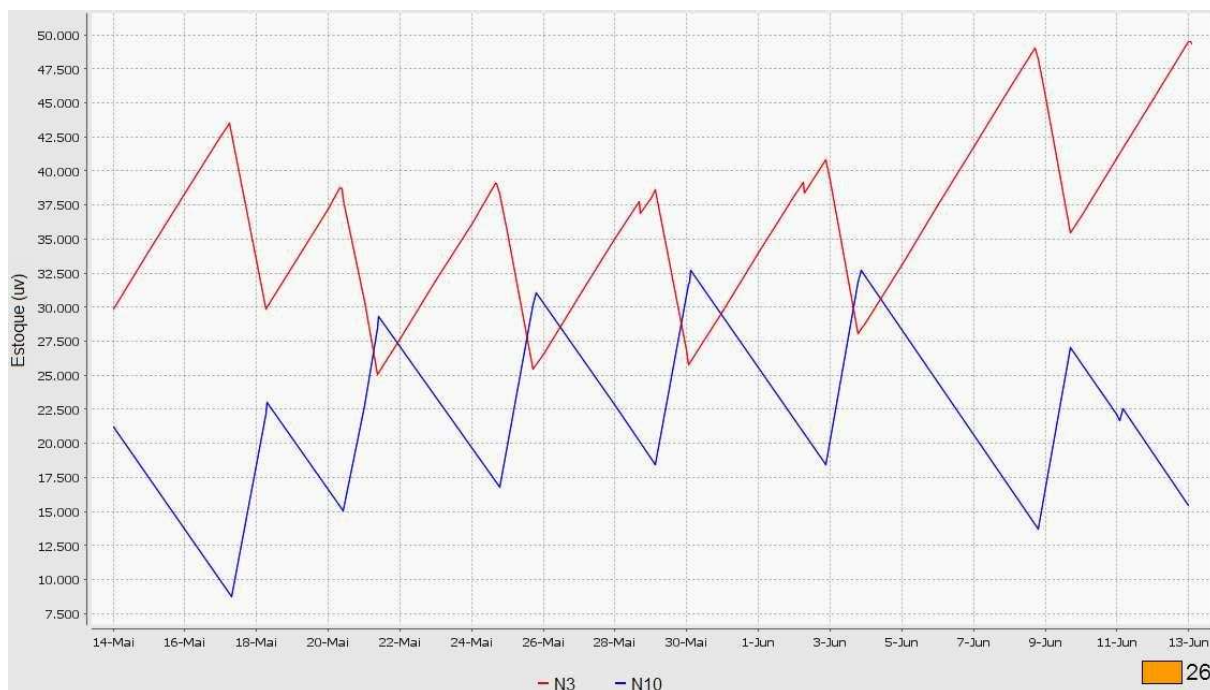


Figura 52 – Estoque do produto 26 em diferentes áreas

destino, ou ainda, uma origem para vários destinos, não é possível identificar uma conexão clara entre as áreas produtoras e consumidoras nos órgãos de tancagem. Este gráfico dá indícios da complexidade operacional a ser gerenciada no cenário para a obtenção do *scheduling* das operações de bombeio do produto 21 nas origens e destinos.

É possível ainda perceber na figura 53 que as áreas N4 e N6 possuem um volume de estocagem bem maior que as demais áreas (acima de 60.000uv). Adicionalmente, não há movimentação do produto 21 nas áreas N8 e N9 (linhas constantes em 43000uv e 0uv, respectivamente). Tipicamente, essas áreas são usadas para a realização de operações pulmão.

A figura 54 apresenta outro exemplo de evolução da tancagem em 4 áreas para o produto 25. Pode-se perceber que a movimentação no estoque é maior nas áreas N6 (linha azul) e N11 (linha vermelha), ou seja, há movimentação do produto 25 da área N6 (produtora) para a área N11 (consumidora). A área N6 é uma refinaria que normalmente fornece o produto 25 para o terminal N11, suprindo sua demanda durante todo o mês programado. Quando a produção de N6 não é suficiente para o atendimento da demanda de N11, essa demanda pode ser suprida também por N7 (linha amarela). No exemplo, há envio de uma batelada de N7 para N11 entre os dias 2 e 3 de junho.

Pode-se visualizar o comportamento das áreas que fazem pulmão (ou estoque intermediário) nos gráficos das figuras 55 e 56. Para o gráfico da figura 55, a área N9 (linha azul escura) não produz nem consome o produto 31. Há a necessidade de movimentação desse produto a

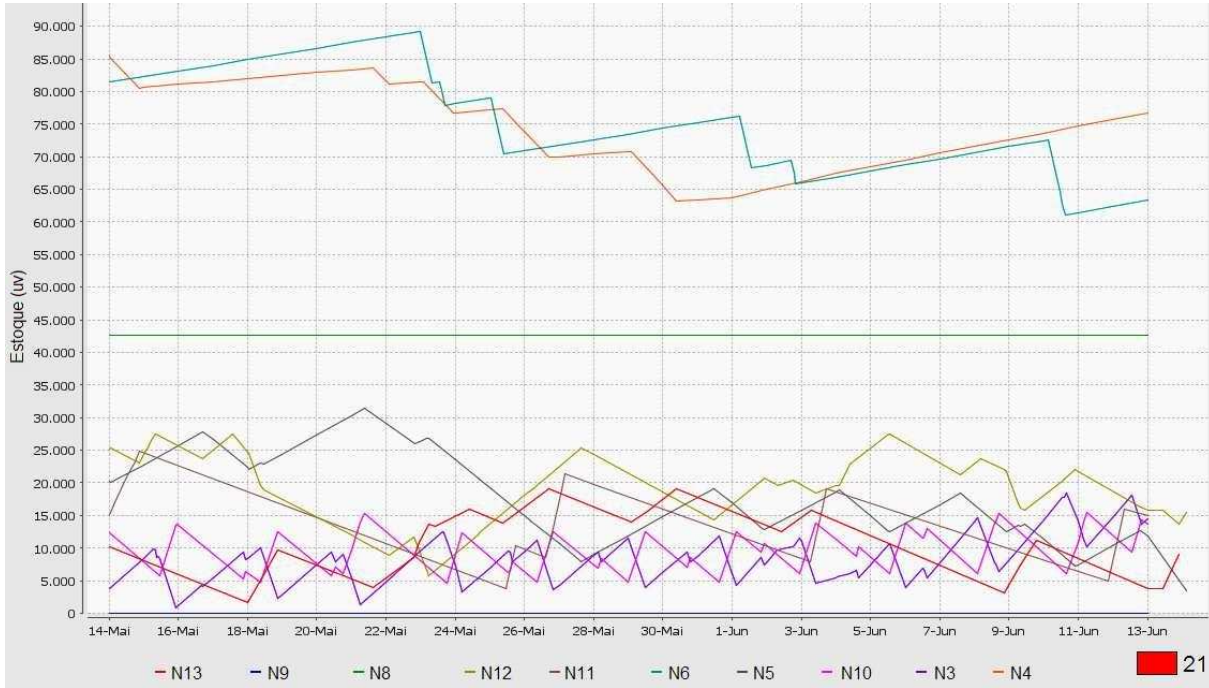


Figura 53 – Estoque do produto 21 em diferentes áreas

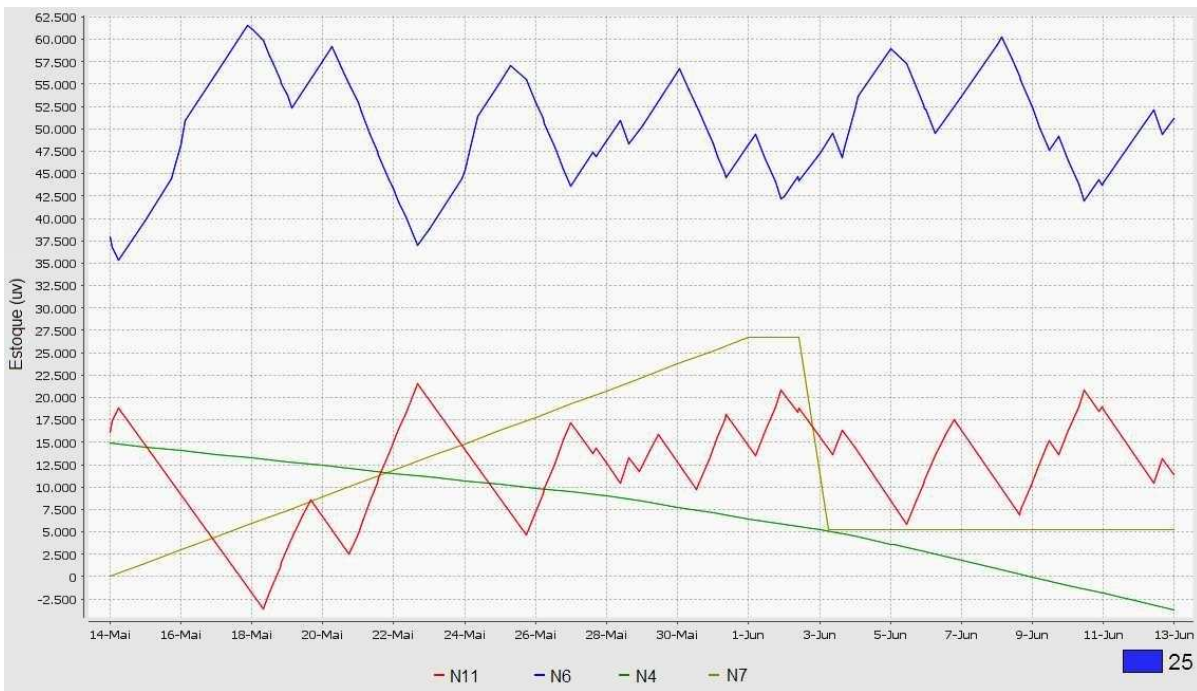


Figura 54 – Estoque do produto 25 em diferentes áreas

partir de N3, para suprir a demanda de N12 e N13. Porém, não há rotas diretas de N3 para N12 e nem de N3 para N13. O modelo de planejamento sugere, portanto, a utilização de N9 como área de pulmão/estoque intermediário, fazendo a movimentação do produto 31 inicialmente de N3 para N9 e, posteriormente, de N9 para N12 (ou N13). Por esse motivo, as curvas do estoque

de N9 (linha azul escura) para esse produto têm inclinações positivas, seguidas de inclinações negativas, pois há recebimento e posterior envio do produto 31.

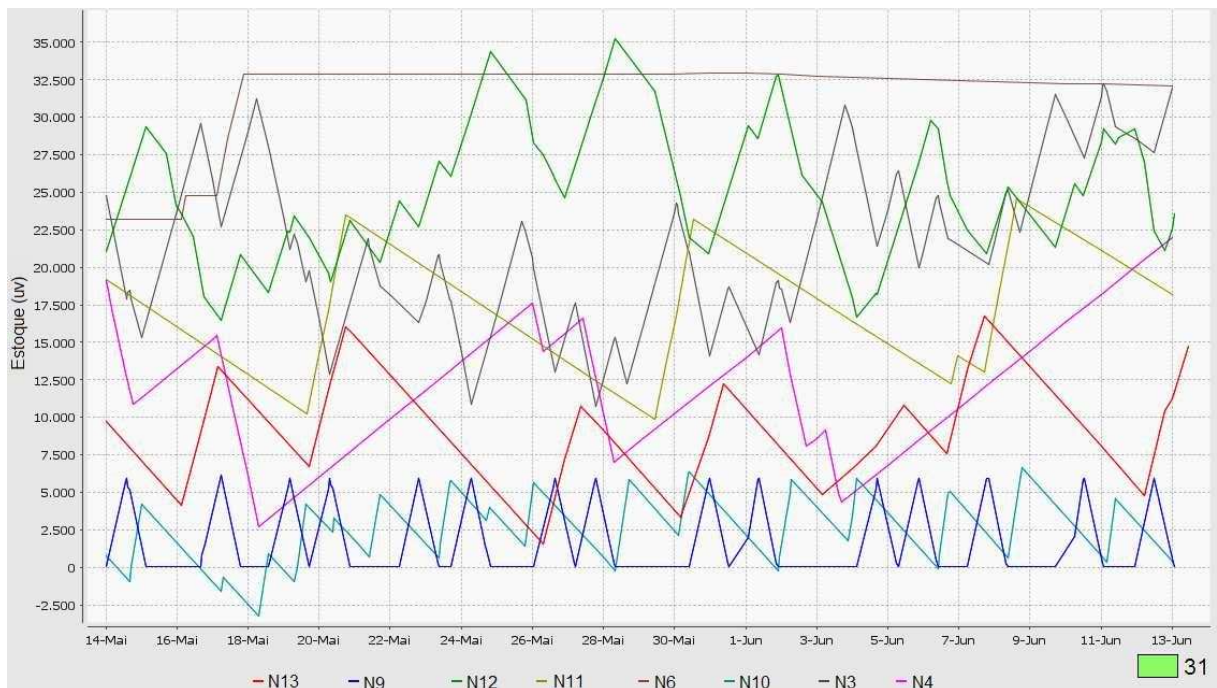


Figura 55 – Estoque do produto 31 em diferentes áreas

Na figura 56, a operação pulmão pode ser visualizada na área N12, onde há pequenos picos na curva do produto 34 para essa área (representada pela linha vermelha). Detalhes a respeito dessa operação serão apresentados na seção 9.2.

Um exemplo de utilização de produto estocado para envio no auxílio da operação de reversão pode ser visualizado no gráfico da figura 57. Não há produção, consumo, envio ou recebimento do produto 35 na área N7 (linha verde). Porém, é possível visualizar um pico “negativo” entre os dias 3 e 5 de junho. Ou seja, a curva decrescente indica o envio do produto para o duto (batelada auxiliar de reversão), visando o deslocamento da batelada “armazenada” no duto; curva positiva representa o recebimento do produto 35 (empurrado por outro) em N7.

As taxas de utilização dos dutos da rede em estudo são apresentadas no gráfico da figura 58. Nessa figura, são comparadas as taxas de utilização previstas pelo modelo de planejamento (barras azuis) com as taxas de utilização final do *scheduling* da rede de dutos (barras laranjas). Há uma variação entre as taxas de utilização planejada e final. Essa variação deve-se a dois fatos principais:

1. O modelo de planejamento não consegue precisar as vazões com que os produtos serão deslocados nos dutos. Dessa forma, a estimativa da taxa de utilização nessa etapa de

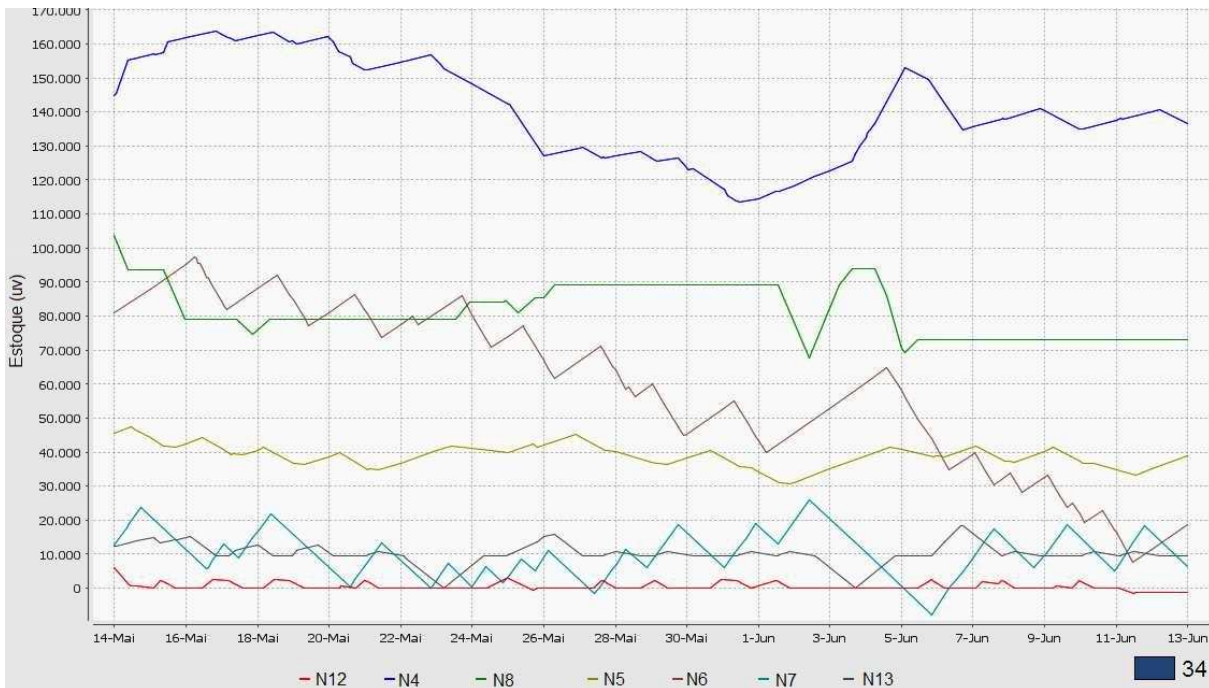


Figura 56 – Estoque do produto 34 em diferentes áreas



Figura 57 – Estoque do produto 35 em diferentes áreas

solução é feita considerando-se o tempo de deslocamento médio dos produtos ao longo da rede (vide seção 5.2, página 92);

2. Bateladas auxiliares de reversão e para o deslocamento de outras bateladas que permaneceriam nos dutos, para seu inteiro recebimento, são adicionadas na etapa de alocação de recursos heurística (seção 7.2, página 125). Dessa forma, a taxa de utilização após a

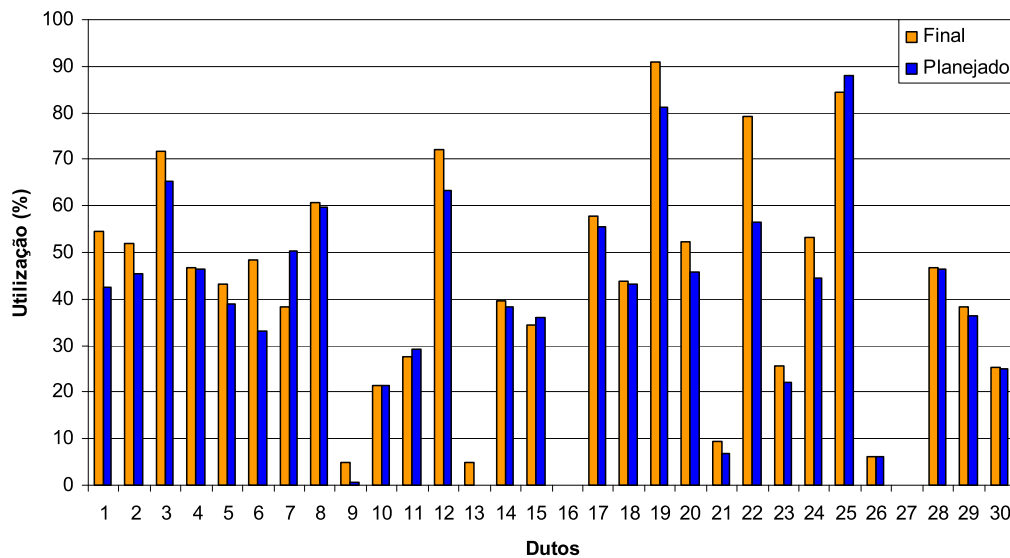


Figura 58 – Taxa de utilização dos dutos (Final *versus* Planejada)

influência da alocação de recursos heurística tende a aumentar.

A observação da figura 58 permite evidenciar que as taxas de utilização final e planejada podem diferir. A adição pela alocação de recursos heurística de bateladas auxiliares de reversão e bateladas para deslocar produtos dos dutos contribui para que estas taxas difiram. Contudo, mesmo com a interferência da alocação de recursos heurística, em alguns dutos, observa-se uma variação³ inferior a 5% entre as taxas final e planejada (ex: dutos 4, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 25, 26, 27, 28 e 30). Adicionalmente, como objeto de estudo futuro, pode-se realizar uma validação das vazões médias utilizadas pelo modelo de planejamento a partir dos resultados finais do *scheduling* obtido.

Vale ainda ressaltar que as taxas de utilização apenas refletem o planejamento mensal de transporte nos dutos. O momento (tempo) em que as movimentações ocorrem é determinado pelo modelo de temporização PLIM.

9.2 RESULTADOS ESPECÍFICOS

9.2.1 Influências de bombeio - Pedacos

A figura 59 apresenta três dutos extraídos do diagrama de Gantt resultante do modelo proposto (figura 41). Em destaque apresenta-se a batelada 80, cuja rota contempla as seguintes áreas e dutos: N6 → 24 → N8 → 28 → N1 → 4 → N11 (ver figura 12, página 79).

³ $|1 - (\text{taxa final} / \text{taxa planejada})| * 100\%$

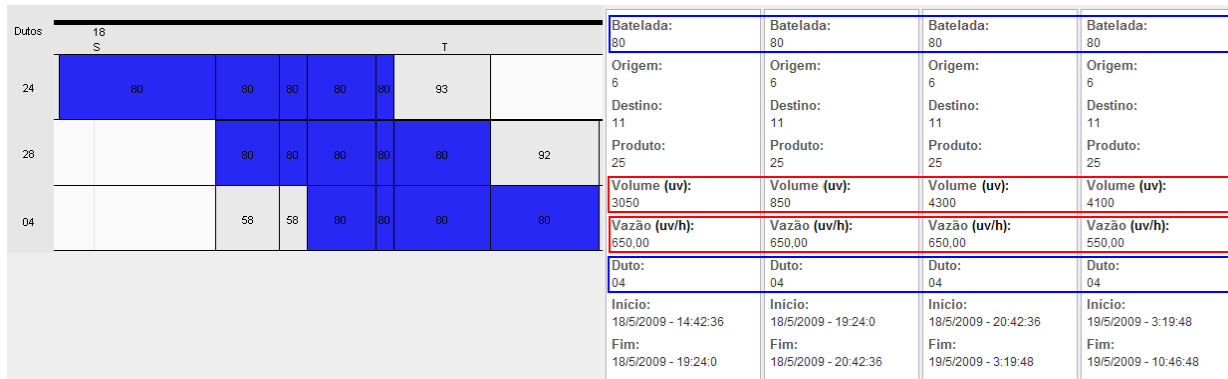


Figura 59 – Diagrama de Gantt: Batelada 80

Dessa forma, em uma situação normal, uma batelada utiliza uma rota para sair de sua origem e ser entregue em seu destino final, podendo utilizar todos os dutos da rota. Nesse caso, a batelada 80 é bombeada de N6 com destino a N11, passando pelos dutos 24, 28 e 4, respectivamente. Pode-se perceber que existem vários blocos temporais com o mesmo índice de batelada. É importante notar que o número de frações volumétricas que são bombeadas na área de origem pode diferir do número de partes que são recebidas nas áreas subsequentes. Por exemplo, nos dutos 24 e 28, há 5 blocos temporais (partes) correspondentes à batelada 80. Já no duto 4, a batelada 80 é dividida em 4 blocos temporais. A pré-análise divide a batelada em vários volumes (partes da batelada) que serão bombeados (ou recebidos), suprindo o modelo PLIM de temporização através de parâmetros (ex: tabela 20, página 135). A diferença da duração temporal das bateladas entre um duto (ex: pedaço 5 da batelada 80 nos dutos 24 e 28) e outro dá-se pelo fato de que a batelada é deslocada pela vazão e volume de uma outra batelada que está sendo bombeada em sua origem. Varia-se, dessa forma, a vazão e volume em que a batelada é deslocada em cada duto.

Ainda na figura 59, é possível identificar quais as bateladas que estão sendo bombeadas em suas origens (bo_b) que influenciam o deslocamento de frações da batelada 80 (b). No duto 24, a segunda fração da batelada 80 inicia seu bombeio, empurrando o primeiro pedaço da batelada 80 para o duto 28, influenciando seu movimento. A batelada 93 inicia seu bombeio no duto 24, empurrando o último pedaço da batelada 80 no duto 28, e o terceiro pedaço da batelada 80 no duto 4. Dessa forma, é possível observar a influência de bombeio de uma batelada bombeada em sua origem (bo_b) sob uma batelada b .

9.2.2 Restrições locais

Há casos em que o bombeio de uma batelada é interrompido, voltando a ser posteriormente realizado. Essas paradas podem ser visualizadas na figura 60 através de separações

entre blocos temporais de uma mesma batelada em um determinado duto. Isso acontece com as bateladas 193 e 209 nos dutos 11 e 13. Para a batelada 193, o primeiro pedaço é bombeado no fim do dia 1º de junho, enquanto o segundo pedaço é bombeado majoritariamente no dia 3 de junho. A batelada 193 bombeia o primeiro pedaço para deslocar outra batelada que estava preenchendo o duto 11. Dessa forma, o recebimento das bateladas ocorre de forma intercalada, evitando-se violações nos estoques de destino.

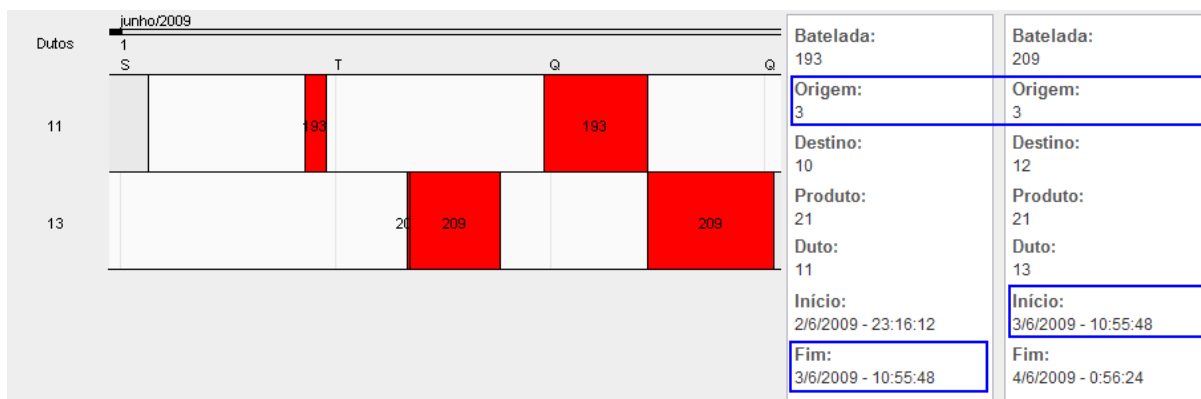


Figura 60 – Exemplo de restrição local

Também na figura 60, pode-se identificar um exemplo de restrição local. Os dutos 11 e 13 são adjacentes à área N3. As bateladas 193 e 209 do produto 21 não podem ser bombeadas simultaneamente nessa área. A terceira parte da batelada 209 deve esperar o final do bombeio da segunda parte da batelada 193 no duto 11 para, então, iniciar seu bombeio.

9.2.3 Restrições de reversão e pulmão

A temporização das atividades de transferência é feita respeitando o sequenciamento das bateladas determinado pela alocação/reordenação, inclusive respeitando a ordem das bateladas auxiliares que são incluídas posteriormente na lista. As bateladas auxiliares de reversão são geradas para garantir a entrega das bateladas que já preenchem o duto, revertendo-o logo em seguida. A figura 61 apresenta um duto onde ocorre a reversão de fluxo (duto 24). A figura apresenta detalhes para o dia 23 ao dia 27, onde ocorre a reversão auxiliada pela batelada 323. Como pode ser visualizado na figura, a batelada 129 opera no sentido de N4 a N6. A batelada 323 sai da área N8 deslocando a batelada 129 para que ela seja totalmente entregue, preenchendo todo o duto 3. A batelada 132 realiza a reversão de fluxo empurrando a batelada 323 que retorna ao nó N8, seguida pela batelada 145 que desloca a batelada 132 para que ela passe inteiramente para outro duto da rede.

A figura 62 apresenta um exemplo de operação pulmão. Ela envolve três dutos (19, 20 e 22) onde as áreas N12 e N13 contêm tanques para a operação pulmão. Dessa forma, o envio

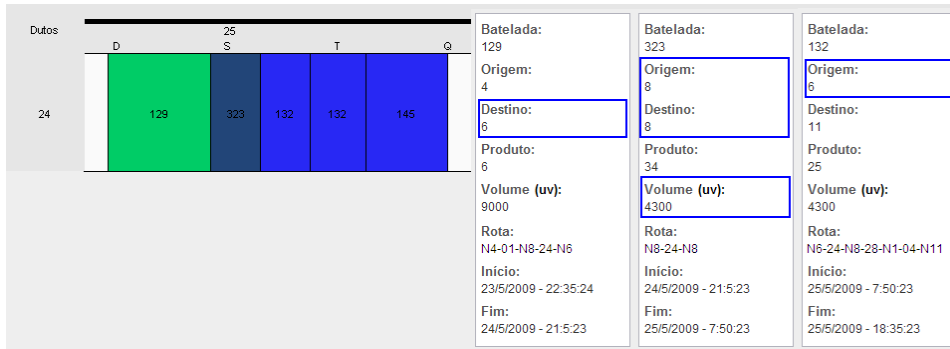


Figura 61 – Exemplo de reversão de produtos no duto

do produto 34 utiliza as seguintes áreas e dutos: N5 → 20 → N12 → 19 → N13 → 22 → N4 (ver figura 12, página 79). Como explicado previamente, nas operações pulmão a rota da batelada é dividida. Neste caso, a rota é dividida duas vezes, obtendo-se três rotas, conforme segue:



Figura 62 – Exemplo de pulmão em duas áreas consecutivas

- N5 → 20 → N12;
- N12 → 19 → N13; e
- N13 → 22 → N4.

Dessa forma, a batelada 87 é bombeada a partir da área N5 para a área N12. Então, a mesma porção de volume, agora renomeada para batelada 258 é bombeada de N12 para N13, mas com vazão superior. Tanques na área intermediária (N12) foram utilizados para o balanço das diferentes vazões de recebimento e bombeio. De maneira similar, a mesma porção de produto (agora, renomeada para batelada 257) é bombeada de N13 para N4 com vazão inferior. Logo, nesse exemplo, temos duas operações de pulmão consecutivas.

É possível visualizar através do gráfico da figura 63, que apresenta o estoque do produto 34 na área N13, o comportamento da curva de estocagem quando ocorre operação pulmão e reversão de fluxo. As duas primeiras elipses no gráfico destacam picos nas curvas de tancagem derivadas da operação pulmão. Em particular, a primeira elipse destaca o exemplo utilizado na figura 62. Na elipse, a inclinação positiva $p1$ indica recebimento do produto 34 (batelada 258) em N13 e a inclinação $p2$ indica o recebimento da batelada 258 simultaneamente com o bombeio da batelada 257 a partir de N13 (note que a inclinação de $p1$ é maior que a inclinação de $p2$). Após o término do recebimento da batelada 258 só há operação de envio da batelada 257, representada pela inclinação negativa $p3$.

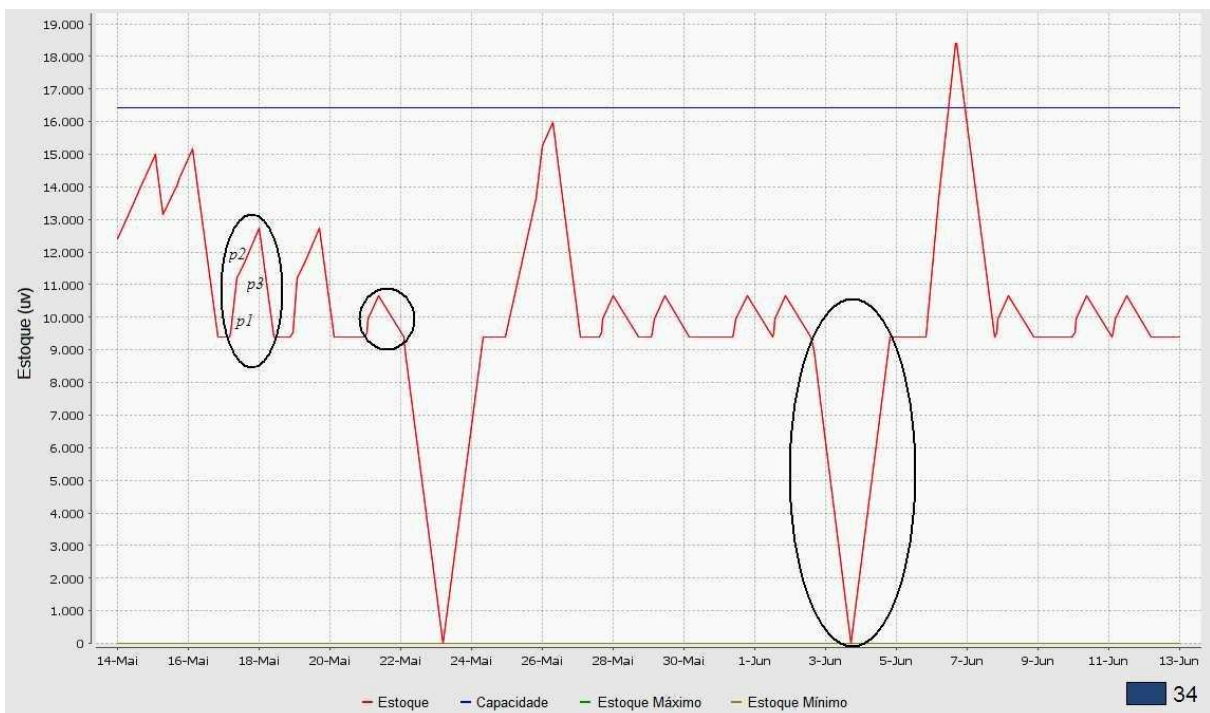


Figura 63 – Gráfico do produto 34 na área N13 (com pulmão e reversão)

A terceira elipse no gráfico destaca o comportamento da tancagem do produto 34 quando este é utilizado em uma operação de reversão. A inclinação negativa indica o envio do produto para o duto, para o deslocamento de outra batelada que esteja lá “armazenada”. A inclinação positiva indica o recebimento do produto, quando o duto já opera no sentido reverso.

9.2.4 Restrições de horossazonalidade

A figura 64 destaca (em vermelho) os instantes onde ocorrem o período de pico de utilização de energia elétrica e onde devem ser aplicadas as restrições de horossazonalidade. Quatro períodos são destacados. Os dias não destacados são sábado e domingo (dias 16 e 17) e, neste caso, não há tarifação por horossazonal. Para cada período destacado, pode-se concluir que:

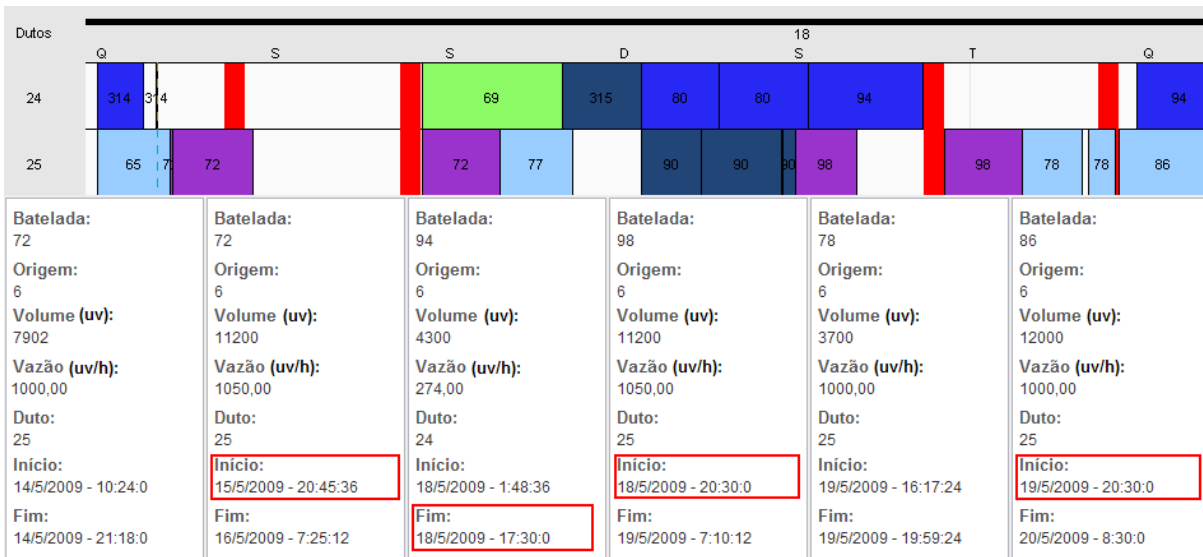


Figura 64 – Exemplo de horossazonalidade

- No primeiro período destacado, é possível perceber que o bombeio da batelada 72 no dia 14 ocorre dentro do período horossazonal. Dessa forma, o bloco temporal é acrescido em 3 horas. Como há bombeio de 7902uv a uma vazão de 1000uv/h, o tempo necessário para bombear a batelada 72 é de 7h54. Pode-se perceber na figura, que o bombeio ocorre das 10h24 até 21h18, somando um total de 10h54. Ou seja, ao tempo de bombeio de 7h54 é acrescido o tempo de parada por horossazonal de 3h, totalizando as 10h54.
- No segundo período destacado, o pedaço da batelada 72 é bombeado no dia 15 após o final do período horossazonal, ou seja, após às 20h30.
- No terceiro período destacado, o bombeio do primeiro pedaço da batelada 94 é finalizado no início do período de tarifação (17h30). Dessa forma, não há penalização. A batelada 98 inicia seu bombeio às 20h30, também fora do período de tarifação.
- Analisando o quarto período destacado, a batelada 78 é bombeada dentro do período horossazonal. Neste caso, pode-se perceber que, pela janela de tempo da batelada em questão (tabela 19, página 130), a janela de bombeio compreende o período de 0 a 93,5

horas. Ou seja, a batelada 78 deveria ser bombeada dentro dos 4 primeiros dias do horizonte para não violar a janela temporal. Como a batelada 78 é bombeada no sexto dia, há violação na janela de tempo. Neste caso, a penalização por horossazonalidade não é aplicada a essa batelada (vide seção 8.5.4, página 159). A batelada 86, porém, respeita o término do período horossazonal para iniciar seu bombeio.

9.2.5 Restrições de troca de turno

Similarmente às restrições horossazonais, as restrições de troca de turno estabelecem que todo início de bombeio e recebimento deve ocorrer fora do intervalo de troca de turno.



Figura 65 – Exemplo de bombeio após a troca de turno

Durante um dia (24h) ocorrem três trocas de turno dos operadores: (i) das 7-8h, (ii) 15-16h e (iii) 23-0h. Dessa forma, quando o início de bombeio em uma origem é restringido, um recebimento influenciado por esse bombeio também é restringido. A figura 65 destaca três atrasos na operação de início de bombeio de bateladas por questões de troca de turno que acontecem durante um mesmo dia. A batelada 58 é bombeada para o duto 04 após as 8 horas, respeitando o primeiro horário de troca de turno do dia 14. De forma similar, o segundo período de troca é respeitado, quando a batelada 79 inicia seu bombeio no duto 14 após as 16 horas. Finalmente, a batelada 81 é bombeada no duto 12 após a hora zero do dia 15.

9.3 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou os resultados finais de planejamento e *scheduling* obtidos pelos modelos propostos na presente tese. Neste capítulo, detalhes dos resultados dos diferentes modelos explicitaram aspectos como influência de bombeio, restrições locais, reversão, pulmão, horossazonalidade e troca de turno. Além disso, foi possível comparar as taxas de utilização dos dutos sugeridas pelo modelo de planejamento com as taxas finais de utilização sugeridas pelo modelo de temporização PLIM.

Os diagramas de Gantt de todos os dutos e gráficos de estocagem para todos os produtos movimentados foram também apresentados e análises puderam ser realizadas. Os resultados obtidos foram validados por especialistas (programadores experientes), que realizam o *scheduling* na rede de dutos em estudo. Os experimentos tiveram foco no cenário C3 porque, conforme figura 19 (página 103), esse cenário movimenta uma quantidade de produtos superior aos demais cenários estudados. Buscou-se verificar se é possível a realização do *scheduling* dentro do horizonte mensal de planejamento, quando grandes volumes precisam ser movimentados, satisfazendo todas as restrições impostas pelos modelos sugeridos.

10 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

10.1 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de estratégias de solução para a realização do *scheduling* de dutos. Foram abordados detalhes do *scheduling* de dutos como, por exemplo, compartilhamento de recursos, gerenciamento de inventário, atendimento à demanda, respeito às condições operacionais, buscando-se obter soluções em um tempo computacional razoável (segundos a poucos minutos). As abordagens utilizadas consideram estratégias de decomposição do problema e propõem vários modelos de programação linear inteira mista (PLIM) para o tratamento de problemas de *scheduling* de larga escala.

Primeiramente, foi proposto um modelo que realiza alocação de produtos a bateladas, sugere volumes a serem movimentados e propõe uma sequência de bombeio para o caso de um duto que interliga uma refinaria a um parque de tancagem (capítulo 3). Comparado a modelos existentes na literatura (RELVAS *et al.*, 2009), pode-se perceber que soluções melhores são obtidas com tempo computacional inferior (vide tabela 6, página 75).

Quando o objeto de estudo se estende a uma rede de dutos (capítulo 4), a complexidade de modelagem e de resolução computacional aumenta significativamente. Os produtos devem ser transportados agora não somente por um duto, mas por rotas que contêm vários dutos. Além disso, os dutos são compartilhados por várias rotas distintas. O *scheduling* deve ser feito de modo que não haja sobreposição no uso de dutos por rotas distintas e paradas de bombeamentos aconteçam frequentemente para viabilizar esse compartilhamento dos dutos. Dessa forma, outros blocos foram incorporados à divisão do problema para a obtenção do *scheduling* final. Além disso, considerando um único duto, não há outra opção senão enviar os produtos disponíveis na refinaria para o parque de tancagem. Para a rede de dutos, há várias refinarias e vários órgãos demandantes. É necessário, portanto, a realização de um planejamento que sugira a quantidade a ser enviada de cada refinaria para cada órgão de destino (capítulo 5).

Após realizado o planejamento e conhecida a quantidade de produto que será enviada por cada rota, o modelo apresentado no capítulo 3 foi estendido para a rede de dutos. O

intuito do modelo proposto no capítulo 6 foi de realizar a alocação de produtos a bateladas, sugerir volumes a serem movimentados e propor uma sequência de bombeio. Contudo, devido à complexidade computacional do modelo, não foi possível obter soluções ótimas em um tempo viável do ponto de vista dos programadores (especialistas) da rede (segundos a poucos minutos). Por essa razão, é utilizada a alocação e sequenciamento heurística e, após obtida a lista de bateladas, a pré-análise também é utilizada para identificar possíveis quebras de bombeio e a conexão entre a batelada que está sendo bombeada com outras que estão nos dutos (capítulo 7).

O *scheduling* final da rede de dutos é obtido através do modelo de temporização (capítulo 8). As restrições do problema não tratadas nos blocos anteriores foram consideradas nesse modelo. Como resultado, obtém-se os tempos de bombeamento e recebimento de cada pedaço de batelada, considerando operações de reversão, operações de pulmão, restrições locais, horossazonalidade, troca de turno de operadores e respeito aos limites de estocagem (vide janelas de tempo sugeridas pela alocação heurística - tabela 19, página 130). Em uma etapa inicial, o modelo de temporização concebido, em geral, apresentava soluções em tempo computacional adequado (vide tabela 24, página 173), mas esse tempo tendia a aumentar se as restrições de horossazonalidade e troca de turno fossem consideradas (ex: tabelas 25 a 27). Assim, a partir das observações computacionais, realizou-se a decomposição do modelo de temporização nos modelos MRL (Modelo com Restrições Locais) e MHT (Modelo com Horossazonalidade e Troca de turno), os quais são executados sequencialmente. Os resultados obtidos indicam que a execução sequencial de MRL+MHT obtém soluções próximas a do modelo de temporização unificado (vide figura 38, página 178), mas em tempo computacional inferiores.

Todos os modelos PLIM apresentados na tese foram implementados utilizando a ferramenta comercial ILOG OPL 6.3 (ILOG, 2009), e o *solver* CPLEX 12 (ILOG, 2009). Com isso, modelos de larga escala foram gerados utilizando conjuntos esparsos. Os modelos utilizados para a obtenção do *scheduling* final foram resolvidos em tempos computacionais não elevados. Um tempo computacional inferior a 7 minutos é necessário para a obter a solução utilizando a estrutura hierárquica contendo o modelo de planejamento PLIM, alocação heurística, pré-análise e modelo de temporização PLIM decomposto. Todos os estudos de caso apresentados nessa tese utilizam cenários da indústria petrolífera, que representam condições operacionais reais do duto (ou rede de dutos) que transportam derivados de petróleo. A dificuldade em obter um *scheduling* das atividades operacionais é um problema diário enfrentado pelos especialistas da área. Os modelos aqui apresentados podem ser utilizados como uma ferramenta de decisão que pode auxiliar a tomada de decisão dos operadores.

Com os modelos aqui apresentados, o programador pode visualizar a solução gerada com detalhes para horizontes de aproximadamente um mês, permitindo um planejamento das

movimentações a curto e médio prazos, antecipando decisões relacionadas à falta de produtos em clientes e excedentes de estoque junto às refinarias.

O capítulo 9, através da estratégia de subdivisão do problema da rede de dutos, detalhou resultados finais obtidos para um cenário, onde as características específicas são destacadas e satisfeitas (vide seção 9.2). Foi possível visualizar que o planejamento e *scheduling* sugeridos pelos modelos apresentados conduzem a boas soluções operacionais, respeitando os níveis de estocagem (vide figuras 46 a 57).

Não foi possível realizar comparações entre o resultado do *scheduling* obtido no capítulo 9 e o *scheduling* real realizado pela companhia. É muito difícil a obtenção de dados que forneçam informações a respeito do *scheduling* real final, devido ao cumprimento de políticas internas da PETROBRAS. Além disso, a solução proposta não contempla degradação de produtos e troca de serviço de tanques (objeto de trabalhos futuros), o que é feito frequentemente pelos programadores da companhia. Certamente, esse seria um ponto onde as soluções teriam uma divergência alta. Outra questão que dificulta a comparação entre as soluções é a data de início dos cenários fornecidos. Como pôde-se perceber nos diagramas de Gantt (figuras 41 a 43), o cenário C3 têm seu início no dia 14/05, já o planejamento do que deve ser movimentado pela companhia é realizado no início de cada mês. Assim, a partir da possibilidade de gerar o planejamento e o *scheduling* para uma duração de 30 dias, observa-se as seguintes características gerais da abordagem de solução obtida:

- Constitui uma ferramenta de auxílio na tomada de decisões táticas/operacionais;
- Possibilita identificar limitações de tancagem;
- A abordagem temporal contínua permite visualizar detalhes do *scheduling* gerado;
- A programação pode ser gerada para priorizar o atendimento ao cliente ou inventários das áreas operacionais;
- Os modelos propostos são capazes de resolver problemas de *scheduling* de larga escala aplicados a sistemas dutoviários obtendo soluções em um tempo computacional não elevado (segundos a poucos minutos);
- A abordagem de solução proposta tem se mostrado funcional para o auxílio na tomada de decisão dos programadores;
- A abordagem proposta permite a avaliação de novos modos de operação para os dutos e, dessa forma, sugere modificações em relação à prática operacional. Dada a solução de

um mês, os resultados podem evidenciar, por exemplo, a inclusão de novos procedimentos para a operação dos dutos. As operações sugeridas podem ser comparadas com a prática real. Em geral, vem sendo observado que os resultados sugeridos tendem a minimizar o número de bateladas em trânsito em relação à prática real de operação. Esse fato implica, por exemplo, a redução de interfaces geradas e manobras operacionais.

Em relação à rede de dutos especificamente, as seguintes características podem ser destacadas em relação à abordagem de solução adotada:

- Permite identificar quais bateladas serão responsáveis pelo deslocamento de outras nos dutos da rede (influências de bombeio);
- Detalhes fornecidos pelo modelo de temporização permitem a identificação de instantes de tempo de bombeamentos e paradas que podem acontecer em toda a rede de dutos. Essa abordagem indica um conjunto de detalhes operacionais que não foram tratados em trabalhos previamente publicados como, por exemplo em Neves-Jr *et al.* (2007a);
- Os resultados permitem a verificação da utilização dos dutos durante o horizonte de *scheduling* (aproximadamente um mês), identificando gargalos do sistema. Adicionalmente, a identificação da evolução do inventário durante o horizonte programado também é possível (ex: figuras 46 a 57);
- O resultado do modelo de planejamento, bem como o conceito de janelas de tempo permitem um diagnóstico que facilita a negociação entre a produção das refinarias e a demanda dos consumidores com o *scheduling* dos dutos.

Além das funcionalidades apresentadas, a prática de operação baseada no resultado dos modelos, em fase de implementação pela indústria petrolífera, pode obter ganhos do ponto de vista gerencial. A otimização do processo de transferência e estocagem resulta numa melhor movimentação dos produtos que, conseqüentemente, reduz as perdas associadas, implicando economia financeira para a empresa.

10.2 TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros, algumas questões adicionais podem ser endereçadas. Dentre elas, destacam-se:

- Em relação à estrutura de otimização proposta no capítulo 3, seria interessante o desenvolvimento de cortes válidos quando uma solução do modelo PLIM de sequenciamento venha a apresentar soluções inviáveis no modelo PLIM detalhado. Cortes podem ser adicionados considerando-se as sequências obtidas (cortes inteiros) ou os volumes de bateladas sugeridos (redução no domínio para a variável contínua). Uma série de testes deve ser desenvolvida para a futura validação do método proposto;
- Em relação às janelas temporais propostas pela alocação heurística (tabela 19, página 130), dentro do modelo PLIM de temporização (capítulo 8), violações desses valores são permitidas, mas minimizadas (vide função objetivo 86 e equações 125 a 132 - capítulo 8). Essas violações podem ser utilizadas como uma realimentação (*feedback*) para a análise do *scheduling* proposto, fornecendo melhorias;
- Minimizar as mudanças entre o *scheduling* prévio e o novo é um provável requisito a ser observado. Essa questão deve ser melhor avaliada, pois observou-se ao longo dos cenários avaliados que o tempo para a obtenção de soluções não é elevado. Assim, se em um dado momento de um cenário em curso houver variações significativas nos dados de entrada, um novo cenário pode ser criado a partir dessa data, e uma nova solução pode ser obtida.
- O modelo de planejamento pode ser melhorado para sugerir quais produtos deverão ser degradados para que toda a demanda seja atendida dentro do período desejado. Em muitos casos não é possível realizar um planejamento de modo que o balanço entre a oferta e demanda seja plenamente satisfeito para todos os produtos. Por vezes, é necessário realizar a degradação de um produto mais nobre para a satisfação de um produto menos nobre;
- O modelo de planejamento pode apresentar também uma solução otimizada em função de custos monetários a serem incorporados na função de avaliação;
- Adicionalmente, pode-se realizar uma validação das vazões médias utilizadas pelo modelo de planejamento em comparação com a vazão final de transporte;
- É interessante que sejam avaliadas e sinalizadas possíveis trocas de serviço quando os níveis de estoque estejam fora dos limites de capacidade máxima. A troca de serviço é comum entre os tanques, ou seja, ora um tanque armazena um produto, ora armazena outro produto do mesmo grupo.
- Além da troca de serviço, a representação da tancagem não agregada, ou seja, uma representação tanque a tanque pode vir a ser estudada, proporcionando mais riqueza de

detalhes na solução final do *scheduling* gerado;

- O modelo de alocação e sequenciamento PLIM apresentado no capítulo 6 pode ser melhor explorado, incluindo mais restrições que restrinjam o espaço de busca na procura de uma solução ótima. Obter soluções viáveis em um tempo computacional não elevado é um tema a ser abordado;
- Mais testes estatísticos podem ser realizados para os modelos propostos, variando o horizonte temporal e parâmetros adotados;
- Finalmente, pode-se estudar a incorporação de restrições de inventário (além das restrições de satisfação das janelas temporais) no modelo de temporização. Observando os níveis reais de inventário, seria possível por exemplo, adiantar o bombeio de uma batelada que venha a fazer pulmão, se já houvesse produto estocado na área intermediária.

Além dos itens anteriormente citados, é importante destacar que melhorias nos blocos apresentados no capítulo 7, ou mesmo nos modelos PLIM aqui apresentados podem certamente contribuir para a melhoria do desempenho da abordagem proposta.

REFERÊNCIAS

- ATAMTURK, A.; SAVELSBERGH, M. W. P. Integer-programming software systems. **Annals of Operations Research**, v. 140, n. 1, p. 67–124, 2005.
- BAZAARA, M. S.; JARVIS, J. J.; SHERALI, H. D. **Linear Programming and Network Flows**. 2nd. ed. New Jersey: John Wiley, 1990.
- BENDERS, J. F. Partitioning procedures for solving mixed integer variables programming problems. **Numerische Mathematik**, v. 4, p. 238–252, 1962.
- BONACIN, M. V.; CZAIKOWSKI, D. I.; POLLI, H. L.; NEVES-JR, F.; LÜDERS, R. Sequenciamento de operações numa rede dutoviária para transporte de derivados leves de petróleo. In: ABPG. **4º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás**. Campinas, Brasil, 2007.
- BOSCHETTO, S. N. **Otimização das Operações de Terminais Petrolíferos Usando Técnicas de Pré-processamento**. 2006. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- BOSCHETTO, S. N.; BRONDANI, W. M.; MAGATÃO, L.; FELIZARI, L. C.; STEBEL, S. L.; NEVES-JR, F.; ARRUDA, L. V. R.; RIBAS, P. C.; BERNARDO, L. F. J. Transporte otimizado de produtos em redes de dutos. **Petro & Química**, v. 318, p. 32–36, 2009a.
- BOSCHETTO, S. N.; FELIZARI, L. C.; YAMAMOTO, L.; MAGATÃO, L.; STEBEL, S. L.; NEVES-JR, F.; ARRUDA, L. V. R.; LÜDERS, R.; RIBAS, P. C.; BERNARDO, L. F. J. An integrated framework for operational scheduling of a real-world pipeline network. In: BRAUNSCHEWIG, B.; JOULIA, X. (Ed.). **Computer Aided Chemical Engineering**. Amsterdam: Elsevier, 2008a. p. 259–264.
- BOSCHETTO, S. N.; FELIZARI, L. C.; YAMAMOTO, L.; MAGATÃO, L.; STEBEL, S. L.; NEVES-JR, F.; LÜDERS, R.; ARRUDA, L. V. R.; RIBAS, P. C.; BERNARDO, L. F. J. Otimização das operações de transporte de derivados de petróleo em redes de dutos. In: IBP. **Rio Oil & Gas Conference and Exposition**. Rio de Janeiro, Brasil, 2008b.
- BOSCHETTO, S. N.; LÜDERS, R.; NEVES-JR, F.; ARRUDA, L. V. R. Um modelo MILP com pré-processamento para a programação de operações em terminais petrolíferos. In: SOBRAPO. **XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Goiânia, Brasil, 2006.
- BOSCHETTO, S. N.; MAGATÃO, L.; BRONDANI, W. M.; NEVES-JR; ARRUDA, L. V. R.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; RELVAS, S. An operational scheduling model to product distribution through a pipeline network. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 12, p. 5661–5682, 2010a.
- BOSCHETTO, S. N.; MAGATÃO, L.; NEVES-JR, F. Modelo PLIM de alocação e sequenciamento de bateladas aplicado em uma rede de dutos. In: SOBRAPO. **XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Bento Gonçalves, Brasil, 2010b.

BOSCHETTO, S. N.; MAGATÃO, L.; NEVES-JR, F.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D. A MILP planning model for a real-world multiproduct pipeline network. In: PISTIKOPOULOS, E.; GEORGIADIS, M.; KOKOSSIS, A. (Ed.). **Computer Aided Chemical Engineering**. [S.l.]: Elsevier, 2011. p. 1–6.

BOSCHETTO, S. N.; NEVES-JR, F. Modelos MILP para a temporização das operações de transferência e estocagem de derivados de petróleo em redes de dutos. In: ABPG. **5º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás - PDPETRO**. Fortaleza, Brasil, 2009b.

BOSCHETTO, S. N.; NEVES-JR, F.; MAGATÃO, L.; CZAIKOWSKI, D. I.; BRONDANI, W. M. Modelo PLIM com pré-análise aplicado na operação de terminais petrolíferos. In: SO-BRAPO. **XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. João Pessoa, Brasil, 2008c.

BOSCHETTO, S. N.; NEVES-JR, F.; MAGATÃO, L.; BRONDANI, W. M.; ARRUDA, L. V. R.; RIBAS, P. C. A combined approach for operational scheduling of a real-world pipeline network. In: ALVES, R. M. B.; NASCIMENTO, C. A. O.; BISCAIA-JR, E. C. (Ed.). **Computer Aided Chemical Engineering**. Amsterdam: Elsevier, 2009c. p. 621–626.

BOSCHETTO, S. N.; POLLI, H. L.; MAGATÃO, L.; NEVES-JR, F.; RIBAS, P. C. Modelo de planejamento para uma rede de dutos real utilizando programação linear inteira mista. In: IBP. **Rio Oil & Gas Conference and Exposition**. Rio de Janeiro, Brasil, 2010c.

BOSCHETTO, S. N.; RELVAS, S.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; NEVES-JR, F. Heuristic batch sequencing for multiproduct pipeline scheduling. In: APDIO. **IO2009**. Lisboa, Portugal, 2009d.

BOSCHETTO, S. N.; RELVAS, S.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; NEVES-JR, F. A decomposition approach for the operational scheduling of a multiproduct pipeline. In: COLEMAN, D. (Ed.). **Computer Aided Chemical Engineering**. Amsterdam: Elsevier, 2010d. p. 1207–1212.

BUSINESS-DICTIONARY. **Planning definition**. 2010. Disponível em: <<http://www.businessdictionary.com/definition/planning.html>>. Acesso em: 28 de janeiro de 2010.

CAFARO, D.; CERDÁ, J. Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete MILP formulation. **Computers and Chemical Engineering**, v. 28, p. 2053–2068, 2004.

CAFARO, D.; CERDÁ, J. Dynamic scheduling of multiproduct pipelines with multiple delivery due dates. **Computers and Chemical Engineering**, v. 32, p. 728–753, 2008a.

CAFARO, D. C.; CERDÁ, J. Efficient tool for the scheduling of multiproduct pipelines and terminal operations. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 47, n. 24, p. 9941–9956, 2008b.

CAFARO, D. C.; CERDÁ, J. Optimal scheduling of refined products pipelines with multiple sources. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 48, n. 14, p. 6675–6689, 2009.

CAMPONOGARA, E. **A-Teams para um Problema de Transporte de Derivados de Petróleo**. 1995. 185 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

CLC. **Projecto de Vanguarda**. 2010. Disponível em: <<http://www.clc.pt/index.php?option=content&task=view&id=4&Itemid=27>>. Acesso em: 10 de setembro de 2010.

CZAIKOWSKI, D. I.; BRONDANI, W. M.; ARANTES, L. G.; BOSCHETTO, S. N.; LÜDERS, R.; MAGATÃO, L.; STEBEL, S. L.; RIBAS, P. C. Uma pré-análise do problema de otimização da programação das operações de uma malha dutoviária. In: IBP. **Rio Oil & Gas Conference and Exposition**. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

DANTZIG, G. B. **Linear programming and extensions**. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1963.

FAGUNDEZ, F. D.; XAVIER, A. E.; FACÓ, J. L. D. Continuous nonlinear programming techniques to solve scheduling problems. In: EUROPT. **20th EURO Mini Conference**. Neringa, Lithuania, 2008.

FELIZARI, L. C. **Programação das operações de transporte de derivados de petróleo em redes de dutos**. 2009. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

FELIZARI, L. C.; ARRUDA, L. V. R.; LÜDERS, R.; NEVES-JR, F. Programação das atividades de transporte de derivados de petróleo em complexos dutoviários. In: ABPG. **4º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás**. Campinas, Brasil, 2007.

GOMORY, R. E. Outline of an algorithm for integer solutions to linear programs. **Bulletin of the American Mathematical Society**, v. 64, p. 275–278, 1958.

GROSSMANN, I. Enterprise-wide optimization: A new frontier in process systems engineering. **Aiche Journal**, v. 51, n. 7, p. 1846–1857, 2005.

GROSSMANN, I. E. Challenges in the new millennium: product discovery and design, enterprise and supply chain optimization, global life cycle assessment. **Computers & Chemical Engineering**, v. 29, n. 1, p. 29–39, 2004.

GROSSMANN, I. E.; BIEGLER, L. T. Part ii. Future perspective on optimization. **Computers & Chemical Engineering**, v. 28, n. 8, p. 1193–1218, 2004.

HERRÁN, A.; de la Cruz, J. M.; de Andrés, B. A mathematical model for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system. **Computers and Chemical Engineering**, v. 34, p. 401–413, 2010.

ILOG. **ILOG OPL Development Studio 5.5: Language Reference Manual**. France, 2007.

ILOG. **IBM ILOG OPL 6.3: Language User's Manual**. USA, 2009.

JOLY, M. **Técnicas de otimização mista-inteira para o scheduling e gerenciamento da produção em refinarias de petróleo**. 1999. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

LAND, A. H.; DOIG, A. G. An automatic method for solving discrete programming problems. **Econometrica**, v. 28, p. 497–520, 1960.

LANKFORD, R. Production scheduling. In: ZANDIN, K. B. (Ed.). **Maynard's Industrial Engineering Handbook (5th Edition)**. New York: McGraw-Hill, 2001.

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

LINARES, P.; RAMOS, A.; SÁNCHEZ, P.; SARABIA, A.; VITORIANO, B. **Modelos Matemáticos de Optimización**. Madrid, outubro 2001.

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

LUENBERGER, D. G. **Linear and Nonlinear Programming**. 2nd. ed. Massachusetts, USA: Pearson Education, 2003.

MAGALHÃES, M. V. O.; SHAH, N. Crude oil scheduling. In: FOCAPO. **Foundations of Computer-Aided Process Operations**. Coral Springs, Florida, 2003.

MAGATÃO, L. **Programação matemática aplicada à otimização das operações de um polí-duto**. 2001. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

MAGATÃO, L. **Mixed integer linear programming and constraint logic programming: Towards a unified modeling framework**. 2005. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MAGATÃO, L.; ARRUDA, L.; NEVES-JR, F. A combined CLP-MILP approach for scheduling commodities in a pipeline. **Journal of Scheduling**, Springer Netherlands, p. 1–31, 2010. ISSN 1094-6136. 10.1007/s10951-010-0186-9. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10951-010-0186-9>>.

MAGATÃO, L.; ARRUDA, L. V. R.; NEVES-JR., F. A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline. **Computers & Chemical Engineering**, v. 28, p. 171–185, 2004.

MÁS, R. **Otimização da Programação de Suprimento de Petróleo**. 2001. 261 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MENDEZ, C. A.; CERDÁ, J.; GROSSMANN, I. E.; HARJUNKOSKI, I.; FAHL, M. State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes. **Computers & Chemical Engineering**, v. 30, n. 6-7, p. 913–946, 2006.

MÉSZÁROS, C.; SUHL, U. Advanced preprocessing techniques for linear and quadratic programming. **OR Spectrum**, v. 25, p. 275–595, 2003.

MILIDIÚ, R. L.; PESSOA, A. A.; BRACONI, V.; LABER, E. S.; REY, P. A. Um algoritmo GRASP para o problema de transporte de derivados de petróleo em oleodutos. In: SOBRAPO. **XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Campos do Jordão, Brasil, 2001.

MIRHASSANI, S. A.; GHORBANALIZADEHA, M. The multi-product pipeline scheduling system. **Computers & Mathematics with Applications**, v. 56, n. 4, p. 891–897, 2008.

MORO, L. F. L. **Técnicas de Otimização Mista Inteira para o Planejamento e Programação de Produção em Refinarias de Petróleo**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Química) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MORO, L. F. L.; PINTO, J. M. Mixed-integer programming approach for short-term crude oil scheduling. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 43, p. 85–94, 2004.

MORO, L. F. L.; ZANIN, A. C.; PINTO, J. M. A planning model for refinery diesel production. **Computers & Chemical Engineering**, v. 22, p. 1039–1042, 1998.

MURTY, K. G. **Linear and Combinatorial Programming**. Malabar, Florida: Robert E. Krieger Publishing Company, 1985.

NEIRO, S. M.; PINTO, J. M. A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains. **Computers & Chemical Engineering**, v. 28, p. 871–896, 2004.

NEMHAUSER, G. L.; WOLSEY, L. A. **Integer and Combinatorial Optimization**. New York, USA: John Wiley & Sons, 1988.

NEVES-JR, F.; ARRUDA, L. V. R.; MAGATÃO, L.; STEBEL, S. L.; BOSCHETTO, S. N.; FELIZARI, L. C.; CZAİKOWSKI, D. I.; ROCHA, R.; RIBAS, P. C. An efficient approach to the operational scheduling of a real-world pipeline network. In: PLESU, V.; AGACHI, P. (Ed.). **Computer Aided Chemical Engineering**. Amsterdam: Elsevier, 2007a. p. 697–702.

NEVES-JR, F.; ARRUDA, L. V. R.; MAGATÃO, L.; STEBEL, S. L.; BOSCHETTO, S. N.; FELIZARI, L. C.; CZAİKOWSKI, D. I.; AIRES, M. C.; RIBAS, P. C.; BERNARDO, L. F. J. Programação das operações de transporte de derivados de petróleo em redes de dutos. In: IBP. **17th Rio Pipeline Conference and Exposition**. Rio de Janeiro, Brasil, 2007b.

NEVES-JR, F.; ARRUDA, L. V. R.; YAMAMOTO, L.; POLLI, H. L.; AIRES, M. C.; RIBAS, P. C.; BERNARDO, L. F. J. Sequenciamento de bateladas em *scheduling* de uma malha real de dutos. In: IBP. **17th Rio Pipeline Conference and Exposition**. Rio de Janeiro, Brasil, 2007c.

PETROBRAS. **Resultado de Julgamento**. 2009. Diário Oficial da União. Disponível em: <<http://www.jusbrasil.com.br/diarios/574417/dou-secao-3-31-03-2009-pg-99>>. Acesso em: 26 de agosto de 2010.

PINTO, J. M.; JOLY, M.; MORO, L. F. L. Planning and scheduling models for refinery operations. **Computers and Chemical Engineering**, v. 24, p. 2259–2276, 2000.

PUCCINI, A.; PIZZOLATO, N. **Programação Linear**. 2^a. ed. Rio de Janeiro: Editora LCT, 1990.

REJOWSKI, R. **Programação da Distribuição Dutoviária de Derivados de Petróleo**. 2001. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

REJOWSKI, R.; PINTO, J. M. Scheduling of a multiproduct pipeline system. **Computers and Chemical Engineering**, v. 27, p. 1229–1246, 2003.

REJOWSKI, R.; PINTO, J. M. Efficient MILP formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling. **Computers and Chemical Engineering**, v. 28, p. 1511–1528, 2004.

REJOWSKI, R.; PINTO, J. M. A novel continuous time representation for the scheduling of pipeline systems with pumping yield rate constraints. **Computers and Chemical Engineering**, v. 32, p. 1042–1066, 2008.

REKLAITIS, G. V. Overview of scheduling and planning of batch process operations. In: REKLAITIS, G.; SUNOL, A.; RIPPIN, D.; HORTACSU, O. (Ed.). **Batch Processing Systems Engineering**. Antalya, Turkey: Springer Publications, 1992. p. 660–705.

RELVAS, S. **Escalonamento e Optimização de Sistemas de Distribuição de Produtos Petrolíferos**. 2008. 222 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Gestão) — Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2008.

RELVAS, S.; BARBOSA-PÓVOA, A.; MATOS, H. A. Heuristic batch sequencing on a multi-product oil distribution system. **Computers & Chemical Engineering**, v. 33, n. 3, p. 712–730, 2009.

RELVAS, S.; BOSCHETTO, S. N.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; NEVES-JR, F. MILP models for multiproduct pipeline scheduling with inventory management: a comparative approach. In: ENGOPT. **2nd International Conference on Engineering Optimization**. Lisboa, Portugal, 2010.

RELVAS, S.; MATOS, H. A.; BARBOSA-PÓVOA, A.; FIALHO, J. Reactive scheduling framework for a multiproduct pipeline with inventory management. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 46, n. 17, p. 5659–5672, 2007.

RELVAS, S.; MATOS, H. A.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; FIALHO, J.; PINHEIRO, A. S. Pipeline scheduling and inventory management of a multiproduct distribution oil system. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 45, p. 7841–7855, 2006.

SASIKUMAR, M.; PRAKASH, P. R.; PATIL, S. M.; RAMANI, S. Pipes: a heuristic search model for pipeline schedule generation. **Knowledge-Based Systems**, v. 10, p. 169–175, 1997.

SHAH, N. Mathematical programming techniques for crude oil scheduling. **Computers and Chemical Engineering**, v. 20, p. 1227–1232, 1996.

SIMCHI-LEVI, D.; KAMINSKY, P.; SIMCHI-LEVI, E. **Designing and Managing the Supply Chain 3e with Student CD**. 3^a. ed. USA: McGraw-Hill/Irwin, 2007.

STEBEL, S. L. **Técnicas de otimização aplicadas em problemas de *scheduling* dos recursos de estocagem**. 2006. 100 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

TRANSPETRO. **Mapa de Dutos**. 2008. Disponível em: <<http://200.184.189.110/portugues/centralInformacoes/mapa.htm>>. Acesso em: 26 de agosto de 2010.

VEIGA, S. L. **Modelo Hierarquizado para o Scheduling de Suprimento de Petróleo**. 2006. p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

WILLIAMS, H. P. **Model Building in Mathematical Programming**. Chichester, England: John Wiley & Sons, 1999.

YAMAMOTO, L.; ARRUDA, L. V. R.; LIBERT, N. Estudo comparativo de várias metaheurísticas aplicadas ao seqüenciamento de bateladas em redes dutoviárias. In: SOBRAPO. **XXXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Fortaleza, Brasil, 2007a.

YAMAMOTO, L.; ARRUDA, L. V. R.; LIBERT, N. Seqüenciamento de bateladas em *Scheduling* usando otimização multiobjetivo. In: ABPG. **4º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás**. Campinas, Brasil, 2007b.

APÊNDICE A – DEFINIÇÕES - CAPÍTULO 3

Nos apêndices que seguem serão apresentadas as nomenclaturas utilizadas em cada capítulo da tese, bem como serão definidos os conjuntos, índices, parâmetros e variáveis. Cada apêndice está relacionado a um determinado capítulo e, os itens definidos em um apêndice poderão também ser utilizados nos modelos dos capítulos (apêndices) subsequentes.

A.1 NOMENCLATURA - SEÇÃO 3.5

Índices/Conjuntos

$b \in B$	conjunto de bateladas, $B = \{1, \dots, nb\}$;
$p \in P$	conjunto de produtos, $P = \{1, 2, \dots, np\}$;
$lt \in LT$	conjunto com possíveis volumes de bateladas, $LT = \{1, 2, \dots, nlt\}$;
$h \in H$	conjunto com os dias do horizonte de planejamento, $H = \{1, 2, \dots, h^{max}\}$;
S	conjunto esparsos contendo tuplas do tipo $(b, p, lt, h)^1$;

Parâmetros

$pipe$	volume do poliduto (uv);
$lots_{p,lt}$	matriz com os possíveis volumes de batelada lt para cada produto p (uv);
h^{max}	horizonte de tempo (dias);
eps	número positivo suficientemente pequeno;
ID_p^0	estoque inicial do produto p (uv);
ID_p^{min}	estoque mínimo para o produto p (uv);
ID_p^{max}	estoque máximo para o produto p (uv);
$Dem_{p,h}$	demanda do produto p no dia h (uv);
vb^{min}	vazão mínima (uv/dia);
vb^{max}	vazão máxima (uv/dia);
$seq_{p,p'}$	se $seq_{p,p'} = 1$, é permitida a interface entre 2 produtos p e p' no poliduto;
stl_p	tempo de certificação do produto p antes de ser entregue aos clientes;

¹definido na seção A.3

ρ	número máximo de bateladas enviadas durante um dia;
nb^{min}	número mínimo de bateladas que podem ser enviadas durante o horizonte temporal;
nb^{max}	número máximo de bateladas que podem ser enviadas durante o horizonte temporal;
nb	número de bateladas que podem ser enviadas durante o horizonte temporal;
t_h^{min}	menor índice da batelada que pode ser recebida no dia h ;
t_h^{max}	maior índice da batelada que pode ser recebida no dia h ;

Variáveis Contínuas

dif_p	diferença entre a quantidade e a demanda total enviada do produto p (uv) — dif_p pode assumir apenas valores não negativos;
$ID_{p,h}^{clientes}$	estoque disponível para os clientes do produto p no dia h (uv);
$ID_{p,h}^{total}$	estoque do produto p no dia h , considerando volumes em certificação (uv);
T_b^{rec}	tempo de recebimento da batelada b (dias);

Variáveis Inteiras

$nbats_{p,lt}$	número de bateladas enviadas com volume lt do produto p ;
----------------	---------------------------------------------------------------

Variáveis Binárias

$lss_{b,p,lt,h}$	1, se a batelada b contém o produto p com volume lt e é recebida entre os dias $h - 1$ e h ; 0, caso contrário.
------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

A.2 NOMENCLATURA - SEÇÃO 3.6

Conjunto

S'	conjunto esparsos contendo tuplas do tipo $(b, p, h)^2$;
------	-----------------------------------------------------------

Parâmetros

$lots_p^{min}$	volume mínimo de batelada para cada produto p (uv);
$lots_p^{max}$	volume máximo de batelada para cada produto p (uv);

²definido na seção A.3.2

Variáveis Contínuas

$W_{b,p,h}$ volume da batelada b que contém o produto p recebido entre os dias $h - 1$ e h ;

Variáveis Binárias

$ls_{b,p,h}$ 1, se a batelada b contém o produto p e é recebida entre os dias $h - 1$ e h ;
0, caso contrário.

A.3 DEFINIÇÃO DE CONJUNTOS DE ÍNDICES E PARÂMETROS

O parâmetro ρ é utilizado para limitar o número de bateladas enviadas durante um dia. Esse valor pode variar de acordo com o cenário escolhido. Ele é obtido a partir da consideração que o menor volume de batelada de cada produto é enviado com a máxima vazão permitida. Contudo, em termos práticos, em um dia são enviados algumas sequências de produtos (ciclos de produtos), e não somente o menor volume de batelada é considerado no cálculo, mas o valor das menores bateladas de produtos contidos no ciclo.

Os conjuntos são formados para auxiliar e otimizar a geração do modelo. Para melhor entendimento dos elementos presentes em cada conjunto, a seguir é apresentado um pré-processamento realizado para auxiliar a geração do modelo PLIM. Este pré-processamento, de forma detalhada, calcula os elementos que compõem cada conjunto e parâmetros adicionais usados no modelo de otimização.

A.3.1 Definição do conjunto S

A variável binária $lss_{b,p,lt,h}$ contém quatro índices. De acordo com o tamanho do cenário, a dimensão dessa variável pode trazer complexidade adicional para o modelo. Por essa razão, um conjunto esparsos S , contendo combinações específicas da tupla (b, p, lt, h) , é criado para o espaço de índices dessa variável. Considere um problema com 59 bateladas, 6 produtos, 3 tamanhos de lotes e horizonte de 1 mês (31 dias). Se todas as combinações de índices são geradas teremos $59 \times 6 \times 3 \times 31 = 32992$ variáveis. Aplicando-se um procedimento de geração esparsa que será detalhado na sequência tem-se, ao invés, 6981 variáveis (exemplificado na tabela 3, meses 08/06 e 10/06: 6999 menos 18 variáveis inteiras que representam a variável $nbats_{p,lt}$). O corte no número de variáveis binárias é realizado da seguinte maneira:

1. *Criação do conjunto S1*: Esse conjunto contém somente o primeiro elemento do conjunto

S ($b = 1$). A primeira batelada a ser bombeada deve ser compatível com o produto p' inicialmente dentro do duto ($seq_{p,p'} = 1$). Também, o volume do lote deve ser diferente de zero ($lots_{p,lt} \neq 0$).

$$S1 = \{(1, p, lt, h) | p \in P, lt \in LT, h \in 1..2 : seq_{p,p'} = 1 \wedge lots_{p,lt} \neq 0\}$$

2. *Criação do conjunto S2*: Esse conjunto contém os demais índices de bateladas a serem sequenciadas ($2 \leq b \leq nb$, onde $nb = \frac{2}{3}nb^{max}$). Cafaro e Cerdá (2008b) propuseram uma equação para obter a cardinalidade do conjunto de bateladas. Os autores consideram a média dos tamanhos de lotes no cálculo. Se o resultado não retorna bateladas fictícias na solução, o número de bateladas é incrementado em 1 até obter a solução com bateladas fictícias. Esse procedimento é feito porque não é desejável utilizar nb^{max} como limitante superior, considerando o elevado número de variáveis binárias e bateladas fictícias que serão geradas. Após vários testes, nos casos abordados, concluiu-se que $\frac{2}{3}$ de nb^{max} é uma boa aproximação, porque poucas bateladas fictícias são geradas. Além disso, em uma aplicação industrial não é desejável realizar vários testes para encontrar o valor ideal, pois isso pode consumir muito tempo. É também considerado que $lots_{p,lt} \neq 0$. Os números mínimo e máximo de bateladas (nb^{min} e nb^{max}) são obtidos através das equações 146 e 147:

$$nb^{min} = \left[\sum_{p \in P} \frac{\sum_{h \in H} Dem_{p,h}}{\max_{lt} (lots_{p,lt})} \right] \quad (146)$$

$$nb^{max} = \left[\sum_{p \in P} \frac{\sum_{h \in H} Dem_{p,h}}{\min_{lt | lots_{p,lt} \neq 0} (lots_{p,lt})} \right] \quad (147)$$

Essas equações consideram que o objetivo é repor no centro de distribuição o volume demandado pelo mercado local. Agora que determinou-se o número mínimo e máximo de bateladas (nb^{min} e nb^{max}), também é possível determinar os limites diários de recebimento das bateladas. Se todas as bateladas são enviadas com o tamanho de lote máximo, a batelada $b = nb^{min}$ será provavelmente recebida no final do mês. A equação 148 realiza o cálculo do recebimento da batelada no dia h , de acordo com esse critério. Caso contrário, a equação 149 determina quais bateladas serão recebidas no dia h se $b = nb^{max}$. Finalmente, a batelada b irá variar entre esses limites t_h^{min} e t_h^{max} ($t_h^{min} \leq b \leq t_h^{min}$). Esse

parâmetro restringe o conjunto $S2$, gerando somente os índices de bateladas que, possivelmente, serão recebidos no dia h .

$$t_h^{min} = \left\lfloor \frac{h \cdot nb^{min}}{h^{max}} \right\rfloor \quad \forall h \in H \quad (148)$$

$$t_h^{max} = \left\lceil \frac{h \cdot nb^{max}}{h^{max}} \right\rceil \quad \forall h \in H \quad (149)$$

$$S2 = \{(b, p, lt, h) | b \in 2..nb, p \in P, lt \in LT, h \in H : lots_{p,lt} \neq 0 \wedge t_h^{min} \leq b \leq t_h^{max}\}$$

3. *União dos conjuntos*: O conjunto de combinações possíveis para os quatro índices usados pela variável binária $lss_{b,p,lt,h}$ é a união dos conjuntos $S1$ e $S2$.

$$S = S1 \cup S2$$

A.3.2 Definição do conjunto S'

O conjunto de índices da variável binária ls é obtido de maneira similar ao conjunto de índices da variável lss (seção A.3). Contudo, o novo conjunto S' contém agora somente a combinação de três índices (b, p, h) . Se todos os índices forem gerados, (considerando o mesmo exemplo da seção A.3 com 59 bateladas, 6 produtos e 31 dias) teríamos 10974 variáveis binárias ao invés de 2679 (tabela 4). O corte no número de variáveis binárias é realizado como na definição de lss , porém, as equações 146 e 147 são substituídas pelas equações 150 e 151, considerando o modelo com os tamanhos de lotes variáveis:

$$nb^{min} = \left\lceil \sum_{p \in P} \frac{\sum_{h \in H} Dem_{p,h}}{lots_p^{max}} \right\rceil \quad (150)$$

$$nb^{max} = \left\lfloor \sum_{p \in P} \frac{\sum_{h \in H} Dem_{p,h}}{lots_p^{min}} \right\rfloor \quad (151)$$

APÊNDICE B – DEFINIÇÕES - CAPÍTULO 5

B.1 NOMENCLATURA

Índices/Conjuntos¹

$r \in RFX$	conjunto das rotas de fluxo ² ;
$d \in D$	conjunto de trechos de dutos, $D = \{1, 2, \dots, nd\}$;
$n \in N$	conjunto de áreas, $N = \{1, 2, \dots, nn\}$;
PLM	conjunto esparsos contendo tuplas do tipo (p, n) , com produto e órgão que realiza operação pulmão;
\overline{PLM}	complemento de PLM , contém tuplas com produto e órgão onde não há operação pulmão;
$RDut$	conjunto esparsos contendo tuplas do tipo (r, d) com todos os dutos d contidos na rota r ;
RD	conjunto esparsos contendo tuplas do tipo (r, r', d) com as rotas r e r' que usam o duto d em sentidos distintos;

Parâmetros

$disp_{n,p}$	quantidade de produto p disponível na área n (uv);
$flt_{n,p}$	quantidade de produto p requerida na área n (uv);
γ_d	porcentagem máxima de utilização do duto d durante o horizonte de planejamento H ;
β_d	porcentagem a ser subtraída da utilização máxima se o duto d operar nos 2 sentidos (direto e reverso);
H	horizonte de planejamento (h);
M	número positivo suficientemente grande;
vr_r	soma dos volumes dos dutos da rota r (uv);
$vb_{r,p}^{med}$	vazão média da rota r para o produto p (uv/h);
$ID_{n,p}^0$	estoque inicial para o produto p na área n (uv);

¹ Alguns dos conjuntos aqui apresentados, serão definidos na seção seguinte

² O conceito de rota de fluxo está definido na página 81

$ID_{n,p}^{min}$	estoque mínimo para o produto p na área n (uv);
$ID_{n,p}^{max}$	estoque máximo para o produto p na área n (uv);
$ID_{n,p}^{meta}$	estoque meta para o produto p na área n (uv);
$CP_{n,p}$	capacidade máxima de estocagem agregada para o produto p na área n (uv);
$Prod_{n,p}$	produção do produto p na área n durante o horizonte de planejamento (uv);
$Dem_{p,h}$	demanda do produto p na área n durante o horizonte de planejamento (uv);
$Tmin$	quantidade mínima permitida para a realização de estocagem intermediária (uv);

Variáveis contínuas

$Q_{n,n',p,r}$	quantidade de produto p a ser enviado da área de origem n para a área de destino n' pela rota r (uv);
$vari_d$	taxa de utilização adicional à γ do duto d ;
$VCP_{n,p}$	quantidade violada da capacidade para o produto p na área n (uv);
$VID_{n,p}^{min}$	quantidade violada do estoque mínimo para o produto p na área n (uv);
$VID_{n,p}^{meta}$	quantidade violada do estoque meta para o produto p na área n (uv);
$VID_{n,p}^{max}$	quantidade violada do estoque máximo para o produto p na área n (uv);

Variáveis binárias

$bin_{n,n',p,r}$	1, se houver envio do produto p da área de origem n para a área de destino n' pela rota r ;
$rev_{r,r',d}$	1, se as rotas r e r' usam o duto d em ambos os sentidos;
$tanq_{r,r',n,p}$	1, se o tanque do produto p no nó intermediário n entre as rotas r e r' é utilizado.

B.2 DEFINIÇÃO DE CONJUNTOS DE ÍNDICES E PARÂMETROS

Alguns parâmetros e conjuntos utilizados no modelo PLIM de Planejamento são calculados dentro da ferramenta comercial ILOG OPL 6.3 (ILOG, 2009). Esta ferramenta utiliza o CPLEX12 para resolução do modelo de PLIM de larga escala, que é criado dinamicamente a partir do conjunto de dados de entrada. Conjuntos esparsos são utilizados para a geração das restrições matemáticas, permitindo a manipulação de apenas índices válidos.

Por exemplo, o conjunto RD é criado para identificar quando duas rotas r e r' contém algum duto d em comum. Dessa forma, variáveis que possuam esses índices ou restrições que os utilize como condicional, apenas contém os índices da tupla (r, r', d) pertencente ao

conjunto esparsa RD , diminuindo, assim, o número de variáveis/restrições geradas. Porém, o cálculo desses conjuntos e parâmetros é feito em uma etapa anterior ao modelo principal: função objetivo e restrições. Facilita-se, assim, a criação de restrições do modelo PLIM.

Para a obtenção do conjunto RD , é necessário verificar o par de dados $(r, d) \in RDut$ que indica todos os dutos que estão contidos em uma determinada rota:

$$RD = \{(r, r', d) | (r, d) \in RDut, (r', d) \in RDut\}$$

O complemento do conjunto \overline{PLM} , pode ser obtido da seguinte maneira:

$$\overline{PLM} = \{(p, n) | p \in P, n \in N, (p, n) \notin PLM\}$$

Os índices das variáveis bin e Q também são gerados de forma esparsa, pois contém somente as tuplas (n, n', p, r) , onde:

- n é um órgão de origem da rota r ,
- n' é um órgão de destino da rota r ,
- p é o índice de todos os produtos que poderão ser enviados de n para n' pela rota r .

Por fim, os parâmetros $disp_{n,p}$ e $flt_{n,p}$ são calculados através das equações 152 e 153, respectivamente.

$$disp_{n,p} = ID_{n,p}^0 + Prod_{n,p} - Dem_{n,p} \quad \forall n \in N, p \in P, ID_{n,p}^0 + Prod_{n,p} \geq Dem_{n,p} \quad (152)$$

$$flt_{n,p} = Dem_{n,p} - ID_{n,p}^0 - Prod_{n,p} \quad \forall n \in N, p \in P, ID_{n,p}^0 + Prod_{n,p} < Dem_{n,p} \quad (153)$$

APÊNDICE C – DEFINIÇÕES - CAPÍTULO 6

C.1 NOMENCLATURA

Parâmetros

- $Q_{n,n',p,r}$ quantidade de produto¹ p a ser enviado da área de origem n para a área de destino n' pela rota r (uv);
- α constante utilizada na função objetivo como fator de ponderação das violações na satisfação dos limites de estoque;
- μ constante utilizada na função objetivo como fator de ponderação do estoque mínimo em áreas de destino;
- $vb_{d,p,n}^{min}$ vazão mínima para o produto p suportada pelo duto d com origem no nó n (uv/h);
- $vb_{d,p,n}^{max}$ vazão máxima para o produto p suportada pelo duto d com origem no nó n (uv/h);

Variáveis contínuas

- $W_{b,p,n,n',r}$ volume da batelada b que contém o produto p a ser enviado da área de origem n para a área de destino n' pela rota r (uv);
- $dif_{p,n,n',r}^-$ diferença de quantidade negativa entre $Q_{n,n',p,r}$ e $W_{b,p,h}$ a ser enviada do produto p a partir da área de origem n para a área de destino n' pela rota r (uv)
— $dif_{p,n,n',r}^-$ pode assumir apenas valores não negativos;
- $dif_{p,n,n',r}^+$ diferença de quantidade positiva entre $Q_{n,n',p,r}$ e $W_{b,p,h}$ a ser enviada do produto p a partir da área de origem n para a área de destino n' pela rota r (uv)
— $dif_{p,n,n',r}^+$ pode assumir apenas valores não negativos;
- $ID_{b,p,n}^{orig}$ estoque do produto p no órgão de origem n , após o envio da batelada b (uv);
- $ID_{b,p,n}^{dest}$ estoque do produto p no órgão de destino n , após o recebimento da batelada b (uv);

¹determinado pelo modelo PLIM de planejamento - capítulo 5

$TI_{b,d,r}^{bomb}$	tempo de início de bombeio da batelada b para o duto d utilizando a rota r (h);
$TI_{b,d,r}^{rec}$	tempo de início de recebimento da batelada b para o duto d utilizando a rota r (h);
$TF_{b,d,r}^{bomb}$	tempo de final de bombeio da batelada b para o duto d utilizando a rota r (h);
$TF_{b,d,r}^{rec}$	tempo de final de recebimento da batelada b para o duto d utilizando a rota r (h);
$t db_{b,d}$	variável temporal auxiliar para o cálculo do tempo de bombeio da batelada b para o duto d (h);
$t dr_{b,d}$	variável temporal auxiliar para o cálculo do tempo de recebimento da batelada b para o duto d (h);
$ao_{b,p,n}$	violação no estoque inferior do produto p no órgão de origem n , após o envio da batelada b (uv);
$do_{b,p,n}$	violação no estoque superior do produto p no órgão de origem n , após o envio da batelada b (uv);
$ad_{b,p,n}$	violação no estoque inferior do produto p no órgão de destino n , após o recebimento da batelada b (uv);
$dd_{b,p,n}$	violação no estoque superior do produto p no órgão de destino n , após o recebimento da batelada b (uv);
$mind_{n,p}$	porcentagem do menor estoque do produto p no órgão de destino n durante todo o horizonte;

Variáveis Binárias

$ls_{b,p,n',n,r}$	1, se a batelada b contém o produto p a ser enviado da área de origem n para a área de destino n' pela rota r ; 0, caso contrário.
-------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

C.2 DEFINIÇÃO DE CONJUNTOS DE ÍNDICES

Os parâmetros e conjuntos utilizados no modelo PLIM de alocação e sequenciamento são calculados dentro da ferramenta comercial ILOG OPL 6.3 (ILOG, 2009). Esta ferramenta utiliza o CPLEX 12 para resolução do modelo de PLIM de larga escala, que é criado dinamicamente a partir do conjunto de dados de entrada. Conjuntos esparsos são utilizados para a geração das restrições matemáticas, permitindo a manipulação de apenas índices válidos.

Os índices das variáveis $dif_{p,n,n',r}^-$ e $dif_{p,n,n',r}^+$ são gerados de forma esparsa e contém somente as tuplas (n, n', p, r) , onde $Q_{n,n',p,r} > 0$.

Os índices das variáveis $W_{b,p,n,n',r}$ e $ls_{b,p,n',n,r}$ também são derivados de $Q_{n,n',p,r}$, onde o índice b é adicionado à tupla (n,n',p,r) quando $Q_{n,n',p,r} > 0$.

Finalmente, a tupla (b,d,r) é derivada da tupla (b,p,n,n',r) onde somente as rotas utilizadas no modelo de planejamento fazem parte do conjunto. Além disso, o índice d corresponde ao primeiro duto da rota r quando usado pelas variáveis que calculam o bombeio das bateladas, e d corresponde ao último duto da rota r quando usado pelas variáveis que calculam o recebimento das bateladas.

APÊNDICE D – DEFINIÇÕES - CAPÍTULO 7

D.1 NOMENCLATURA

Índices

\bar{n} área imediatamente anterior a um duto d em uma rota de fluxo ($\bar{n} \in N$);

Parâmetros gerais

nb^{ini} número de bateladas de inicialização¹;

vol_d volume do duto d (uv);

Parâmetros determinados pela Alocação de recursos

Cd_b coeficiente que determina a ordem da batelada b na lista de bateladas;

$prod_b$ produto associado à batelada b ($prod_b \in P$);

ted_b tempo de envio disponível da batelada b na área de origem em relação à capacidade (h);

tec_b tempo de envio crítico da batelada b na área de origem em relação à capacidade (h);

trd_b tempo de recebimento disponível da batelada b na área de destino em relação à capacidade (h);

trc_b tempo de recebimento crítico da batelada b na área de destino em relação à capacidade (h);

ted_b^{cut} tempo de envio disponível da batelada b na área de origem (cortada em função do tempo ideal de transporte) (h);

tec_b^{cut} tempo de envio crítico da batelada b na área de origem (cortada em função do tempo ideal de transporte) (h);

trd_b^{cut} tempo de recebimento disponível da batelada b na área de destino (cortada em função do tempo ideal de transporte) (h);

¹No início do horizonte de *scheduling* já existem produtos no interior dos dutos da rede. Esses produtos são chamados de bateladas de inicialização. O bombeamento nas áreas de origem dessas bateladas já ocorreu, devendo-se apenas calcular o recebimento dessas bateladas em suas respectivas áreas de destino.

trc_b^{cut}	tempo de recebimento crítico da batelada b na área de destino (cortada em função do tempo ideal de transporte) (h);
no_b	área de origem onde será bombeada a batelada b ($no_b \in N$);
nd_b	área de destino onde será recebida a batelada b ($nd_b \in N$);
vol_b	volume total da batelada b (uv);
rfx_b	rota de fluxo associada à batelada b ($rfx_b \in RFX$). Com essa informação é possível determinar todas as áreas e dutos que passará a batelada b ;
d_b^{ini}	trecho de duto d em que se encontra a batelada b ($b \in B \mid 1 \leq b \leq nb^{ini}$) no início da programação. Se $nb^{ini} < b \leq nb$ então $d_b^{ini} = 0$, ($d_b^{ini} \in D$);

Parâmetros determinados pela Pré-análise

d_b	número do trecho de duto em análise para a batelada b ($d_b \in D$);
bo_b	número da batelada que está sendo bombeada (em sua origem de bombeamento), a qual influenciará o recebimento da batelada b ($bo_b \in B$);
c_{bo}	ordem de bombeamento dos fragmentos (pedaços) de volumes da batelada bo_b ;
c	ordem de recebimento dos fragmentos (pedaços) de volumes da batelada b ;
$part_{b,c}$	volume bombeado de cada pedaço c da batelada b ;
\bar{n}_b	órgão imediatamente anterior ao duto d_b em que se encontra a batelada b .
$npb_{b,\bar{n},n,d}^{min}$	número do menor índice de volumes bombeados da batelada b a partir do nó \bar{n} em direção ao nó n , através do duto d ;
$npb_{b,\bar{n},n,d}^{max}$	número do maior índice de volumes bombeados da batelada b a partir do nó \bar{n} em direção ao nó n , através do duto d ;
$npr_{b,\bar{n},n,d}^{min}$	número do menor índice de volumes recebidos da batelada b a partir do nó \bar{n} em direção ao nó n , através do duto d ;
$npr_{b,\bar{n},n,d}^{max}$	número do maior índice de volumes recebidos da batelada b a partir do nó \bar{n} em direção ao nó n , através do duto d .

APÊNDICE E – DEFINIÇÕES - CAPÍTULO 8

E.1 NOMENCLATURA

Índices

- h horário de custo elétrico elevado ($h \in HP$);
- t horário da troca de turno dos operadores. Como correm três trocas por dia, $t \in 1.. \frac{3H}{24}$ (três vezes o horizonte diário);
- c volumes de bombeamento (ou recebimento) da batelada b a partir do nó \bar{n} em direção ao nó n , através do duto d ($c \in PB_{b,\bar{n},n,d} \vee c \in PR_{b,\bar{n},n,d}$);

Conjuntos¹

- N_{HOR} conjunto de áreas em que ocorre parada de bombeamento de produtos nos horários de ponta de consumo de energia elétrica;
- $PB_{b,\bar{n},n,d}$ conjuntos que contém os volumes de bombeamento da batelada b a partir do nó \bar{n} em direção ao nó n , através do duto d , $PB_{b,\bar{n},n,d} = \{npb_{b,\bar{n},n,d}^{min}, \dots, npb_{b,\bar{n},n,d}^{max}\}$;
- $PR_{b,\bar{n},n,d}$ conjuntos que contém os volumes de recebimento da batelada b a partir do nó \bar{n} em direção ao nó n , através do duto d , $PR_{b,\bar{n},n,d} = \{npr_{b,\bar{n},n,d}^{min}, \dots, npr_{b,\bar{n},n,d}^{max}\}$;
- HP conjunto formado pelos horários de custo elétrico elevado;
- BOH conjunto esparsos para variáveis de horossazonalidade, contendo tuplas do tipo (b, c, no_b, h) ;
- TT conjunto formado pelas tuplas (no_b, t) contendo as trocas de turno t dos operadores no nó no_b ;
- BOT conjunto esparsos para a variável de troca de turno, contendo tuplas do tipo (b, c, no_b, t) ;
- LB conjunto esparsos para a variável de restrição local de bombeio, contendo tuplas do tipo (b, \bar{b}, c, \bar{c}) ;

¹ Alguns dos conjuntos aqui apresentados, serão definidos na seção seguinte

- LR* conjunto esparso para a variável de restrição local de recebimento, contendo tuplas do tipo (b, \bar{b}, c, \bar{c}) ;
- LBR* conjunto esparso para a variável de restrição local de bombeio e recebimento, contendo tuplas do tipo (b, \bar{b}, c, \bar{c}) ;

Parâmetros

- verao* 1, se o horizonte de programação ocorre durante o horário de verão;
0, caso contrário;
- sem* dia da semana em que ocorrerá o início da programação. Como restrições de horossazonalidade devem ser aplicadas apenas de segunda a sexta-feira, esse parâmetro deve informar em que dia da semana ocorrerá o início da programação, para que se identifique quais posições do vetor ih_h e fh_h devem ser consideradas, excluindo sábados e domingos: $sem = 1$ (dom), 2 (seg), 3(ter), 4 (qua), 5 (qui), 6 (sex) ou 7 (sab);
- k* constante utilizada como fator de ponderação para janelas de tempo cortadas ($k = 1$);
- kc* constante utilizada como fator de ponderação para janelas de tempo de capacidade ($kc = 10$);
- kp* constante utilizada como fator de ponderação para variáveis de relaxação dos casos de pulmão ($k = 10.000$);
- nh* número de dias em que será tarifado o custo de energia elétrico elevado²;
- ω tempo de duração do período horossazonal (h);
- ih_h tempo de início da horossazonalidade h dentro do horizonte de programação (h);
- fh_h tempo de final da horossazonalidade h dentro do horizonte de programação (h);
- $it_{n,t}$ tempo de início da troca de turno t no órgão n (h);
- $ft_{n,t}$ tempo de final da troca de turno t no órgão n (h);

Variáveis Contínuas do Modelo PLIM

- $ib_{b,\bar{n},n,d,c}$ indica o tempo de início de envio do volume c da batelada b (parte c da batelada b), da área \bar{n} para a área n , através do duto d (h);

²O número de dias pode variar entre 1 e o tamanho do horizonte de planejamento (30 ou 31 dias) devendo ser determinado antecipadamente, de acordo com o objetivo do programador: a avaliação de horários de pico somente para os primeiros dias do horizonte de programação, podendo diminuir o tempo para obtenção da solução (menos variáveis binárias - vide tabela 24, página 173), ou ocorrência de horários de pico para todo horizonte de programação.

- $fb_{b,\bar{n},n,d,c}$ indica o tempo de final de envio do volume c da batelada b , da área \bar{n} para a área n , através do duto d (h);
- $ir_{b,\bar{n},n,d,c}$ indica o tempo de início de recebimento do volume c da batelada b na área n , enviada da área \bar{n} , através do duto d (h);
- $fr_{b,\bar{n},n,d,c}$ indica o tempo de final de recebimento do volume c da batelada b na área n , enviada da área \bar{n} , através do duto d (h);
- $ao_{b,no_b,c}$ indica o tempo de adiantamento no envio do volume c da batelada b , da área de origem no_b , em relação ao parâmetro ted_b (h);
- $do_{b,no_b,c}$ indica o tempo de atraso no envio do volume c da batelada b , da área de origem no_b , em relação ao parâmetro tec_b (h);
- $ad_{b,nd_b,c}$ indica o tempo de adiantamento no recebimento do volume c da batelada b , na área de destino nd_b , em relação ao parâmetro trd_b (h);
- $dd_{b,nd_b,c}$ indica o tempo de atraso no recebimento do volume c da batelada b , na área de destino nd_b , em relação ao parâmetro trc_b (h);
- $aoc_{b,no_b,c}$ indica o tempo de adiantamento no envio do volume c da batelada b , da área de origem no_b , em relação ao parâmetro ted_b^{cut} (h);
- $doc_{b,no_b,c}$ indica o tempo de atraso no envio do volume c da batelada b , da área de origem no_b , em relação ao parâmetro tec_b^{cut} (h);
- $adc_{b,nd_b,c}$ indica o tempo de adiantamento no recebimento do volume c da batelada b , na área de destino nd_b , em relação ao parâmetro trd_b^{cut} (h);
- $ddc_{b,nd_b,c}$ indica o tempo de atraso no recebimento do volume c da batelada b , na área de destino nd_b , em relação ao parâmetro trc_b^{cut} (h);
- $vhoriz_{b,\bar{n},n,d,c}$ indica o tempo de atraso do final de bombeio de bateladas que ocorrem fora do horizonte total de planejamento H ;
- $rpulm^1_{b,\bar{b},c,\bar{c}}$ variável de violação da restrição de pulmão relacionada ao início de bombeio (Caso 1);
- $rpulm^2_{b,\bar{b},c,\bar{c}}$ variável de violação da restrição de pulmão relacionada ao início de bombeio (Caso 2);
- $rpulm^3_{b,\bar{b},c,\bar{c}}$ variável de violação da restrição de pulmão relacionada ao início de bombeio (Caso 3);
- $rpulm^4_{b,\bar{b},c,\bar{c}}$ variável de violação da restrição de pulmão relacionada ao final de bombeio;
- $z_{b,c,no_b,h}$ variável contínua que assume valor binário. $z_{b,c,no_b,h} = 1$ quando ocorre parada de bombeamento do volume c da batelada b , na área n , durante o horário de ponta h , caso contrário ($z_{b,c,no_b,h} = 0$);

Variáveis Binárias do Modelo PLIM

- $x_{b,c,no_b,h}$ 1, se o início do bombeamento de um volume c da batelada b em sua origem ocorre antes do início do período de tarifação horossazonal ih_h ;
0, caso contrário;
- $y_{b,c,no_b,h}$ 1, se o final do bombeamento de um volume c da batelada b em sua origem ocorre depois do início do período de tarifação horossazonal ih_h ;
0, caso contrário;
- $w_{b,c,no_b,h}$ 1, se o início do bombeamento de um volume c da batelada b em sua origem ocorre antes do final do período de tarifação horossazonal fh_h ;
0, caso contrário.
- $lb_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1$ 1, se o início do bombeamento do volume \bar{c} da batelada \bar{b} respeita o final do bombeamento do volume c da batelada b ;
- $lb_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2$ 1, se o início do bombeamento do volume c da batelada b respeita o final do bombeamento do volume \bar{c} da batelada \bar{b} ;
- $lr_{b,\bar{b},pc,\bar{c}}^1$ 1, se o início do recebimento do volume \bar{c} da batelada \bar{b} respeita o final do recebimento do volume c da batelada b ;
- $lr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2$ 1, se o início do recebimento do volume c da batelada b respeita o final do recebimento do volume \bar{c} da batelada \bar{b} ;
- $lbr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^1$ 1, se o início do recebimento do volume \bar{c} da batelada \bar{b} respeita o final do bombeamento do volume c da batelada b ;
- $lbr_{b,\bar{b},c,\bar{c}}^2$ 1, se o início do bombeamento do volume c da batelada b respeita o final do recebimento do volume \bar{c} da batelada \bar{b} ;
- $xtb_{b,p,no_b,t}$ 1, quando ocorre atraso no bombeamento do volume c da batelada b , na área no_b , pela troca de turno t dos operadores, caso contrário ($xtb_{b,p,no_b,t} = 0$).

E.2 DEFINIÇÃO DE CONJUNTOS DE ÍNDICES E PARÂMETROS

Os conjuntos e parâmetros do modelo PLIM de Temporização podem ser obtidos a partir de informações obtidas da alocação de recursos, da pré-análise ou de pré-processamentos no modelo, conforme explicações das seções E.2.1 a E.2.3. Além dos parâmetros obtidos por uma das três formas citadas, parâmetros, índices e conjuntos gerais além de variáveis contínuas e binárias são utilizados.

E.2.1 Parâmetros obtidos pela alocação de recursos

Alguns dos parâmetros obtidos pela alocação de recursos são utilizados pela Pré-análise e foram apresentados no Apêndice anterior. Eles podem ser encontrados na página 231 no item: Parâmetros determinados pela Alocação de recursos.

E.2.2 Parâmetros obtidos pela pré-análise

Os parâmetros obtidos pela pré-análise foram apresentados no Apêndice anterior. Eles podem ser encontrados na página 232 no item: Parâmetros determinados pela Pré-análise.

E.2.3 Parâmetros/Conjuntos obtidos pelo pré-processamento

Os parâmetros e conjuntos descritos a seguir, são calculados dentro de um *solver* comercial utilizado para resolução do modelo de otimização (ILOG, 2009). A geração de conjuntos é feita de forma esparsa, sendo que as restrições utilizam os conjuntos para gerar expressões apenas para índices válidos. Por exemplo, para uma mesma variável ao considerar o índice de uma batelada b , o índice de uma área n poderá ser somente as áreas que estão na rota que passará a batelada b , diminuindo, assim, o número de variáveis geradas. Porém, o cálculo desses conjuntos e parâmetros é feito em uma etapa anterior à estrutura principal do modelo, ou seja, a função objetivo e as restrições, facilitando a criação de restrições do modelo PLIM. Para a criação das tuplas dos conjuntos esparsos, considere as seguintes hipóteses de dados:

- batelada a ser enviada: $b = 10$;
- área de origem: $no_b = 6$;
- área de destino: $nd_b = 14$;
- rota de envio da batelada: {N6, 25, N8, 2, N11, 5, N12, 18, N14 }
- número de pedaços de bombeio em todos os dutos da rota: 2
 $(npb_{10,\bar{n},n,d}^{min} = 1 \text{ e } npb_{10,\bar{n},n,d}^{max} = 2 \forall (\bar{n}, n, d) \text{ na rota de } b = 10)$;
- número de pedaços de recebimento em todos os dutos da rota: 1
 $(npr_{10,\bar{n},n,d}^{min} = 2 \text{ e } npr_{10,\bar{n},n,d}^{max} = 2 \forall (\bar{n}, n, d) \text{ na rota de } b = 10)$.

Variáveis de bombeio, recebimento e violação do horizonte ib , fb , ir , fr e $vhoriz$

Para cada batelada b , são conhecidos os dutos em que haverá movimentação dessa batelada, os órgãos de origem, órgãos intermediários e, órgãos de destino dessa batelada. Esses dados são fornecidos pela alocação de recursos, através da rota atribuída à batelada como, por exemplo, na tabela 19 (página 130). Além disso, a quantidade de volumes em que essa batelada será dividida é provida pela Pré-análise. As seguintes tuplas serão geradas para as variáveis ib , fb e $vhoriz$:

$$(b, \bar{n}, n, d, c) \in \{ (10,6,8,25,1), (10,6,8,25,2), \\ (10,8,11,2,1), (10,8,11,2,2), \\ (10,11,12,5,1), (10,11,12,5,2), \\ (10,12,14,18,1), (10,12,14,18,2) \}$$

Note que a quantidade de volumes bombeados em cada duto pode variar (npb^{min} e npb^{max} são indexados pela tupla (b, \bar{n}, n, d)). Além disso, a quantidade e os índices de volume de bombeio podem diferir dos índices/quantidade de volume de recebimento (npr^{min} e npr^{max}). Dessa forma, para o exemplo acima, apesar da batelada percorrer a mesma rota exemplificada, as variáveis ir e fr podem conter tuplas distintas das tuplas utilizadas em ib , fb e $vhoriz$. As tuplas para as variáveis ir e fr serão:

$$(b, \bar{n}, n, d, c) \in \{ (10,6,8,25,2), (10,8,11,2,2), \\ (10,11,12,5,2), (10,12,14,18,2) \}$$

Variáveis para violações nas janelas temporais ao , do , ad , dd , aoc , doc , adc e ddc

Para as variáveis de violação nas janelas de tempo nas áreas de origem (ao , do , aoc e doc) são necessários apenas os índices das bateladas e seus respectivos pedaços de bombeio, além do índice da área de origem da batelada b :

$$(b, no_b, c) \in \{ (10,6,1), (10,6,2) \}$$

De forma similar, para as variáveis de violação nas janelas de tempo nas áreas de destino (ad , dd , adc e ddc) são necessários apenas os índices das bateladas e seus respectivos pedaços de recebimento, além do índice da área de destino da batelada b :

$$(b, nd_b, c) \in \{ (10,14,2) \}$$

Ordem de bombeio das bateladas

Como mencionado ao longo da tese, a sequência de bombeamento pré-estabelecida deve ser respeitada. Ou seja, os bombeamentos e recebimentos, não só nas origens mas também nos órgãos intermediários, devem ocorrer em ordem, conforme carteira de bateladas disponibilizada pelo bloco alocação de recursos ou reordenação. Dessa forma, a tupla $(b, \bar{b}, d) \in BBD$ é criada para auxiliar a construção da restrição 98 (página 150). A tupla (b, \bar{b}, d) realiza a precedência de bombeio da batelada b sob a batelada \bar{b} no duto d e é construída da seguinte maneira:

$$BBD = \{(b, \bar{b}, d) | \{b, \bar{b}\} \in B \mid ord(b) < ord(\bar{b}), d \in D\}$$

Variáveis binárias para restrições locais lb^1 , lb^2 , lr^1 , lr^2 , lbr^1 e lbr^2

Para as variáveis binárias referente às restrições locais de bombeio (lb^1 e lb^2), é feita a combinação de duas bateladas b e \bar{b} com seus respectivos volumes de bombeio c e \bar{c} , os quais possuam produtos que não poderão ser bombeados simultaneamente. São dados os códigos de movimentos proibitivos e as tuplas (b, \bar{b}, c, \bar{c}) são geradas para cada caso específico, desde que possuam o mesmo código cd . Quando dois produtos $prod_b$ e $prod_{\bar{b}}$ possuem o mesmo código, para uma mesma área $no_b = no_{\bar{b}}$, as bateladas b e \bar{b} não poderão ser bombeadas simultaneamente:

$$LB = \{(b, \bar{b}, c, \bar{c}) | \{b, \bar{b}\} \in B \mid b < \bar{b}, c \in PB_{b, no_b, n, d}, \bar{c} \in PB_{\bar{b}, no_b, n1, d1}, cd_{prod_b, no_b} = cd_{prod_{\bar{b}}, no_b}\}$$

Similarmente, para as áreas de recebimento, os índices das variáveis lr^1 e lr^2 são gerados fazendo-se a combinação de duas bateladas b e \bar{b} com seus respectivos volumes de recebimento c e \bar{c} , os quais possuam produtos que não poderão ser recebidos simultaneamente em uma área de destino $nd_b = nd_{\bar{b}}$:

$$LR = \{(b, \bar{b}, c, \bar{c}) | \{b, \bar{b}\} \in B \mid b < \bar{b}, c \in PR_{b, n, nd_b, d}, \bar{c} \in PR_{\bar{b}, n1, nd_b, d1}, cd_{prod_b, nd_b} = cd_{prod_{\bar{b}}, nd_b}\}$$

Finalmente, para as áreas onde bateladas podem ser bombeadas e recebidas, os índices das variáveis lbr^1 e lbr^2 são gerados fazendo-se a combinação de duas bateladas b (com origem em no_b) e \bar{b} (com destino para $nd_{\bar{b}}$) com seus respectivos volumes de bombeio c e recebimento \bar{c} os quais possuam produtos que não poderão ser bombeado e recebido simultaneamente na área $no_b = nd_{\bar{b}}$:

$$LBR = \{(b, \bar{b}, c, \bar{c}) | \{b, \bar{b}\} \in B \mid b \neq \bar{b}, c \in PB_{b, no_b, n, d}, \bar{c} \in PB_{\bar{b}, n1, no_b, d1}, cd_{prod_b, no_b} = cd_{prod_{\bar{b}}, no_b}\}$$

Variáveis binárias horossazonais x , y , z e w

Os parâmetros ih_h e fh_h são calculados através das equações 154 e 155. Ressalta-se que, no caso em estudo o horário de pico de consumo inicia-se às 17h30 e finaliza às 20h30.

$$ih_h = 17.5 + 24 \cdot (h - 1) + verao \quad \forall h \in HP \quad (154)$$

$$fh_h = 20.5 + 24 \cdot (h - 1) + verao \quad \forall h \in HP \quad (155)$$

O conjunto HP é derivado da diferença dos conjuntos $HP1$ e $HP2$, onde $HP1$ contém todos os índices h e $HP2$ contém apenas os índices referentes aos finais de semana (sábados e domingos). Por isso é necessário saber em que dia da semana (sem) a programação será iniciada. Os conjuntos podem ser descritos como a seguir apresentado:

$$HP1 = \{h | h \in 1..nh\}$$

$$HP2 = \{h | h \in 1..nh, x \in 0..7 : h = 7x + 2 - sem \vee h = 7x + 8 - sem\}$$

$$HP = HP1 - HP2$$

Logo, a tupla (b, c, no_b, h) utilizada pelas variáveis binárias horossazonais x , y , z e w é obtida da seguinte forma:

$$BOH = \{(b, c, no_b, h) | b \in B, no_b \in N_{HOR}, c \in PB_{b, no_b, n, d}, h \in HP : ted_b \leq ih_h \leq tec_b\};$$

No conjunto BOH , são gerados índices apenas para as áreas contidas em N_{HOR} , onde o custo elétrico de bombeio possui valor elevado. Além disso, são considerados apenas os dias úteis obtidos pelo conjunto HP . Finalmente, se o bombeio ocorrer fora da janela de envio da batelada, a parada de envio por horossazonal da batelada não será proibitiva pois, nesse caso, o estoque é priorizado ($ted_b \leq ih_h \leq tec_b$).

Variável binária para troca de turno xtb

Assim como foi criado um conjunto para a geração de tuplas esparsas para os casos de horossazonalidade, de forma similar, foram criadas tuplas para troca de turno dos operadores (vide conjunto BOT a seguir apresentado). Nesse caso, também considera-se que, se o bombeio ocorrer fora da janela de envio da batelada, a parada de envio da batelada não será proibitiva pois, nesse caso, o estoque é priorizado ($ted_b \leq it_{no_b, t} \leq tec_b$).

$$BOT = \{(b, c, no_b, t) | b \in B, c \in PB_{b, no_b, n, d}, (no_b, t) \in TT : ted_b \leq it_{no_b, t} \leq tec_b\};$$

Variável de relaxação de pulmão $rpulm$

Finalmente, para todas as restrições de pulmão e estoque intermediário, as seguintes condições devem ser satisfeitas:

- $b \neq \bar{b}$
- $no_b = nd_{\bar{b}}$
- $vol_b = vol_{\bar{b}}$
- $ted_b = ted_{\bar{b}}$
- $prod_b = prod_{\bar{b}}$
- $(no_b, prod_b) \in PM$

As quatro variáveis de relaxação ($rpulm^1$, $rpulm^2$, $rpulm^3$ e $rpulm^4$) são criadas para casos de pulmão, onde não é possível iniciar o bombeio na área de pulmão no mesmo instante que a batelada é recebida nesta área. Conforme descrito na página 153, três casos devem ser considerados para restrições de início de bombeio e uma variável de relaxação é criada para cada um deles ($rpulm^1$, $rpulm^2$ e $rpulm^3$) além da variável de relaxação para restrição de final de bombeio ($rpulm^4$). Os índices para cada restrição são criados de forma esparsa, considerando-se particularidades de cada caso. Deve-se considerar, nos três casos que os pedaços das bateladas \bar{b} e b terão a relação:

Caso 1 O bombeio do primeiro pedaço da batelada b (ou seja, pedaço $c = npb_{b,no_b,n,d}^{min}$) ocorre quando é realizado o recebimento do primeiro pedaço da batelada \bar{b} (ou seja, pedaço $\bar{c} = npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{min}$). Nesse caso o volume c de bombeio de b é menor ou igual ao volume \bar{c} recebido de \bar{b} . A figura 31 ilustra esse caso. Assim, tem-se: $part_{\bar{b},\bar{c}} \geq part_{b,c}$, onde $\bar{c} = npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{min}$ e $c = npb_{b,no_b,n,d}^{min}$. (vide equação 31, página 153);

Caso 2 O bombeio do primeiro pedaço da batelada b (ou seja, pedaço $c = npb_{b,no_b,n,d}^{min}$) ocorre após o recebimento de mais de 1 pedaço da batelada \bar{b} (ou seja, pedaço $\bar{c} > npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{min}$), conforme ilustrado pela figura 32. Nesse caso, o início do bombeio de c pode ser adiantado em função do volume já recebido anteriormente ($\bar{c} - 1$) e o volume c de bombeio de b é menor ou igual a soma dos volumes recebidos de \bar{b} . Assim, tem-se: $\sum part_{\bar{b},\bar{c}} \geq part_{b,c}$, onde $\bar{c} > npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{min}$ e $c = npb_{b,no_b,n,d}^{min}$. (vide equação 32, página 154);

Caso 3 O bombeio dos demais pedaços da batelada b (excetuando-se o primeiro pedaço, ou seja, pedaço $c > npb_{b,no_b,n,d}^{min}$) ocorre após o recebimento dos demais pedaços da batelada \bar{b} (ou seja, pedaço $\bar{c} > npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{min}$). Nesse caso deve ser considerado o volume remanescente no tanque. O adiantamento do bombeio de c pode ser realizado em função desse volume remanescente (figura 33). Assim, tem-se: $\sum_{\bar{c}} part_{\bar{b},\bar{c}} \geq \sum part_{b,c}$, onde $\bar{c} > npr_{\bar{b},\bar{n},nd_{\bar{b}},d1}^{min}$ e $c > npb_{b,no_b,n,d}^{min}$. (vide equação 33, página 154).

ANEXO A – DADOS

No presente anexo, são apresentados os dados utilizados para a obtenção da solução para o cenário C3, o qual foi detalhado ao longo da tese. São apresentados os limites de estoque mínimo ($ID_{n,p}^{min}$), meta ($ID_{n,p}^{meta}$), máximo ($ID_{n,p}^{max}$), limite de capacidade ($CP_{n,p}$) e quantidade de produto disponível ($disp_{n,p}$) e requerido ($flt_{n,p}$) para cada área e produto. Todos os valores são dados em unidades volumétricas (uv). Esses dados são utilizados como entrada para o modelo de planejamento PLIM (Capítulo 5 - página 91).

n	p	$ID_{n,p}^{min}$	$ID_{n,p}^{meta}$	$ID_{n,p}^{max}$	$CP_{n,p}$	$disp_{n,p}$	$flt_{n,p}$
N2	14	2875	4600	11500	11500	0	100474
N3	10	0	7824	8236	8236	34619	0
N3	11	0	19589	23786	27984	19909	0
N3	13	0	0	7123	7123	3514	0
N3	14	0	3876	4430	5537	24368	0
N3	18	0	8997	9471	9471	13878	0
N3	19	0	16101	17048	18942	7542	0
N3	20	0	15557	16472	18302	22753	0
N3	21	0	19444	23610	27777	162322	0
N3	26	0	40676	50062	62578	157531	0
N3	31	0	55966	68881	86101	289924	0
N4	2	0	0	30416	30416	0	0
N4	3	0	0	2844	2844	835	0
N4	6	0	9193	9734	10815	28658	0
N4	11	0	18929	22985	27041	7799	0
N4	14	5723	10016	28616	28616	9380	0
N4	16	0	0	2828	2828	0	0
N4	18	0	47039	57894	72367	131215	0
N4	21	0	92923	116153	154871	105929	0
N4	22	0	0	5442	5442	1840	0
N4	25	2990	4484	29895	29895	0	3835
N4	27	0	37825	46554	58192	46897	0
N4	29	0	0	7213	7213	325	0
N4	31	0	21042	25551	30060	76693	0
N4	32	0	0	26278	26278	8426	0
N4	34	100000	131114	262227	262227	0	26555
N4	35	0	60024	73875	92344	46462	0
N5	5	0	0	288	288	0	0
N5	10	1232	2053	8213	8213	0	32038
N5	14	1226	2044	8175	8175	0	23825
N5	21	0	29537	35866	42195	106488	0
N5	34	0	40193	49469	61836	155955	0

N6	5	0	0	39626	39626	7539	0
N6	6	0	0	27452	27452	7973	0
N6	11	25969	38954	86564	86564	1333	0
N6	14	0	16571	17546	19495	12286	0
N6	16	0	0	8235	8235	6172	0
N6	18	0	57858	71210	89013	138079	0
N6	20	0	49332	60716	75895	237176	0
N6	21	0	63580	78252	97815	108289	0
N6	25	0	52031	64038	80048	215351	0
N6	27	2000	5000	30000	34000	0	13221
N6	29	1000	1500	22120	22120	0	18241
N6	31	21377	32065	71255	71255	22381	0
N6	32	0	0	6952	6952	961	0
N6	34	0	107944	134930	179907	298288	0
N7	5	0	0	1812	1812	0	0
N7	7	0	0	4719	4719	4029	0
N7	18	0	0	25211	25211	22244	0
N7	20	7607	15213	50711	50711	0	125983
N7	25	0	27010	30611	36013	26694	0
N7	34	8317	16634	55445	55445	0	281364
N7	35	0	0	52253	52253	29005	0
N8	21	0	0	63985	63985	42606	0
N8	27	0	0	63901	63901	20863	0
N8	34	0	0	138773	138773	104035	0
N8	35	0	0	63990	63990	51264	0
N9	1	0	0	5903	5903	0	0
N9	2	0	0	5690	5690	0	0
N9	14	0	0	5087	5087	0	0
N9	18	0	0	5011	5011	26	0
N9	21	0	0	5045	5045	14	0
N9	31	0	0	29775	29775	82	0
N10	2	0	0	435	435	11	0
N10	13	0	0	16878	16878	9519	0
N10	14	0	45574	51650	60765	155161	0
N10	20	2593	5186	17288	17288	0	3381
N10	21	2527	5054	16847	16847	0	124924
N10	26	5044	8407	33628	33628	0	92528
N10	31	0	345	6901	6901	0	77779
N11	1	0	0	1840	1840	0	0
N11	5	0	0	503	503	222	0
N11	21	5145	9004	25725	25725	0	41674
N11	25	5507	9637	27534	27534	0	152791
N11	27	0	0	9841	9841	2893	0

N11	31	6970	12197	34848	34848	0	26831
N11	32	0	0	9843	9843	3400	0
N12	1	0	0	265	265	0	0
N12	2	0	0	2891	2891	283	0
N12	21	7038	12317	35191	35191	0	60221
N12	31	9954	17420	49772	49772	0	72418
N12	34	0	0	5902	5902	5877	0
N13	2	0	0	9772	9772	6859	0
N13	16	0	0	4909	4909	2295	0
N13	19	772	1286	5145	5145	1647	0
N13	21	2967	4945	19781	19781	0	55356
N13	27	1515	2525	10101	10101	0	11918
N13	31	4142	7249	20710	20710	0	69270
N13	34	0	0	16430	16430	12131	0
N13	35	4675	8181	23374	23374	0	22513
N14	18	37100	58300	106000	106000	0	173134