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

LUIZ CARLOS FELIZARI

PROGRAMAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE TRANSPORTE DE DERIVADOS DE PETRÓLEO EM REDES DE DUTOS

TESE DE DOUTORADO

CURITIBA

2009

LUIZ CARLOS FELIZARI

PROGRAMAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE TRANSPORTE DE DERIVADOS DE PETRÓLEO EM REDES DE DUTOS

Tese de doutorado 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.

Orientadora: Profa. Dra. Lúcia Valéria Ramos de Arruda

Co-orientador: Prof. Dr. Ricardo Lüders

CURITIBA

2009

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UTFPR, Campus Curitiba

F316 Felizari, Luiz Carlos
Programação das operações de transporte de derivados de petróleo em redes de dutos / Luiz Carlos Felizari. — 2009.
152 p. : il. ; 30 cm

Orientador : Lúcia Valéria Ramos de Arruda
Co-orientador : Ricardo Lüders
Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2009
Bibliografia : 147-152

1. Petróleo – Derivados. 2. Petróleo – Transporte. 3. Programação linear. 4. Oleodutos de petróleo. 5. Engenharia elétrica – Teses. I. Arruda, Lúcia Valéria Ramos de, orient. II. Lüders, Ricardo, co-orient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Campus Curitiba

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

Título da Tese Nº 46:

"Programação das Operações de Transporte de Derivados de Petróleo em Redes de Dutos"

por

Luiz Carlos Felizari

Esta tese foi apresentada, às 13h30min do dia 04 de dezembro de 2009, como requisito parcial para a 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. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

Profª. Dr. Lúcia Valéria Ramos de Arruda
(Orientadora - UTFPR)

Prof. Dr. Eduardo Uchoa Barboza
(UFF)

Prof. Dr. Virgílio José Martins Ferreira Filho
(UFRJ)

Prof. Dr. César Augusto Tacla
(UTFPR)

Prof. Dr. Flávio Neves Junior
(UTFPR)

Visto da coordenação:

Prof. Dr. Humberto Remígio Gamba
(Coordenador do CPGEI)

Av. Sete de Setembro, 3165 - 80230-901 - Curitiba – PR.
Tel. +55 (41) 3310 4680 / e-mail: cpgei-ct@utfpr.edu.br / http://www.cpgei.ct.utfpr.edu.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos amigos e orientadores Prof^{a}. Dr^{a}. Lúcia Valéria Ramos de Arruda e Prof. Dr. Ricardo Lüders pelo constante aprendizado e incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Flávio Neves Junior pela oportunidade de fazer parte do laboratório LASCA, exemplo de trabalho e dedicação ao desenvolvimento de alunos e professores da UTFPR.

Agradecimento especial aos amigos Sérgio, Leandro e Suelen por compatilharem momentos de sabedoria e companheirismo refletidos nas contribuições desta tese.

Agradecimento à Camila pelo desenvolvimento dos algoritmos de integração do modelo matemático de ordenação de bateladas à ferramenta SConsuelo, permitindo o aprimoramento dos resultados obtidos.

Aos amigos Rosalvo, Lia, Viviane, Daniel, Mário, Bettoni, Helton, Willian, Lucas Lara, Kira, Lucas Paiva e a todos os colegas do laboratório LASCA pelo excelente convívio e aprendizado durante estes anos.

Aos membros da banca Prof. Dr. Eduardo Uchoa Barboza, Prof. Dr. Virgílio José Martins Ferreira Filho, Prof. Dr. Cesar Augusto Tacla e Prof. Dr. Flávio Neves Junior pela disposição de examinarem este trabalho e pelas sugestões dadas.

Aos engenheiros da PETROBRAS Luiz Fernando de Jesus Bernardo, Paulo César Ribas, Marcel Joly, Márcio Audi e Rubens Oshiro pela oportunidade de trabalhar no desenvolvimento da ferramenta SConsuelo.

Aos meus pais por lutarem pela educação dos filhos e a meu irmão por seu apoio durante este período.

A minha querida esposa Ana Paula, companheira e incentivadora durante os momentos de dificuldade e alegria.

Este trabalho recebeu o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo (ANP) e do CTPetro/Financiadora de Estudos e Projetos através do programa de recursos humanos para o setor de petróleo e gás natural - UTFPR/PRH10, CENPES/PETROBRAS (0050.0017859.05.3 e 0050.0027214.06.2)

RESUMO

FELIZARI, Luiz Carlos. Programação das operações de transporte de derivados de petróleo em redes de dutos. 152 f. Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

Este trabalho desenvolve uma estrutura de otimização que auxilia a tarefa de escalonamento das atividades de transporte de derivados de petróleo em uma rede de dutos. A malha dutoviária em estudo é utilizada para o transporte de derivados leves de petróleo com alto valor agregado, sendo composta por 9 áreas (3 refinarias, 1 porto e 5 terminais). Dentro deste cenário, a busca por resultados práticos considerando uma carga computacional aceitável torna-se um grande desafio. A abordagem adotada baseia-se na decomposição do problema, onde é investigada a aplicação de um modelo de programação linear inteira mista (*Mixed Integer Linear Programming* - MILP) com domínio de tempo contínuo para determinar o escalonamento das operações de curto-prazo da rede de dutos. Em função da abordagem hierárquica proposta, a etapa de ordenação da lista de bateladas utilizada na fase de temporização foi inicialmente desenvolvida através de heurísticas construtivas que falham em situações particulares. Neste sentido, o problema de ordenação é reformulado através do emprego de estruturas de alto nível presentes em técnicas de programação lógica por restrições (*Constraint Logic Programming* - CLP). Na forma como é apresentada, a estrutura desenvolvida vem sendo extensivamente testada em cenários reais envolvendo mais de 100 bateladas para o horizonte de aproximadamente um mês. A partir desta ferramenta, novas programações de curto-prazo serão propostas, programações existentes serão validadas e informações de diagnóstico da rede serão obtidas de forma a auxiliar o processo de tomada de decisão operacional.

Palavras-chave: Escalonamento. Rede de Dutos. Petróleo. Programação Linear Inteira Mista.

ABSTRACT

FELIZARI, Luiz Carlos. Scheduling of multiproduct distribution in a real-world pipeline network. 152 f. Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

This work addresses an optimisation structure to support the operational decision-making of scheduling activities in a real-world pipeline network. The used scenario to transport petroleum derivatives involves 9 areas (3 refineries, 1 harbour, and 5 distribution centres). Thus, the computational burden for determining a short-term scheduling within the considered scenario is a relevant issue. A decomposition approach is proposed to address such real-world problem. A continuous-time mixed integer linear programming model (MILP) is studied and used to determine the operational short-term scheduling. In this context of multilevel hierarchical structure, sequencing of activities are carried out by a heuristic algorithm which can fail for some particular cases. Thus, we propose to reformulate the sequencing problem by using high-level constructs of Constraint Logic Programming (CLP). The optimisation structure has been extensively tested in typical operational scenarios which, involve in general more than 100 batches. The scheduling horizon is considered to be about 1 month. Many insights have been derived from the obtained solutions, and the proposed approach can support the decision-making process.

Keywords: Scheduling. Network Pipeline. Petroleum. Mixed Integer Linear Programming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Malha de dutos da região Centro-Oeste e São Paulo 23
Figura 2 – Grafo direcionado da rede de dutos 55
Figura 3 – Estoque agregado por área 56
Figura 4 – Operações de movimentação 58
Figura 5 – Operação de reversão 59
Figura 6 – Arquitetura proposta: módulos construtivos 61
Figura 7 – Janelas de envio e recebimento 63
Figura 8 – Caminho da rota de fluxo rfx_b 75
Figura 9 – Tarifação horossazonal 86
Figura 10 – Períodos de troca de turno de trabalho 88
Figura 11 – Distribuição das bateladas na rede - cenário ilustrativo 98
Figura 12 – Carta de Gantt - cenário ilustrativo 99
Figura 13 – Tempos de bombeio - cenário C2 103
Figura 14 – Tempos de recebimento - cenário C2 104
Figura 15 – Restrição local - área N1 105
Figura 16 – Restrição local - área N7 105
Figura 17 – Operação pulmão 106
Figura 18 – Operação de reversão 107
Figura 19 – Restrição horossazonal 108
Figura 20 – Restrição de troca de turno - bombeio 109
Figura 21 – Restrição de troca de turno - recebimento 109
Figura 22 – Gantt - programação inicial 112
Figura 23 – Gantt - batelada 33 no final da carteira 113
Figura 24 – Influência da ordenação nos tempos de propagação 116
Figura 25 – Efeito da ordenação de bateladas na rede 118
Figura 26 – Precedência entre bateladas do mesmo produto na mesma origem 119
Figura 27 – Possível ordenação entre bateladas de produtos distintos 119
Figura 28 – Precedência entre bateladas de diferentes produtos 120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ordenação de bateladas em função de C_b 64
Tabela 2 – Estrutura do modelo de temporização 95
Tabela 3 – Carteira de bateladas - cenário ilustrativo 98
Tabela 4 – Resultados computacionais - modelo de escalonamento (Caso A) 101
Tabela 5 – Resultados computacionais - modelo de escalonamento (Caso B) 101
Tabela 6 – Resultados computacionais - modelo de escalonamento (Caso C) 102
Tabela 7 – Violações das janelas de tempo - cenário C2 (Caso C) 110
Tabela 8 – Total de Violações (Caso A) 111
Tabela 9 – Total de Violações (Caso B) 111
Tabela 10 – Total de Violações (Caso C) 111
Tabela 11 – Estrutura do modelo de ordenação 131
Tabela 12 – Resultados computacionais - modelo de ordenação 135
Tabela 13 – Resultados computacionais após ordenação (Caso A) 135
Tabela 14 – Resultados computacionais após ordenação (Caso B) 136
Tabela 15 – Resultados computacionais após ordenação (Caso C) 136
Tabela 16 – Modelo de Escalonamento - solução inicial e ordenada 137
Tabela 17 – Violações após ordenação (Caso A) 138
Tabela 18 – Violações após ordenação (Caso B) 138
Tabela 19 – Violações após ordenação (Caso C) 138
Tabela 20 – Comparativo de violações - solução inicial e ordenada 139

LISTA DE SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo
CLP	Constraint Logic Programming
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
ILP	Integer Linear Programming
INLP	Integer NonLinear Programming
LP	Linear Programming
MDC	Máximo Divisor Comum
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MINLP	Mixed Integer NonLinear Programming
MIP	Mixed Integer Programming
NLP	NonLinear Programming
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro SA
PM	Programação Matemática
TEC	Tempo de Envio Crítico
TED	Tempo de Envio Disponível
TOC	Theory of Constraints
TRC	Tempo de Recebimento Crítico
TRD	Tempo de Recebimento Disponível

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO . . . 21
1.1 MOTIVAÇÃO . . . 21
1.2 OBJETIVOS . . . 23
1.3 CONTRIBUIÇÕES ALCANÇADAS . . . 25
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO . . . 27
2 ESCALONAMENTO DE OPERAÇÕES EM COMPLEXOS PETROLÍFEROS . . . 29
2.1 PROBLEMAS DE ESCALONAMENTO . . . 29
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS DE ESCALONAMENTO . . . 31
2.3 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS DE ESCALONAMENTO . . . 33
2.4 PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA . . . 37
2.5 MODELOS DE ESCALONAMENTO . . . 41
2.5.1 Escalonamento das Operações de Produção . . . 41
2.5.2 Distribuição e Transporte Dutoviário . . . 43
2.6 CONCLUSÃO . . . 48
3 O PROBLEMA DA PROGRAMAÇÃO DE REDES DE DUTOS . . . 49
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS . . . 49
3.2 CONHECIMENTO ESPECIALISTA . . . 50
3.3 CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE DUTOS . . . 55
3.4 ABORDAGEM DE SOLUÇÃO . . . 61
3.5 CONCLUSÃO . . . 65
4 MODELO DE ESCALONAMENTO PARA UMA REDE DE DUTOS . . . 67
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS . . . 67
4.2 MODELO DE ESCALONAMENTO . . . 70
4.2.1 Notação . . . 70
4.2.2 Variáveis . . . 75
4.2.3 Função Objetivo . . . 78
4.2.4 Restrições . . . 78
4.3 CONCLUSÃO . . . 95
5 RESULTADOS DO MODELO DE ESCALONAMENTO . . . 97
5.1 EXEMPLO ILUSTRATIVO . . . 97
5.2 CENÁRIOS PRÁTICOS . . . 100
5.3 INFORMAÇÕES ADICIONAIS . . . 109
5.4 CONCLUSÃO . . . 113
6 MODELO DE ORDENAÇÃO DE BATELADAS . . . 115
6.1 INTRODUÇÃO . . . 115
6.2 CONSIDERAÇÕES DA MODELAGEM . . . 117
6.3 MODELO DE ORDENAÇÃO . . . 121
6.3.1 Notação . . . 122
6.3.2 Função Objetivo . . . 124
6.3.3 Restrições . . . 125
6.4 CONCLUSÃO . . . 130

7 RESULTADOS DO MODELO DE ORDENAÇÃO 133
7.1 GERAÇÃO DAS INSTÂNCIAS ORDENADAS 133
7.2 TEMPORIZAÇÃO DAS INSTÂNCIAS ORDENADAS 135
7.3 VIOLAÇÕES DAS JANELAS DE TEMPO 138
7.4 CONCLUSÃO 140
8 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS 141
8.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO 143
8.2 PROPOSTAS PARA PESQUISAS FUTURAS 145
REFERÊNCIAS 147

1 INTRODUÇÃO

O crescente interesse pelas áreas de planejamento e programação da produção por parte da indústria petrolífera vem motivando o desenvolvimento de ferramentas computacionais de auxílio à tomada de decisões, em especial aquelas que empregam técnicas de otimização. Além de visar à utilização dos recursos de uma forma mais eficiente, segura e lucrativa, há uma grande motivação adicional, já que estes problemas, muitas vezes, oferecem grandes desafios devido à sua dimensão e complexidade.

Como parte da cadeia de suprimentos da indústria petrolífera, a atividade de distribuição e transporte de derivados de petróleo é uma função que deve coordenar objetivos de produção e compromissos contratados com clientes e distribuidores, de modo a otimizar o desempenho econômico do sistema. Alterações nas demandas e especificações dos produtos, nas datas de entrega, na qualidade e quantidade das matérias primas e na disponibilidade e desempenho das unidades de processo fazem parte das diretrizes de programação, normalmente geradas com frequência semanal ou diária. Embora sendo uma atividade fundamental, a programação relacionada à distribuição de produtos ainda não dispõe de uma solução consolidada que obtenha um bom desempenho sem comprometer o nível de serviço oferecido aos clientes quanto aos aspectos de qualidade, quantidade e prazo de entrega dos produtos.

Inserido neste contexto, o presente trabalho pretende desenvolver ferramentas que auxiliem as operações de um complexo composto por um conjunto de elementos envolvidos no transporte e distribuição de produtos derivados de petróleo, tais como refinarias, terminais e redes de dutos.

1.1 MOTIVAÇÃO

As atividades de programação relativas à distribuição de derivados de petróleo receberam uma atenção crescente nos últimos anos. A distribuição e as operações de transferência desses produtos podem ser executadas utilizando-se estradas de rodagem, linhas férreas, via marítima e polidutos. De acordo com os estudos realizados por (KENNEDY, 2003), polidutos representam uma forma eficiente e segura de transporte de gás e derivados de petróleo, tornando o uso otimizado destes recursos algo de grande interesse para a indústria petrolífera. Desta

forma, o transporte de petróleo e seus derivados através de dutovias é de custo elevado e possui grande potencial para a aplicação de técnicas de otimização visando ganhos de produtividade (MÁS; PINTO, 2003). Rabinow (2004) destaca ainda alguns pontos importantes relacionados ao transporte dutoviário:

- O transporte dutoviário de derivados de petróleo crescerá significativamente durante os próximos 25 anos, sem considerar outras fontes de energia, como o gás natural;
- É caracterizado por ser extremamente diversificado, possuindo grande alcance geográfico e topologias complexas que oferecem serviços de transporte, tratamento, mistura e estocagem de diversos tipos de produtos;
- Em função das políticas de abertura de mercado, o transporte dutoviário torna-se uma atividade cada vez mais competitiva;
- O desenvolvimento tecnológico deverá ser essencial na operação confiável e na segurança ambiental da malha de dutos existente, além de atuar de forma eficaz nos desafios de expansão da infra-estrutura atual.

Atualmente, o Brasil possui 20 mil quilômetros de oleodutos e gasodutos, dos quais 10 mil são operados pela TRANSPETRO, empresa subsidiária da PETROBRAS (TRANSPETRO, 2007). Com o processo de flexibilização do setor de petróleo e gás natural, além da otimização do uso das instalações existentes e redução dos custos operacionais, a capacidade eventualmente ociosa da malha de dutos deve ter seu acesso garantido a terceiros por regulação da ANP (Agência Nacional do Petróleo). À malha de dutos se aliam terminais, bases de armazenamento e uma frota de navios-petroleiros, unindo as áreas de produção, refino e distribuição de derivados de petróleo e de gás natural. A Figura 1 representa de forma esquemática a malha de dutos da região Centro-Oeste e São Paulo, foco deste trabalho em desenvolvimento junto à PETROBRAS.

Sendo uma atividade diária, o gerenciamento da programação das movimentações é realizado por especialistas da PETROBRAS, envolvendo vários sistemas de informação, mas que ainda depende da experiência de programadores e de cálculos manuais. A escolha da programação adequada para as movimentações de produtos, levando em consideração a ordem e o horário de bombeio, os volumes transferidos, o atendimento à demanda, a manutenção de estoques de segurança e fora dos horários de sobretaxa de energia (horossazonalidade) pode gerar ganhos financeiros significativos.

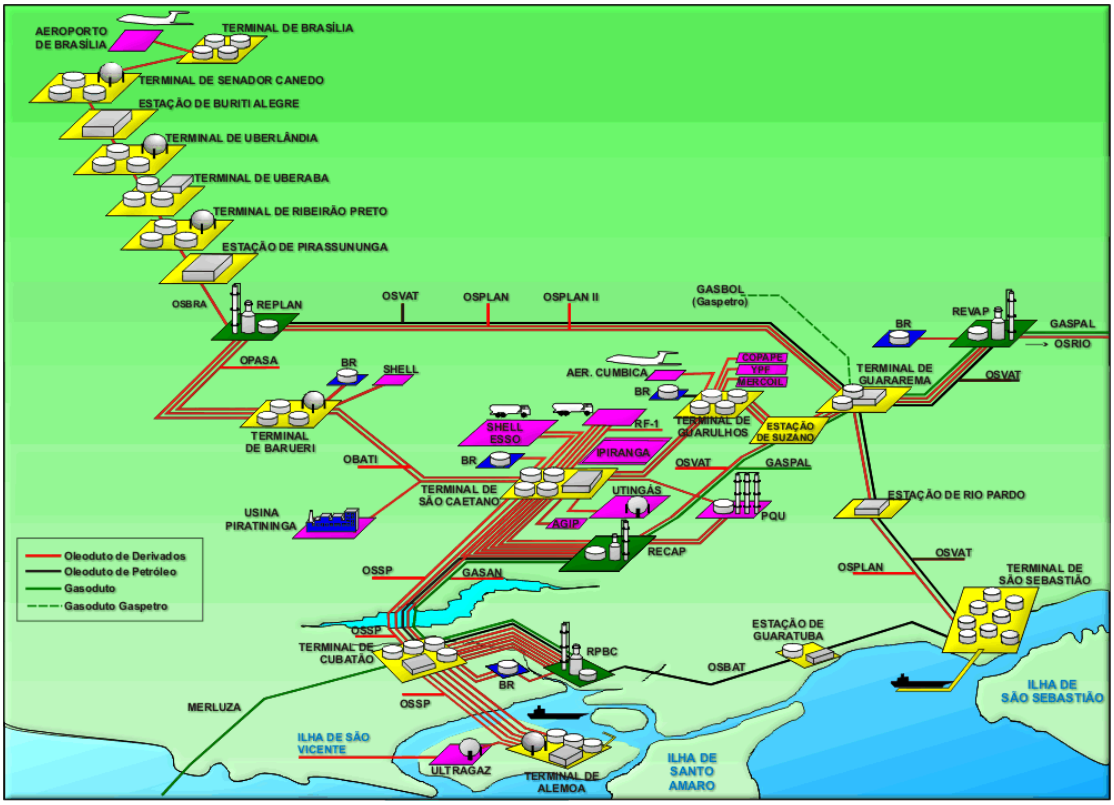

Figura 1 – Malha de dutos da região Centro-Oeste e São Paulo (figura fornecida pela PETROBRAS)

O desenvolvimento de modelos que possam auxiliar no procedimento de tomada de decisão operacional é algo de grande relevância. Desta forma, pretende-se criar uma estrutura de otimização que, a partir das previsões de produção e demanda, e das boas práticas da operação atual, gere uma programação "ótima" das movimentações. Os modelos de otimização a serem investigados tem por propósito fazer parte de um sistema informatizado que oriente a geração de soluções eficientes durante a operação da rede, permitindo evitar significativas reprogramações, prezar o atendimento dos requisitos de entrega de produtos, manter os estoques de refinarias e terminais dentro de limites práticos, e ao mesmo tempo gerenciar a utilização/ocupação dos dutos do sistema. Com isso, pretende-se não apenas otimizar a operação do complexo dutoviário, mas também fornecer informações sobre sua utilização atual, permitindo delinear políticas de aproveitamento futuro da capacidade ociosa da rede.

1.2 OBJETIVOS

Neste contexto, este trabalho tem como proposta principal o desenvolvimento de modelos de otimização aplicados ao escalonamento de operações em uma rede de dutos existente na indústria petrolífera. Abordagens relacionadas a sistemas dutoviários são escassas e os modelos matemáticos genéricos não podem ser direta e eficientemente utilizados em função da

topologia complexa que estas redes apresentam. Como será visto adiante, trabalhos encontrados na literatura tratam do problema de escalonamento em rede de dutos, mas consideram cenários bem mais simples que o abordado nesta tese, normalmente com poucos dutos e um número reduzido de áreas. Neste trabalho, é de extrema importância que os modelos a serem desenvolvidos representem o maior número de aspectos práticos encontrados em situações reais da programação da rede de dutos em estudo.

Adicionalmente, pretende-se investigar técnicas baseadas em programação matemática que auxiliem na tomada de decisões deste cenário específico, em especial, técnicas baseadas em MILP (*Mixed Integer Linear Programming*) e CLP (*Constraint Logic Programming*). A malha de dutos em estudo é parte da rede de claros do estado de São Paulo. Dada a relevância da rede de claros (transporte de derivados leves de alto valor agregado), esta rede foi escolhida por apresentar particular dificuldade de programação, além de englobar grande parte das operações hoje realizadas em toda área dutoviária da região sudeste do Brasil.

O desenvolvimento de modelos de programação matemática, em especial modelos MILP que utilizam variáveis inteiras, possuem uma natureza combinatória de difícil resolução, tornando a complexidade computacional um fator relevante (GAREY; JOHNSON, 1979). Alternativamente, o desenvolvimento de modelos matemáticos através da natureza declarativa da programação lógica associada aos métodos de resolução de problemas que recorrem a restrições fazem da Programação Lógica por Restrições (CLP) uma tecnologia eficaz na resolução de problemas que são intratáveis quando se recorrem a outras técnicas. Entre esses problemas encontram-se diversas classes de problemas de natureza combinatória, tais como os problemas de escalonamento, de planejamento e de atribuição de recursos (TAVARES, 2000). Desta forma, neste trabalho usa-se uma abordagem que propõe a subdivisão do problema em estudo, permitindo a utilização de técnicas de otimização que gerem uma ferramenta para o apoio diário a decisões de escalonamento de curto-prazo e consequente geração de respostas em tempos relativamente baixos.

De maneira geral, a partir dos modelos de otimização diversos cenários deverão ser analisados e comparados com a atual política de programação da rede de dutos. Propostas de novas programações serão apresentadas e comparadas com a prática operacional dos especialistas, obtendo-se informações de diagnóstico da rede, identificando gargalos, taxas de utilização dos dutos e detalhes das movimentações envolvidas.

1.3 CONTRIBUIÇÕES ALCANÇADAS

De forma específica, as principais contribuições alcançadas ao longo deste trabalho são relacionadas a seguir:

- Identificação, extração, organização e sistematização do conhecimento especialista na operação de transporte de derivados de petróleo em uma rede de dutos. Em particular, usando a malha destinada ao transporte de derivados leves da PETROBRAS localizada no estado de São Paulo;

- Desenvolvimento e investigação de metodologias de otimização como base para sistemas que auxiliam os especialistas na tarefa de programação das atividades de transporte de derivados de petróleo de uma rede de dutos. Neste sentido, a arquitetura de solução proposta é inspirada na decomposição do problema considerando três elementos-chaves do escalonamento (*scheduling*): a determinação dos recursos a serem utilizados (*assignment*), o sequenciamento de atividades (*sequencing*) e a temporização (*timing*) do uso dos recursos pelas atividades (REKLAITIS, 1992). Esta abordagem visa desenvolver uma ferramenta que seja capaz de sugerir programações com horizontes de até 30 dias. Fato relevante considerando-se o número de variáveis e restrições operacionais envolvidas;

- Desenvolvimento de um modelo de escalonamento em MILP, responsável pela etapa de temporização da ferramenta de programação. Neste modelo foram consideradas questões críticas presentes na programação diária da rede de dutos, como restrições locais de bombeio e recebimento, operações de reversão e pulmão, penalização de operações durante intervalos de troca de turno e horossazonalidade. Estas questões práticas foram premissas obrigatórias para o sucesso da ferramenta desenvolvida, adequando as soluções geradas às necessidades dos especialistas envolvidos na tarefa de programação da rede de dutos;

- Desenvolvimento de um modelo de ordenação em CLP (*Constraint Logic Programming*) para sugestão de novas sequencias de bombeio destinadas à melhoria da solução fornecida pelo modelo de escalonamento. Esta etapa do trabalho surgiu da necessidade de reformulação do módulo de ordenação da lista de bateladas, inicialmente desenvolvido através de técnicas heurísticas.

Como resultado das contribuições citadas anteriormente, os seguintes trabalhos já foram publicados:

1. NEVES-JR, F. et al. An efficient approach to the operational scheduling of a real-world pipeline network. In: PROCEEDINGS OF 17th EUROPEAN SYMPOSIUM ON COMPUTER AIDED PROCESS ENGINEERING. Bucareste. Computer Aided Chemical Engineering - ESCAPE 17. Amsterdan: Elsevier, 2007a. v. 24, p. 697-702.

2. NEVES-JR, F. et al. Programação das operações de transporte de derivados de petróleo em redes de dutos. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION 2007. Rio de Janeiro, Brasil, 2007b. v. 1, p. 1-8.

3. FELIZARI, L. C. et al. Programação das atividades de transporte de derivados de petróleo em complexos dutoviários. In: ANAIS DO IV CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS. Campinas, Brasil, 2007. v. 1, p. 1-8.

4. FELIZARI, L. C., ARRUDA, L. V. R. Ferramenta de auxílio à programação das operações de transporte de derivados de petróleo em redes de dutos. **Prêmio Petrobras de Tecnologia**. Categoria: Doutorado. Tema: Tecnologia de Logística e de Transporte de Petróleo, Gás e Derivados. Brasil, 2007.

5. FELIZARI, L. C. et al. Sequencing batches in a real-world pipeline network using constraint programming. **In Press: 10th International Symposium on Process Systems Engineering - PSE2009 (Computer Aided Chemical Engineering)**, v. 27: Part A, p. 303-308, 2009.

O primeiro trabalho é parte do que será apresentado no Capítulo 3 (seções 3.3 e 3.4) e Capítulo 4 (seção 4.2), onde se descreve a arquitetura da solução proposta e as principais estruturas do modelo matemático. O segundo e terceiro trabalhos são parte do conteúdo do Capítulo 3 (seções 3.3 e 3.4) e Capítulo 4 (seções 4.1 e 4.2), apresentando de forma específica as hipóteses de modelagem e os detalhes operacionais do cenário em estudo, visando orientar a construção do modelo matemático proposto. A formulação do modelo matemático de escalonamento proposto no capítulo 4, bem como os resultados do Capítulo 5 foram responsáveis pela obtenção do Prêmio Petrobras de Tecnologia em sua 3ª edição na categoria doutorado no tema Tecnologia de Logística e de Transporte de Petróleo, Gás e Derivados. Por último, a formulação do modelo de ordenação descrita no Capítulo 6 foi publicada no 10º PSE2009.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 2 expõe uma revisão teórica sobre os conceitos básicos do problema de escalonamento de operações na indústria do petróleo. Serão apresentadas características inerentes ao processo de modelagem, bem como alguns fundamentos das técnicas de programação linear inteira mista (*Mixed Integer Linear Programming* - MILP) e programação lógica por restrições (*Constraint Logic Programming* - CLP), metodologias empregadas nos modelos do cenário em estudo. A seguir serão revisados alguns trabalhos relacionados às atividades de produção em refinarias, distribuição e transporte de produtos em sistemas dutoviários.

O Capítulo 3 é dedicado à descrição do problema da programação das operações de transporte de derivados de petróleo em uma rede de dutos, destacando os principais critérios que norteiam as atividades de gerenciamento da movimentação de produtos neste cenário. É apresentada ainda a estrutura de subdivisão do problema de escalonamento da rede de dutos e o escopo dos submodelos desenvolvidos nesse trabalho.

No Capítulo 4 são enumeradas as premissas assumidas para a modelagem das operações da rede de dutos. Em seguida, é apresentada uma concepção do modelo matemático de escalonamento baseado em programação linear inteira mista (MILP) com domínio de tempo contínuo. O modelo desenvolvido contempla várias restrições operacionais presentes no problema de programação da rede de dutos, fundamental na obtenção de resultados que atendam as necessidades práticas dos especialistas.

O Capítulo 5 apresenta as simulações computacionais para alguns cenários reais de programação, evidenciando aspectos mais significativos do problema, a aplicabilidade da solução e as limitações da abordagem adotada.

No Capítulo 6, é proposta a formalização dos critérios de sequenciamento durante a fase de ordenação da lista de bateladas utilizada na etapa de escalonamento. De forma específica, é apresentada a reformulação da abordagem de ordenação através de um modelo matemático que emprega estruturas de alto nível presentes em técnicas de programação lógica por restrições (CLP), em substituição à heurística construtiva inicialmente desenvolvida.

O Capítulo 7 apresenta os resultados obtidos da aplicação do modelo de ordenação na geração de novas carteiras de programação da rede de dutos em estudo, comparando o efeito de sequências distintas de bombeio no resultado final da programação de movimentações de produtos.

O Capítulo 8 reporta as principais conclusões do trabalho, suas contribuições mais relevantes para o estudo do problema de programação de redes de dutos e os principais aspectos a serem explorados em desenvolvimentos futuros.

2 ESCALONAMENTO DE OPERAÇÕES EM COMPLEXOS PETROLÍFEROS

Este capítulo primeiramente apresenta os conceitos básicos do problema de escalonamento de operações na indústria petrolífera e a descrição das decisões geralmente envolvidas nestas atividades. Em seguida, serão descritos os aspectos que envolvem o processo de modelagem matemática dos problemas de escalonamento. Serão apresentadas algumas características das técnicas de programação linear inteira mista (*Mixed Integer Linear Programming* - MILP) e programação através de restrições (*Constraint Logic Programming* - CLP), metodologias empregadas nos modelos desenvolvidos. Finalmente, serão revisados trabalhos referentes ao escalonamento de operações em complexos petrolíferos, dando-se ênfase àqueles relacionados às atividades de produção em refinarias, distribuição e transporte de produtos em sistemas dutoviários.

2.1 PROBLEMAS DE ESCALONAMENTO

Na indústria petrolífera, tanto as atividades de escalonamento (*scheduling*) das operações de produção quanto o planejamento (*planning*) de atividades relacionam-se à alocação de recursos e equipamentos limitados para executar tarefas de processamento de um ou mais produtos num determinado período de tempo (PEKNY; ZENTNER, 1993). O planejamento trata de decisões relativas a períodos mais longos, como meses ou anos, envolvendo decisões que abrangem maior investimento, definindo metas de produção em função das previsões de mercado e da disponibilidade de recursos (REKLAITIS, 1992). Por outro lado, o escalonamento de operações se detêm sobre decisões de curto prazo, como por exemplo dias ou semanas, exigindo um maior nível de detalhamento ao longo do horizonte de tempo definido sempre que atividades competem por recursos e utilidades escassos. Em problemas de escalonamento, três componentes importantes estão presentes (REKLAITIS, 1992):

1. Alocação das tarefas (operações ou processos) aos recursos;

2. Sequenciamento das tarefas;

3. Determinação do tempo de utilização dos recursos para o processamento das tarefas.

A alocação envolve a seleção de um grupo apropriado de recursos para uma dada tarefa. O sequenciamento se refere à ordenação da execução das tarefas alocadas aos recursos, enquanto a temporização envolve a determinação do início e final específico para cada uma das atividades programadas.

Segundo Reklaitis (1992), de forma geral, um problema de escalonamento possui os seguintes elementos:

- Conjunto de equipamentos (planta produtiva);
- Conjunto de recursos humanos e/ou materiais secundários, denominados de utilidades (por exemplo, energia elétrica);
- Conjunto de receitas e custos associados a produtos e processos;
- Demanda de matérias-primas ou de produtos finais;
- Estratégia operacional.

O escalonamento objetiva a otimização de um ou mais elementos acima mencionados, sendo que, dependendo da complexidade do problema real, a obtenção de uma solução factível em tempo viável passa a ser o objetivo principal.

Embora grande parte das decisões, tais como a escolha de recursos para a realização de uma determinada tarefa, pareçam triviais em um primeiro momento, podem gerar consequências importantes ao longo do horizonte de tempo. Além disso, há um grande número de atividades diferentes que precisam ser programadas ao mesmo tempo e um grande número de perturbações externas que devem ser levadas em consideração. Segundo Lee e Dagli (1997), alguns fatores adicionais contribuem para a dificuldade dos problemas de escalonamento:

- As ações tomadas pelo programador de operações geralmente dependem de outras decisões, externas à sua atribuição (BODINGTON, 1995);
- A existência de eventos aleatórios (indisponibilidade de equipamentos tais como tanques e dutos em manutenção, redução do número de bombas por restrição do consumo de energia, etc);
- É comum o processo possuir múltiplos objetivos, muitas vezes conflitantes, a serem otimizados simultaneamente;
- Presença de um certo grau de incerteza associado à complexidade das operações a serem realizadas.[1]

[1] Um exemplo pode ser observado durante a troca de turno das refinarias, onde a complexidade das manobras torna-se relevante em função da experiência dos operadores (STEBEL, 2006).

Portanto, conclui-se que problemas de escalonamento são inerentemente difíceis, sendo comum a presença de incertezas associadas à solução de problemas desta complexidade. Apesar das dificuldades existentes, o escalonamento é necessário sempre que for verificada uma competição entre tarefas de processo, distintas ou não, por recursos limitados que se encontram disponíveis dentro de um período de tempo (JOLY, 1999).

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS DE ESCALONAMENTO

Devido às diversas abordagens existentes na literatura e considerando suas principais características, Pinto e Grossmann (1998) analisam os seguintes aspectos visando diferenciar e classificar os vários problemas de escalonamento:

Balanço de Massa

O balanço de massa é elaborado em função das características do processamento. Em processos contínuos há um fluxo ininterrupto de produto, onde geralmente não se verifica variação de massa. Em processos tipicamente discretos, os produtos são tratados em bateladas ou lotes. Nos processos parcialmente contínuos as bateladas do mesmo produto são geradas uma após a outra ou na forma em que parte do processamento é feito em batelada e parte é realizada de forma contínua.

Topologia da Planta

Relaciona-se com a disposição das unidades ou equipamentos interconectados numa planta de processamento. Deste modo, podem ser classificadas em plantas seriais e plantas em rede. Nas plantas seriais os produtos passam por uma série de estágios de processamento pré-definido, numa única direção. Assim, processos em batelada em que a sequência de processamento é rigorosamente a mesma para todos os equipamentos, são característicos de plantas *flowshop*. Quando não é possível reconhecer uma direção de fluxo e quando nem todos os produtos passam por todos os estágios, então a planta é denominada *jobshop*. Neste tipo de configuração, cada produto possui seu próprio roteiro de processamento, não caracterizando uma planta serial, mas uma rede de equipamentos interligados. As plantas seriais podem ser utilizadas tanto em processos contínuos quanto em processos em batelada, sendo que as plantas em rede normalmente envolvem processos do tipo batelada (PINTO, 2000).

Restrições de Recursos

Para a execução das tarefas numa planta de processos são necessários recursos que podem ser limitados ou não. Quando limitados, as tarefas são restritas aos níveis de disponi-

bilidade destes recursos. Uma das dificuldades do problema de escalonamento é alocar com eficiência as tarefas aos recursos, de forma a satisfazer as demandas impostas sem violar as restrições do sistema. Quanto às restrições de recursos, são classificados em problemas de escalonamento sem restrições, com restrições discretas (equipamentos, mão-de-obra) ou com restrições contínuas (volume de fluidos).

Políticas de Estocagem de Produtos

Após a realização de uma determinada tarefa existe a possibilidade de empregar diversas políticas de transferência e estocagem de produtos processados intermediários ou finais (REKLAITIS, 1992):

- *No intermediate storage* (sem estoque intermediário): a estocagem ocorre no interior da própria unidade de processamento;
- *Finite intermediate storage* (estoque intermediário finito): a estocagem é unicamente no interior de um tanque (ou conjunto de tanques) de capacidade limitada, externo à unidade de processamento;
- *Conditional finite intermediate storage* (estoque intermediário finito condicional): é a combinação das duas políticas anteriores;
- *Unlimited intermediate storage* (estoque intermediário ilimitado): a estocagem ocorre em tanque externo à unidade de processamento, sem limitação de capacidade.

Padrão de Demanda

As plantas em geral operam de forma a satisfazer as demandas para um determinado horizonte de tempo. O escalonamento de curto prazo (*short-term scheduling*) é aplicado quando as demandas dos produtos apresentam grandes variações entre um horizonte de tempo de programação e outro. Por outro lado, se a demanda é considerada constante, o escalonamento pode ser realizado para períodos de tempo maiores (*long-term scheduling*) (KONDILI et al., 1993). Quando a demanda repete um padrão previsível nos vários períodos de programação, o escalonamento é chamado cíclico (*cyclic scheduling*) (SHAH et al., 1993).

Transições

Em processos de produção, as unidades ou equipamentos podem requerer operações de limpeza e preparação por questões de segurança e/ou qualidade dos produtos. Desta forma, surge a necessidade de transições que dependem da natureza das unidades e dos produtos envolvidos, impactando diretamente nos tempos e custos das atividades (PINTO, 2000).

2.3 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS DE ESCALONAMENTO

Um modelo é uma representação matemática simplificada de uma realidade, devendo equilibrar a necessidade de contemplar suas principais propriedades com a viabilidade de encontrar soluções adequadas (GOLDBARG; LUNA, 2000). Na elaboração de modelos de escalonamento, as características a seguir devem ser destacadas:

Representação do Tempo

Pinto e Grossmann (1995) apontam a representação do tempo como um dos maiores desafios na formulação de modelos de escalonamento. Basicamente, a representação do tempo pode assumir duas importantes formas:

- Representação discreta do tempo: os intervalos de tempo possuem duração fixa, cuja representação do domínio de tempo é chamada discreta. Para cada intervalo de tempo discretizado, variáveis binárias e contínuas representam, no instante inicial do intervalo, decisões operacionais e indicadores de insumos movimentados, produzidos ou consumidos, além do balanço de massa do processo abordado. As decisões determinadas pelas variáveis binárias dos modelos são válidas em toda a extensão do intervalo de tempo correspondente. A interconexão entre intervalos é garantida através de equações de massa, que normalmente relacionam as variáveis contínuas indicadoras de nível de inventário às fatias de tempo subsequentes. Cada tarefa ocupa um número inteiro de intervalos discretos. A duração do intervalo de tempo discreto é tomada como o máximo divisor comum (MDC) entre os tempos de processamento de cada tarefa. A representação discreta do tempo é a mais comum entre os modelos matemáticos existentes (LEE et al., 1996; JOLY, 1999; MORO, 2000; STEBEL et al., 2002; MAGALHÃES, 2004; MAGATÃO et al., 2004).

- Representação contínua do tempo: nesta representação, o horizonte de planejamento é dividido em intervalos de tempo de duração variável. Normalmente, determina-se o número máximo de eventos que podem ocorrer durante o horizonte considerado, associando-se a cada evento variáveis contínuas e binárias que descrevem o comportamento do sistema

entre os instantes inicial e final. A temporização do processo é representada por variáveis contínuas e deve ser determinada por meio de restrições de temporização. A tendência dos trabalhos atuais aponta para o desenvolvimento de formulações em tempo contínuo, de forma a explorar características particulares de cada problema (PINTO; GROSSMANN, 1995; MOCKUS; REKLAITIS, 1997; IERAPETRITOU; FLOUDAS, 1998; MORO, 2000; MÉNDEZ; CERDÁ, 2002; MAGATÃO, 2005; STEBEL, 2006; CAFARO; CERDÁ, 2008).

A forma de representação do tempo influencia decisivamente no número de variáveis utilizadas. A opção por intervalos fixos leva a um maior número de variáveis. Com representações contínuas de tempo, o número de variáveis pode ser significativamente reduzido, ainda que a formulação do problema se torne mais complexa.

Incerteza nos Parâmetros

Os modelos de escalonamento podem ser caracterizados em estocásticos ou determinísticos, dependendo da inclusão ou não de incertezas nos parâmetros do problema (datas de entrega, taxas de produção/demanda, custos, etc.)(ALLE, 2003).

Modelagem Matemática

A dificuldade de formular um problema é semelhante à de representar adequadamente um sistema do mundo real (GOLDBARG; LUNA, 2000). Na maioria das vezes, o desenvolvimento de um modelo pode envolver uma equipe multidisciplinar que contribui com diferentes perspectivas e conhecimentos da realidade. Um modelo deve equilibrar a necessidade de contemplar todos os detalhes com a viabilidade de associar técnicas de solução adequadas (LINARES et al., 2001).

Portanto, um modelo é uma ferramenta de apoio à tomada de decisões, motivo pelo qual deve fornecer resultados úteis e de fácil interpretação. A modelagem baseia-se normalmente num conjunto de processos estruturados: análise e detecção das relações entre os dados, estabelecimento de hipóteses e aproximações na representação das características do problema, desenvolvimento e uso de algoritmos específicos de solução (GOLDBARG; LUNA, 2000).

O desenvolvimento de modelos matemáticos baseia-se num conjunto de processos cujas etapas são destacadas por Linares et al. (2001):

1. Identificação do problema: consiste em obter e analisar as características do problema, assim como estabelecer uma estrita coordenação entre o modelador e o especialista. Nesta etapa determinam-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 técnica de solução, representação do tempo e estrutura de modelagem;

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. Vale ressaltar que, dependendo da complexidade do problema, a solução pode ser apenas 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 iteração 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. A documentação deve ser clara, precisa e completa para facilitar a tarefa de utilização e manutenção.

As etapas apresentadas por Linares et al. (2001) não são de consenso geral e portanto, outros autores determinam etapas diferentes (GOLDBARG; LUNA, 2000; FRAGNIERE; GONDZIO, 2002). Porém, todos consideram estes pontos como necessários para o desenvolvimento de um modelo.

Métodos de Solução

O problema de escalonamento pode ser considerado como um problema de otimização combinatória, uma vez que visa a utilização ótima de um conjunto de recursos em função de sua disponibilidade, com o objetivo de minimização ou de maximização de critérios que podem

ser econômicos ou operacionais. Existem várias técnicas destinadas a resolver problemas de otimização combinatória, podendo ser destacadas:

- Programação matemática (inteira mista) linear ou não linear;
- Programação lógica por restrições;
- Métodos heurísticos;
- Metaheurística (algoritmos genéticos, *simulated annealing*, busca tabu, etc);
- Métodos híbridos;

Dentre as técnicas citadas, a programação matemática (PM) e a metaheurística estão entre as mais exploradas na solução de problemas de escalonamento, apresentando características complementares quanto aos métodos de solução empregados. Enquanto a programação matemática visa alcançar uma solução ótima, a metaheurística preocupa-se com soluções que satisfaçam critérios de viabilidade e qualidade em tempo computacional aceitável. O principal argumento utilizado pelos adeptos de técnicas metaheurísticas é que, como o modelo matemático é uma representação simples da realidade, a solução ótima obtida pela programação matemática é idealizada e não real. Isto se justifica pelo uso de hipóteses simplificadoras na construção dos modelos, associadas às incertezas dos parâmetros e dos dados de entrada utilizados na resolução dos cenários simulados (ALLE, 2003).

No entanto, os adeptos das técnicas de programação matemática destacam suas principais vantagens em relação às demais linhas de pesquisa (heurísticas e metaheurísticas):

- A capacidade de traduzir o problema sistematicamente em uma série de equações, inequações e variáveis, torna explícita a relação entre os componentes do cenário a ser modelado;
- O grande número de algoritmos de solução disponível para os modelos de programação matemática, assegura nos casos de problemas convexos a convergência para o ótimo global num número finito de iterações;
- É possível obter uma estimativa rigorosa do melhor valor possível para a função objetivo de problemas de programação linear inteira mista (MILP) com relaxação convexa.

As ferramentas de apoio à programação das atividades da produção baseados em programação matemática têm recebido especial atenção nos diversos trabalhos encontrados na literatura (CAFARO; CERDÁ, 2009). A seguir serão apresentadas as principais características das técnicas de programação matemática, necessárias para a implementação e resolução dos modelos abordados no Capítulo 4 e no Capítulo 6.

2.4 PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

Na prática, a programação matemática é fortemente direcionada ao apoio da tomada de decisão no gerenciamento de sistemas de grande porte, especialmente no que diz respeito ao tratamento de variáveis quantificadas. A técnica permite a modelagem de inter-relações entre variáveis que dificilmente seriam visíveis de forma intuitiva (GOLDBARG; LUNA, 2000).

Segundo Nemhauser e Wolsey (1988), modelos que utilizam técnicas de programação matemática lidam com problemas de minimização e maximização de funções com muitas variáveis, sujeitas a restrições de igualdade, desigualdade e limites de algumas ou todas as variáveis envolvidas. Devido à generalidade da representação, uma grande variedade de problemas pode ser formulada por modelos de programação matemática. Com a utilização dos meios de processamento automático, os chamados *solvers* de programação matemática podem examinar inúmeras configurações viáveis do problema proposto e selecionar, através de certos critérios, as melhores alternativas.

Do ponto de vista da programação matemática, o problema de escalonamento (*scheduling*) pode ser visto como um problema de otimização combinatória sujeito a restrições, em que se procura uma maneira eficiente de alocar recursos limitados, sequenciar e temporizar tarefas. Possuem normalmente variáveis contínuas e discretas e sua representação na forma algébrica possui a seguinte forma (GROSSMANN et al., 2001):

$$\begin{aligned} \text{minimizar} \quad & f(x,y) \\ \text{sujeito a:} \quad & h(x,y) = 0 \\ & g(x,y) \leq 0 \\ & x \in \mathbb{R}^n,\ y \in \mathbb{Z}^r \end{aligned} \tag{1}$$

onde x é um vetor de n variáveis contínuas definidas em $\mathbb{R}$, y é um vetor de r variáveis discretas definidas em $\mathbb{Z}$, $h(x,y)$ representa as funções das restrições de igualdade, $g(x,y)$ representa as funções das restrições de desigualdade e $f(x,y)$ é a função objetivo.

A formulação algébrica acima é um problema de programação matemática inteira mista (*Mixed Integer Programming* - MIP), em que se deve escolher um conjunto de valores para as variáveis de decisão (discretas) e de estado (contínuas), que minimizem uma função objetivo. As variáveis de decisão geralmente são binárias, isto é, só podem assumir valores zero ou um. Se o conjunto de variáveis inteiras é vazio e existe alguma não-linearidade na função objetivo e/ou em uma ou mais restrições, tem-se um problema de programação não-linear (*Non-Linear Programming* - NLP). Se o conjunto de variáveis inteiras é não-vazio e as restrições e a função objetivo são lineares, tem-se um problema de programação linear inteira mista (*Mixed Integer Linear Programming* - MILP). Se o conjunto de variáveis inteiras é não-vazio e existe

alguma não-linearidade em uma ou mais restrições ou na função objetivo, tem-se um problema de programação não-linear inteira mista (*Mixed Integer NonLinear Programming* - MINLP). Deve ser mencionado que a Equação 1 inclui ainda os casos de problemas de programação inteira linear (*Integer Linear Programming* - ILP) e de problemas de programação inteira não linear (*Integer NonLinear Programming* - INLP), os quais são constituídos exclusivamente de variáveis inteiras (NEMHAUSER; WOLSEY, 1988). Devido ao caráter combinatório destes problemas, os algoritmos para resolver modelos MILP utilizam técnicas cujo objetivo é avaliar o menor número possível de combinações na busca por uma solução ótima. Segundo Grossmann et al. (1992), existem diferentes métodos utilizados na resolução de modelos MILP:

- Planos de corte (*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 de decomposição (*Decomposition methods*): o mais comum é o método de decomposição de Benders. Neste método, o problema original é decomposto em duas partes: um problema com variáveis inteiras (problema mestre) e um problema linear (subproblema). O problema mestre é uma versão do problema original com variáveis inteiras e com as restrições associadas relaxadas. O subproblema é o problema original com os valores das variáveis inteiras fixadas. Em cada iteração, uma nova restrição, conhecida como corte de Benders, é adicionada ao problema mestre. Quando a mesma solução é encontrada para o problema mestre e o subproblema, tem-se a solução para o problema original (BENDERS, 1962);

- Métodos baseados em lógica (*Logic-based methods*): métodos nos quais restrições disjuntivas ou técnicas de inferência são empregadas, sendo expressas por meio de variáveis boolenas (WILLIAMS, 1999);

- Métodos de ramificação e limite (*Branch and Bound methods*): é a abordagem mais comum para resolução de problemas MILP, originalmente proposto por Land e Doig (1960). O método *Branch and Bound* original recebeu diversas modificações amplamente empregadas em *solvers* comerciais e destinadas à solução de problemas de programação linear inteira mista, como o ILOG OPL *Studio* 3.6.1 - CPLEX MIP 8.1 (ILOG, 2002b), utilizado neste trabalho.

Uma das dificuldades envolvidas na aplicação das técnicas de programação linear inteira mista está na formulação dos problemas, que não é trivial, e o modo como os modelos são construídos pode ter grande impacto na viabilidade de se obter soluções factíveis. De fato, do ponto de vista computacional, os modelos MILP permanecem sendo um grande desafio, pois

são classificados como pertencentes à classe *NP-hard* (*Nondeterministic Polynomial-time hard*) (GAREY; JOHNSON, 1979).

Construídas sobre a base da programação linear (LP), as técnicas de modelagem MILP originam-se da interação entre metodologias de busca e relaxação linear (MAGATÃO, 2005). Tradicionalmente, a eficácia dos métodos MILP dependem basicamente do tamanho dos subproblemas LP originados da relaxação e da diferença de integralidade (*integrality gap*). Este parâmetro indica a diferença entre o valor da função objetivo para a solução inteira e seu valor para a solução do problema relaxado [2]. Quanto menor a diferença de integralidade, mais rápida tende a ser a solução de um modelo MILP (WOLSEY, 1998).

Um recurso bastante explorado na construção de modelos MILP refere-se à expressão de estruturas lógicas. Por meio de restrições lineares, pode-se representar algumas condições lógicas entre variáveis binárias, (operações *OR*, *AND*, *NOT*) (SCHRAGE, 2000). Em situações onde se deseja selecionar uma dada restrição ou ainda modelar disjunções em termos lineares, a formulação BIG-M é muito utilizada. Estas representações contribuem para a formalização e construção dos problemas de otimização, entretanto, a falta de estruturas de alto nível que representem disjunções e relações combinatórias entre restrições, faz do processo de modelagem em MILP uma tarefa trabalhosa e suscetível a erros. Semelhante a formulação BIG-M, Magatão (2005) propõe em seu trabalho um processo de desenvolvimento de modelos baseado num conjunto de estruturas de alto nível para especificação de problemas MILP. Estas estruturas permitem a modelagem de expressões do tipo **SE-ENTÃO** e **SE-ENTÃO-SENÃO** de modo intuitivo, facilitando em muito o processo de construção dos modelos matemáticos.

A principal vantagem associada ao emprego de estruturas de alto nível está na sua relação direta com outras técnicas de programação matemática, tal como a programação lógica por restrições (CLP - *Constraint Logic Programming*). As técnicas de CLP surgiram numa tentativa de superar as limitações da Programação Lógica Matemática, paradigma de programação declarativa com origem nos anos 70. A programação lógica por restrições pode ser vista como uma extensão de um sistema de programação lógica, no qual se introduzem estruturas de dados mais ricas e complexas, permitindo que objetos semânticos e expressões aritméticas sejam codificados e manipulados diretamente. A idéia básica consiste em complementar o núcleo computacional do sistema lógico com um manipulador de restrições. Por se basear em restrições, a programação lógica por restrições sofreu influência de um paradigma mais antigo denominado Problema de Satisfação de Restrições (CSP - *Constraint Satisfaction Problem*). Este paradigma deu origem a uma nova corrente em CLP, baseada em técnicas de satisfação de restrições. A satisfação de restrições atua com problemas definidos sobre domínios de valores discretos, do

[2] A expressão $di = \left|\frac{zr-zo}{zo}\right| \cdot 100\%$ define a diferença de integralidade para um problema de maximização, onde zr é o valor da função objetivo para a solução relaxada e zo seu valor para a solução inteira.

qual fazem parte os domínios finitos. A resolução de problemas em CSP faz uso de técnicas de verificação de consistência e propagação de restições associadas a algoritmos de busca com retrocesso (*backtracking*). Os algoritmos de *backtracking* operam de forma incremental, atribuindo um valor do domínio para uma variável ainda não instanciada e verificando a viabilidade de cada solução parcial de acordo com as restrições envolvidas. Como estratégia de busca, o algoritmo de *backtracking* básico ainda é bastante falho, principalmente considerando que a violações de restrições é verificada muito tardiamente. Mecanismos de propagação de restrições, conhecidos por técnicas de consistência local, são associados ao algoritmo de *backtracking* para contornar este problema. As técnicas de propagação de restrições são baseadas em um grafo de restrições, onde os vértices (nós) representam as variáveis e as arestas (arcos) representam as restrições do problema. A partir deste grafo, a verificação de consistência pode ser feita através dos algoritmos nó-consistência, arco-consistência e caminho-consistência (TSANG, 1996).

Muitas vezes, formulações em CLP são caracterizadas por possuírem mais de uma solução, permitindo quantificá-las através de uma função objetivo de minimização ou maximização. Em otimização com CLP, a principal técnica empregada é o *Branch and Bound*, avaliando e descartando soluções parciais com valores acima de um determinado limite (*bound*). Modelos descritos através de estruturas de alto nível em MILP pode ser traduzido para declarações lógicas em CLP, possibilitando a aplicação de métodos híbridos que integrem as boas características de busca das duas abordagens. Em seu trabalho, Stebel (2006) faz um comparativo entre as abordagens MILP x CLP, ressaltando as principais vantagens e limitações dos métodos originais e combinados de forma híbrida.

Diversas ferramentas comerciais (*solvers*) foram desenvolvidas para a modelagem em programação matemática, onde linguagens declarativas têm se destacado, tais como GAMS (GAMS, 2009), LINGO (LINDO, 2002), OPL (ILOG, 2002a), XPRESS (XPRESS-MP, 2009) e MPL (MAXIMAL, 2009). Apesar da característica restritiva destes pacotes quanto à interferência do usuário nos procedimentos de busca e escolha dos algoritmos, o aperfeiçoamento dos *solvers* têm contribuído para a solução de problemas práticos, demonstrando importantes resultados (MAGATÃO, 2005). Exemplos de modelos MILP e CLP utilizados em problemas complexos de escalonamento são dados por Pekny e Reklaitis (1998), Shah (1998), Pinto e Grossmann (1998), Magalhães (2004), Magatão (2005), Stebel (2006), Relvas et al. (2007), Rejowski e Pinto (2008) e Cafaro e Cerdá (2009).

2.5 MODELOS DE ESCALONAMENTO

Trabalhos encontrados na literatura sobre escalonamento na indústria petrolífera tratam em sua maioria das operações em refinarias de petróleo e operações de distribuição de derivados. Abordagens relacionadas a sistemas dutoviários são escassas e os modelos matemáticos genéricos não podem ser direta e eficientemente utilizados em função da topologia complexa que estas redes apresentam. As formulações discutidas a seguir mostram os aspectos gerais relacionados ao tema, evidenciando particularidades dos modelos de escalonamento aplicados aos problemas da indústria petrolífera.

2.5.1 Escalonamento das Operações de Produção

A importância da modelagem matemática na abordagem de problemas de otimização e programação da produção em refinarias de petróleo fica evidente devido à complexidade das atividades relacionadas. Estas se tornaram um vasto campo para a criação e aplicação de modelos matemáticos visando melhorias no planejamento operacional. Como exemplo, a otimização de operações de transferência e estocagem numa refinaria de petróleo 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 de um tanque a outro (MORO, 2000). A principal função destes modelos é fazer com que o sistema dado torne-se o mais eficiente possível em termos econômicos e como consequência, um novo ponto operacional possa ser encontrado.

Em Lee et al. (1996) destaca-se o estudo do problema de gerenciamento de inventários em uma refinaria que importa vários tipos de petróleos entregues por diferentes navios. Para resolver o problema foi desenvolvido um modelo MILP com discretização do tempo. As equações que representam as operações de mistura utilizam as vazões individuais de cada produto componente, mantendo a linearidade do modelo.

Em Magalhães et al. (1998) é apresentado o desenvolvimento de um sistema computacional para o escalonamento da produção de uma unidade de refino de petróleo da PETROBRAS. As informações deste sistema estão baseadas no planejamento local da refinaria, abrangendo desde a etapa de recebimento até a fase de expedição de produtos. Para a determinação do escalonamento operacional da planta, foi adotada uma estratégia de divisão da refinaria em áreas específicas, cujos problemas foram modelados de forma independente e posteriormente integrados. Os modelos utilizam técnicas MILP com discretização de tempo variável em função da área considerada.

Joly (1999) criou modelos para a produção de óleo combustível e asfalto em refinarias de petróleo. A formulação gera um acompanhamento ótimo da produção sob perfis de demanda e restrições operacionais, com o objetivo de minimizar os custos envolvidos. Os modelos tratam de forma genérica o problema de produção e distribuição de produtos e, de forma específica, a produção de óleos combustíveis. Foram propostas e comparadas duas formulações MILP e MINLP com discretização uniforme do tempo quanto ao desempenho computacional e à qualidade das soluções.

Moro (2000) estuda os problemas de planejamento e programação da produção em refinarias de petróleo. No problema de planejamento, modelos simplificados das principais unidades presentes numa refinaria são propostos, servindo como base para a formulação do problema de escalonamento. Neste trabalho, formulações MINLP e MILP (através de linearizações) em domínio de tempo discreto e contínuo foram desenvolvidas e tiveram seus resultados comparados.

No trabalho de Stebel (2001) são desenvolvidos dois modelos para o escalonamento das operações de transferência e estocagem do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) numa refinaria da PETROBRAS. O primeiro modelo é baseado em Redes de Petri (MURATA, 1989) e permite ao operador visualizar o comportamento de um processo de estocagem e distribuição de GLP. O segundo modelo utiliza técnicas MILP com discretização uniforme do tempo, tendo como objetivo a minimização dos custos operacionais.

Em Göthe-Lundgren et al. (2002), os problemas de planejamento e escalonamento de operações são tratados através de técnicas MILP, tendo como objetivo a minimização dos custos de troca de carga (troca de campanha) de uma refinaria. Neste mesmo trabalho, uma segunda abordagem é proposta utilizando a metaheurística busca tabu (*tabu search heuristic*), sem garantia de soluções ótimas, mas com tempos computacionais adequados.

Jia e Ierapetritou (2004) desenvolvem um modelo MILP com representação em tempo contínuo para o escalonamento de operações em refinarias de petróleo. A abordagem consiste em decompor o problema em três domínios: recebimento e mistura do óleo cru, operações de produção e entrega dos produtos finais.

Em Felizari (2004) foi proposta uma metodologia que utiliza técnicas de programação matemática juntamente com a teoria de otimização *fuzzy* aplicada ao estudo de problemas da produção existentes numa refinaria de petróleo. Foram desenvolvidos modelos em programação linear (LP) e programação linear inteira mista (MILP), considerando aspectos de compartilhamento de recursos e incertezas nos parâmetros de entrada. A proposta é avaliada através de cenários típicos envolvendo a mistura de produtos e o escalonamento de operações de transferência e estocagem.

Magalhães (2004) aborda o problema de escalonamento das operações de recebimento de petróleo. O cenário considerado é composto por um terminal portuário, um oleoduto, uma área de estocagem de petróleo e uma unidade de processamento. Os modelos construídos utilizam técnicas MINLP com representação discreta e contínua do tempo.

Stebel (2006) trata do problema de escalonamento da transferência e estocagem em refinarias. Inicialmente é proposto um modelo MILP com tempo contínuo, representando os possíveis estados dos tanques durante o horizonte de programação. Questões como custo elétrico das operações de bombeio e custos qualitativos das operações envolvidas são consideradas na função objetivo do modelo matemático. Para redução do tempo computacional, é proposta ainda uma estrutura híbrida que combina técnicas MILP e programação lógica por restrições (CLP), aliada a heurísticas que atuam na geração da árvore de busca.

2.5.2 Distribuição e Transporte Dutoviário

O gerenciamento da distribuição de produtos é composto por diversos problemas de tomada de decisão envolvendo níveis estratégicos, táticos e operacionais. Devido à magnitude e complexidade de um sistema petrolífero, torna-se inviável a elaboração de um modelo matemático para a cadeia logística completa em termos de detalhamento operacional (NEIRO; PINTO, 2004). Neste nível, as decisões se concentram na utilização e compartilhamento dos recursos disponíveis, tais como rede de dutos e terminais de estocagem. Apesar da complexidade envolvida na realização de tais tarefas, muito do gerenciamento ainda é baseado em conhecimentos heurísticos. Desta maneira, vários trabalhos tentam explorar métodos sistemáticos que gerenciem de forma eficiente o processo de tomada de decisão das operações de distribuição e transporte de derivados de petróleo.

Dentre estes trabalhos, Camponogara (1995) trata do problema de transporte de derivados de petróleo em uma malha de dutos da PETROBRAS. Foram propostas duas técnicas de resolução distintas, uma exata e outra heurística. A primeira, compreende uma formulação em MILP, desenvolvida em função de um modelo de Fluxo em Redes Multiperíodos, cujos dutos da rede foram subdivididos em segmentos e identificados por vértices em função de seus volumes. O tamanho do grafo gerado em função da rede (7 áreas operacionais e 7 segmentos de dutos) impossibilitou a solução do modelo em tempo computacional adequado para os objetivos e recursos disponíveis. A segunda técnica proposta desenvolveu uma abordagem de decomposição do problema em três módulos: geração das operações de transporte (*jobs*), escolha de rotas e programação das operações (escalonamento). Estes componentes foram integrados através de uma técnica de Time Assíncrono (*A-Team*), a qual é uma heurística que utiliza agentes autônomos de *software* que tratam partes distintas do problema. Apesar de considerar simplificações como vazões fixas por duto, não considerar restrições de troca de turno ou manutenções progra-

madas, a abordagem não foi capaz de gerar soluções viáveis para as instâncias apresentadas.

Shah (1996) se dedicou ao problema de gerenciamento de estoques de petróleo, tratando de um sistema composto por um porto, um oleoduto e uma refinaria. Foram desenvolvidos dois modelos distintos envolvendo o transporte de óleo cru, para o horizonte de tempo de um mês. O primeiro determina como a refinaria deve ser operada e alimentada pelo oleoduto, gerenciando a alocação dos tanques. O segundo modelo determina como os tanques do porto alimentam o oleoduto e como os navios devem ser descarregados.

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 MILP em tempo discreto considera o processo de transição entre dois produtos num mesmo duto (interface de produtos), minimizando os custos operacionais relacionados ao tratamento de misturas indesejadas.

Em Magatão (2001) e Magatão et al. (2004) são apresentados modelos que abordam a programação do transporte dutoviário de derivados de petróleo. O objetivo principal é o desenvolvimento de modelos de auxílio ao gerenciamento das operações de um poliduto, isto é, um duto único que transporta diferentes derivados de petróleo. O poliduto em estudo conecta uma refinaria a um terminal portuário. Os modelos de otimização foram elaborados através de MILP, com discretização uniforme dos intervalos de tempo. Destaca-se a utilização de estratégias de subdivisão do problema para reduzir o esforço computacional. Os modelos propostos foram capazes de gerar novos pontos de operação para o sistema de bombeio, proporcionando ganhos operacionais significativos. Visando melhorias na abordagem proposta anteriormente, Magatão (2005) e Magatão et al. (2008) formulam o mesmo problema através de técnicas MILP e programação lógica por restrições (CLP), utilizando estruturas de alto nível e representação contínua do tempo. No tratamento de cenários complexos, a abordagem híbrida proporcionou ganhos computacionais em relação às técnicas MILP e CLP utilizadas separadamente.

Más (2001) aborda o problema da programação de suprimento de petróleo contendo portos, refinarias e uma estrutura de oleodutos. Os portos contêm píeres, um parque de tancagem e uma rede de oleodutos. As refinarias possuem infra-estrutura própria de armazenagem, enquanto unidades de destilação de óleo cru consomem petróleo a uma vazão conhecida. O problema é formulado por meio de um modelo MILP de tempo contínuo com base em eventos. Devido à dificuldade de solução do problema de forma conjunta, é proposto um primeiro modelo MILP que considera uma representação agregada dos oleodutos e da tancagem intermediária. Variáveis de decisão envolvem a alocação de petroleiros a píeres assim como operações de descarga de petroleiros e transporte de produtos nos oleodutos. A solução deste problema

gera informações para um segundo modelo MILP que representa os oleodutos e elementos de tancagem intermediária de forma detalhada.

Os trabalhos de Rejowski (2001) e Rejowski e Pinto (2003) consideram um sistema composto por uma refinaria de petróleo, um poliduto e diversas bases de distribuição com localizações geográficas distintas conectadas a mercados consumidores. Vários derivados de petróleo são transportados através do poliduto (gasolina, óleo diesel, GLP e querosene de aviação). Os modelos MILP consideram condições de balanço de massa, restrições de demanda e distribuição dos produtos a serem armazenados e transportados ao longo da rede de dutos. Os modelos são baseados na representação uniforme de intervalos de tempo e na discretização dos volumes dos dutos envolvidos, sendo utilizadas formulações BIG-M e relações lógicas na construção das várias restrições do problema. Com o objetivo de melhorar a representatividade dos modelos anteriores, Rejowski e Pinto (2008) propuseram um modelo em MINLP com representação contínua do tempo e considerações fluído-dinâmicas que modelam as perdas hidráulicas que os produtos sofrem ao serem movimentados através do duto. Apesar da dificuldade computacional provocada pela não-linearidade das restrições de vazão, o modelo MINLP apresentou soluções viáveis de programação quando comparado aos modelos anteriores mais simplificados que poderiam gerar programações subótimas e até mesmo inviáveis para o sistema.

Em Pessoa (2003a), o problema de transporte em redes de dutos é definido como uma busca em grafo orientado. Cada arco do grafo é associado a um duto contendo posições relativas às bateladas da programação, que podem ser proteláveis (sem necessidade de entrega) e não-proteláveis (que precisam ser transportadas). Cada batelada possui um nó de destino e uma posição inicial (que pode ser um nó ou uma posição de um duto da rede). O número de bateladas contidas em cada duto é sempre constante, sendo que as bateladas proteláveis auxiliam a entrega das outras bateladas. O objetivo do problema é encontrar uma sequência de operações que transporte todas as bateladas não-proteláveis aos seus respectivos nós de destino. O modelo é testado para instâncias teóricas em que as bateladas possuem volume unitário e a capacidade dos nós da rede é ilimitada. Apesar do modelo ser uma simplificação das operações realizadas nas redes de oleodutos da PETROBRAS, o trabalho explorou diversas características essenciais do problema e suas consequências na modelagem abordada.

Neiro e Pinto (2004) desenvolveram uma estrutura geral para a modelagem de uma cadeia de suprimentos petrolífera. O cenário é composto por um conjunto de elementos envolvidos no processo de suprimento, transformação e distribuição, tais como refinarias, terminais e redes de polidutos. O modelo completo corresponde a um modelo MINLP em tempo discreto, envolvendo unidades de processo, tanques de petróleo e derivados das refinarias e terminais e malhas dutoviárias. Foram aplicadas técnicas de decomposição baseadas em relaxação Lagrangeana, apresentando resultados com desempenho computacional superior sem perda de qualidade das

soluções encontradas.

Cafaro e Cerdá (2004) apresentam uma modelagem MILP com representação contínua do tempo para o problema de escalonamento de um poliduto. O sistema completo é composto por uma refinaria de petróleo, um poliduto e cinco bases de distribuição conectadas a mercados consumidores. O modelo gerencia os níveis de inventário da refinaria e os parques de tancagem em cada área de destino. As operações de envio e recebimento de produtos ao longo do poliduto consideram situações de injeção e retirada de derivados, função do perfil de demanda das bases de distribuição. O trabalho traz ainda um estudo comparativo utilizando o cenário proposto por Rejowski e Pinto (2003). O modelo com abordagem contínua do tempo apresentou uma grande redução de carga computacional e diminuição dos custos operacionais. Em outro trabalho, Cafaro e Cerdá (2008) abordam o mesmo problema considerando uma utilização melhorada dos recursos de estocagem. O grande diferencial reside na escolha de tamanhos de bateladas que ocupem a capacidade total do tanque alocado, permitindo conhecer *a priori* os volumes a serem transportados pelo poliduto, reduzindo a carga computacional do modelo matemático. Em Cafaro e Cerdá (2009), o problema é reformulado considerando-se várias áreas de origem (refinarias) ao longo da linha, sendo que a formulação trata aspectos de injeção de produtos e mudança de ordem no recebimento das bateladas em cada terminal de recebimento.

Relvas et al. (2006) abordaram um problema de transporte de derivados de petróleo em um sistema composto por uma refinaria e um centro de distribuição interligados através de um poliduto. O modelo apresenta uma abordagem MILP, 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 escalonamento 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 mais recente, Relvas et al. (2007) incluíram melhorias que dizem respeito às variáveis de vazão de bombeio, paradas do duto e variáveis de ajuste do volume de cada batelada. Além disso, um novo procedimento de escalonamento reativo (*rescheduling*) foi desenvolvido. Cada perturbação ocorrida no sistema provoca a ativação/desativação da formulação matemática relacionada à esta ocorrência (variações de demanda, imposição de novas sequências de bombeio, paradas do duto, ajustes de vazão, variação da capacidade de tancagem disponível, etc). Neste caso, os eventos passados são considerados em uma nova situação de inicialização do duto e, eventos futuros (ou agendados), sofrem efetivamente a reprogramação. Cenários com horizonte de até 1 mês e mais de uma perturbação são resolvidos em tempo adequado, considerando-se a rotina dos especialistas em situações reais de programação do poliduto.

Como resultado parcial do trabalho desenvolvido nesta tese, Neves-Jr et al. (2007a) descrevem a arquitetura de solução e as principais estruturas do modelo matemático de temporização para uma rede de dutos. Neste trabalho, é abordada a metodologia de subdivisão do problema de escalonamento da rede de dutos em estudo, característica principal que permite a obtenção de soluções viáveis de programação em tempo computacional reduzido. Uma evolução desta formulação pode ser vista em Boschetto et al. (2008) onde um módulo de simulação foi desenvolvido para uma melhor representação do chaveamento da rede, mudança de vazões e detecção de paradas. Recentemente, uma nova abordagem do módulo de sequenciamento de bateladas é descrita em Felizari et al. (2009) utilizando-se técnicas de CLP. O objetivo é considerar a influência da rede na propagação das bateladas, minimizando os atrasos nas operações de bombeio e recebimento de produtos.

Escopo semelhante ao apresentado neste trabalho foi proposto por Moura et al. (2008), utilizando uma abordagem híbrida para o tratamento do transporte e distribuição de derivados de petróleo e bio-combustíveis em uma rede de dutos da PETROBRAS. Para tratar este problema, duas fases de resolução foram implementadas. Primeiramente, uma fase de planejamento define os volumes de produto que devem ser transferidos entre as áreas operacionais para que as demandas sejam completamente atendidas. Em seguida, uma fase de escalonamento é responsável por criar e escalonar as operações de bombeio, de forma a garantir que os volumes definidos na fase anterior sejam enviados. Durante o processo de modelagem foram utilizadas técnicas de Programação por Restrições (CP - *Constraint Programming*), mais especificamente métodos de satisfação de restrições (*Constraint Satisfaction*) que tentam encontrar soluções válidas dentro de domínios bem definidos. A estratégia foi implementada e testada para 5 instâncias reais fornecidas pela PETROBRAS, compostas por 30 dutos, 14 áreas de distribuição, mais de 30 produtos e aproximadamente 200 tanques. O gerenciamento de inventários tratou cada tanque individualmente, diferentemente da abordagem deste trabalho que considera a tancagem de forma agregada. O tempo de execução para um horizonte de 10 dias foi de aproximadamente 8 minutos, sem considerações de tempo de certificação dos tanques, restrições de limites de tancagem, períodos de troca de turno e horossazonalidade. Maiores detalhes dos modelos desenvolvidos podem ser encontrados em Ciré (2008).

2.6 CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou um resumo das principais características dos problemas de escalonamento existentes na indústria petrolífera, bem como as técnicas de modelagem matemática utilizadas.

A maior parte dos trabalhos citados têm escolhido uma metodologia baseada em programação linear inteira mista (MILP) para tratar estes problemas, embora técnicas híbridas que aplicam estruturas MILP e CLP (*Constraint Logic Programming*) estejam sendo utilizadas com sucesso na resolução de problemas reais de escalonamento (MAGATÃO, 2005; STEBEL, 2006). Dentro da modelagem de problemas de programação da produção através de técnicas MILP, uma das questões fundamentais está relacionada com a representação da variável tempo. De acordo com a literatura, as representações possíveis são a discreta e a contínua. A representação contínua do tempo gera um número menor de variáveis de decisão (binárias), porém, tende a gerar formulações com diferença de integralidade maior em relação à representação discreta do tempo (PINTO, 2000).

Outra abordagem muito comum para a resolução de problemas combinatórios de grande porte é baseada no emprego de estratégias de decomposição. O procedimento consiste em realizar a divisão do problema em entidades menores e que sejam computacionalmente tratáveis, mesmo que esta estrutura evidencie a obtenção de soluções subótimas (MAGATÃO, 2001). Os trabalhos de Subrahmanyam et al. (1995) e Wu e Ierapetritou (2003) apresentam uma série de estratégias de decomposição, sem as quais as formulações para o problema de escalonamento de curto-prazo seriam intratáveis.

O estudo de problemas sobre transferência e estocagem ainda são escassos se comparados com outros problemas de otimização, e mais escassos ainda os relacionados à modelagem da distribuição de produtos através de rede de dutos. Os últimos anos, entretanto, atestam um aumento na literatura do gênero, fruto da importância que a eficiência no transporte de petróleo e derivados a longas distâncias e baixos custos tem recebido (SOUZA-FILHO et al., 2006). Nos próximos capítulos, é desenvolvida e investigada uma estrutura de otimização que auxilie a tarefa de escalonamento das atividades de transporte de derivados de petróleo em uma rede de dutos, setor da cadeia produtiva da indústria petrolífera com grande potencial para a aplicação de técnicas de otimização.

3 O PROBLEMA DA PROGRAMAÇÃO DE REDES DE DUTOS

Este capítulo descreve o problema da programação das operações de transporte de derivados de petróleo em uma rede de dutos, suas particularidades e principais desafios que motivaram o desenvolvimento deste trabalho. Trata-se de uma compilação inédita das informações extraídas de uma série de reuniões com especialistas sobre a operação da rede. Estas reuniões foram organizadas na forma de entrevistas ou através de discussão de procedimentos específicos. O material obtido foi posteriormente analisado, organizado e sistematizado para que pudesse orientar o processo de desenvolvimento do modelo. Com base no conhecimento heurístico dos especialistas envolvidos, serão apresentados os critérios que norteiam as atividades dos programadores que gerenciam diariamente a movimentação de produtos em complexos dutoviários. De maneira particular, serão detalhadas as principais restrições que regem a rede de dutos responsável pelo transporte de produtos claros, foco principal deste estudo. Pretende-se ainda descrever a estrutura de solução do problema, referenciando os módulos construtivos da abordagem proposta e as principais nomenclaturas a serem utilizadas nos capítulos seguintes.

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este trabalho está parcialmente baseado no sistema de distribuição de derivados da PETROBRAS, cuja programação e operação de toda a malha de dutos é complexa, demandando particular atenção dos especialistas envolvidos. Basicamente, esta malha é composta por duas redes principais: a rede de escuros e a rede de claros, que estão relacionadas aos tipos de produtos que nelas trafegam.

Em linhas gerais, a rede de escuros opera o transporte de diversos tipos de petróleo e derivados pesados e a rede de claros opera o transporte de diversos tipos de derivados leves, de alto valor agregado. A programação das operações envolvidas nestas duas redes é realizada de forma independente, visto que não há uma interdependência operacional significativa entre as malhas. Contudo, mesmo considerando as redes de claros e escuros de forma independente, ainda assim a programação das operações continua sendo uma tarefa complexa. 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, movimentações e deslocamentos desnecessários de produtos.

Dentro deste contexto, verifica-se uma grande dificuldade de conduzir a programação das atividades na malha dutoviária sob análise, em parte devido ao número de variáveis envolvidas na obtenção desta programação. Desenvolver uma solução que contemple todas as variáveis, determinando uma boa política de operação da malha dutoviária, não é uma tarefa trivial, mesmo para especialistas experientes. Atualmente a programação das atividades é realizada por especialistas com base na sua experiência e através da utilização de cálculos manuais.

Desta forma, a necessidade de uma ferramenta que possa auxiliar o procedimento de tomada de decisão operacional é evidente. O programador precisa ter à mão, indicadores confiáveis na hora de tomar decisões que podem influenciar diretamente, por exemplo, na política de tancagem e produção de uma refinaria ou na política de carga/descarga de navios atracados. Neste trabalho, é desenvolvido um modelo de otimização para auxiliar as decisões de programação das atividades de curto-prazo (escalonamento de curto-prazo) na rede de dutos descrita acima.

3.2 CONHECIMENTO ESPECIALISTA

Um dos fatores críticos para o desenvolvimento deste trabalho é o entendimento do problema a ser resolvido, evidenciando particularidades do cenário em estudo. Para tanto, um fator primordial é a consulta a profissionais experientes (especialistas) que são responsáveis pela programação da malha dutoviária em análise. O conhecimento do processo heurístico utilizado para a construção manual da programação do transporte de petróleo e derivados é passo essencial para que uma abstração coerente do problema possa ser criada.

Dentro deste escopo, as diretrizes do problema da rede de claros/escuros, incluindo algumas noções básicas da heurística utilizada pelos programadores para a construção manual da programação diária, devem ser discutidas. Algumas questões gerais de entendimento da malha dutoviária e procedimentos operacionais pertinentes serão apresentados na sequência.

Sistema de Planejamento

A programação diária das atividades da malha dutoviária é norteada pelo cumprimento de demandas mensais (ou bimensais) de fornecimento, definidas por um sistema de planejamento. Baseado em modelos de programação linear (LP), o sistema de planejamento verifica informações referentes a movimentações globais de produtos a serem enviadas entre áreas, estoques iniciais, produção, consumo, mercado local, entradas e saídas de produtos entre sub-redes da malha de dutos. Basicamente, os resultados desse balanço geram montantes mensais (ou bimensais) de oferta e demanda, compondo parte do sistema logístico de abastecimento. As

cotas mensais são então divididas em volumes menores (bateladas) que devem ser bombeados ao longo do horizonte de programação, tipicamente de alguns dias.

Horizonte de Programação

Os horizontes de programação utilizados variam de acordo com a rede a ser tratada. Tipicamente, o horizonte de trabalho adotado pelos programadores para a rede de claros é de 7 dias e, para a rede de escuros, 15 dias aproximadamente. Desta forma, o especialista deve conhecer o estado atual da rede (bateladas inicialmente presentes nos dutos) e, baseado em orientações do sistema de planejamento e no conhecimento de uma série de particularidades da programação, definir a movimentação de produtos na 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 previamente estabelecida, por mudanças de horários, tamanho de cotas, produção, nível de qualidade dos produtos, chegada e saída de navios, indisponibilidade de equipamentos, manutenção e solicitação de clientes. Dentro do escopo das programações da rede de dutos, o intervalo temporal tipicamente utilizado é de 1 hora. Ou seja, os programadores podem verificar a ocorrência de eventos no sistema de hora em hora.

Rotina Operacional

Considerando-se um cenário típico das redes de claros/escuros, a rotina diária de programação envolve algumas atividades base:

- Verificação das cotas até então entregues (via banco de dados de estoques, movimentações e certificação de qualidade dos produtos), comparando-se com a quantidade especificada pelo sistema de planejamento;
- Confirmação de demandas, onde o atendimento dos contratos com clientes torna-se o principal objetivo;
- Ajuste nos horários das movimentações previamente programadas;
- Ajuste nos volumes das bateladas previamente programadas.

É importante salientar que esta rotina operacional é baseada em procedimentos de reprogramação, ou seja, ajustes em uma programação previamente concebida. Basicamente, a reprogramação ocorre devido a dois fatores principais:

- O volume da batelada efetivamente transportada foi diferente do planejado;

- Imprevistos operacionais (ex.: quebra de bombas, mudanças no agendamento da chegada e saída de navios, horários de início de operação, falta de análises, falha de comunicação, problema de qualidade dos produtos, variações de demanda e produção).

Critérios Gerais de Programação

Além do acompanhamento diário das atividades programadas, vários critérios na formação de movimentações devem ser considerados durante a criação de uma nova programação, sempre observando as áreas de produção e origem de produtos (refinarias, portos) e as áreas de destino e consumo (centros de distribuição). Considerando um mesmo produto, podem existir várias áreas que o disponibilizem e outras áreas que demandem um consumo pré-estabelecido.

No início de uma nova programação, a escolha da área de origem que irá atender um determinado destino deve seguir algumas prioridades. O primeiro critério é o estoque inicial atrelado ao nível de produção das refinarias. Se os tanques estiverem com um nível alto de inventário, a refinaria tem prioridade máxima de envio, desde que a redução de produção por falta de espaço de armazenamento constitua uma penalização de operação. Existe maior dificuldade em gerenciar um excesso de oferta do que um excesso de demanda. Um excesso de demanda pode ser regulado através da chegada de navios ou realocação da produção de outras regiões. Já o excesso de oferta gera problemas de falta de tancagem e consequente redução da produção ou degradação de um produto mais nobre em um menos nobre. Ambas as práticas são mal vistas pelas refinarias e geram prejuízos financeiros para a companhia. O segundo critério diz respeito à velocidade da operação de deslocamento de produtos. Quando a distância entre a origem e o destino é menor, a operação tende a usar um número reduzido de trechos de dutos, tornando a movimentação de produtos mais rápida. Esta prática é preferida, contudo, pode ser ignorada se a programação das bateladas se mostrar eficiente e atender os prazos de entrega determinados. Um terceiro critério é na verdade uma imposição que ocorre algumas vezes durante o horizonte de trabalho. Quando é informado que uma dada refinaria não conseguirá entregar os produtos com a especificação desejada dentro do tempo previsto, deve-se escolher outra origem de fornecimento. Este problema é provocado muitas vezes pela troca do elenco de petróleo na refinaria, situação que pode gerar grandes variações na produção de derivados.

Do mesmo modo, a escolha que prioriza o atendimento de uma determinada área de destino orienta a formação das bateladas a serem movimentadas. O que determina a seleção de um destino em relação a outro é não permitir que o estoque de segurança (estoque meta apontado pelo planejamento) desta área seja consumido sem critério. De certa forma, o não atendimento das demandas no período de tempo necessário é outro fator que gera penalizações na programação. A violação desta restrição corresponde a deixar a área de demanda sem o

recebimento de bateladas por um determinado tempo, provocando o consumo do estoque de segurança e consequente falta de produto para entrega aos clientes. Caso não exista quantidade suficiente de produto para atender simultaneamente as demandas de todos os destinos, divisões do estoque em bateladas menores (em relação aos tamanhos típicos normalmente movimentados) são necessárias para atender parcialmente estas demandas.

Programação de Atividades

Um grande desafio dos especialistas (programadores) do sistema é a obtenção da programação das atividades de forma que estas possam ser efetivamente cumpridas ao longo do horizonte de trabalho. Evitar significativas reprogramações, prezar o atendimento dos requisitos de entrega (sistema de planejamento), tentar manter os estoques de refinarias e terminais dentro de limites práticos (metas pré-estabelecidas), e ao mesmo tempo gerenciar a utilização/ocupação dos dutos do sistema, não é tarefa trivial.

Em linhas gerais, o procedimento de programação é inicialmente conduzido pela identificação atualizada dos bombeios em andamento na rede (tempo inicial, vazões, restrições). A partir do conhecimento destes eventos resolve-se, conforme disponibilidade, as prioridades da malha dutoviária. Por exemplo, na rede de claros, identificam-se alguns produtos cuja programação é crítica, tais como Nafta e QAV (queresone de aviação). Após a programação destes produtos, ajusta-se o bombeio dos demais nas janelas de tempo remanescentes. Na realidade, ocorrem ações antecipativas para estes produtos críticos. Ou seja, dado um cenário de trabalho, o programador já procura antever possíveis problemas com estes produtos e avaliar as possibilidades de solução dos imprevistos. Neste contexto, a cobertura dos estoques meta nas áreas consumidoras é algo a ser considerado.

Na elaboração das programações, o programador da malha leva em conta uma série de aspectos de modo a viabilizar a execução destas programações ou reprogramações geradas. Por exemplo:

- Evitar programar o início de bombeio de bateladas que coincidam com horários de troca de turno e períodos horossazonais;
- Evitar alterações na programação em andamento (consolidada no dia anterior), preferindo, quando possível, introduzir modificações nos dias mais à frente. Ou seja, durante a tarefa de reprogramação, procurar minimizar alterações no plano consolidado no dia anterior.

Uma outra característica relevante das programações, diz respeito à sazonalidade dos eventos que ocorrem na malha dutoviária. Certos dutos possuem um caráter cíclico de programação em função das áreas envolvidas e da época do ano. Flutuações periódicas de demanda

de certos produtos também contribuem para que a sazonalidade da programação da malha dutoviária seja um fator crítico. Os requisitos globais de demanda estabelecidos pelo sistema de planejamento mensal são a premissa orientadora dos volumes a serem transportados durante o horizonte de trabalho. Contudo, o volume típico das bateladas transportadas segue algumas diretrizes operacionais, fixadas principalmente pelos seguintes fatores:

- Volume do tanque de origem ou de destino (ou múltiplos deste volume);
- Volume do trecho de duto envolvido (ou múltiplos deste volume);
- Necessidade de realizar um "deslocamento da linha" utilizando-se bateladas auxiliares de mesmo volume do duto para entregar um produto que esteja "armazenado" temporariamente em um trecho da rede;
- Janela de tempo disponível para o bombeio, indicando o intervalo quando deve ocorrer o envio do produto a partir de uma área de origem.

O "deslocamento da linha" é uma prática comum na programação de redes de dutos, quando os programadores devem prever uma forma de retirar o excedente de produção das refinarias, utilizando muitas vezes trechos de dutos para armazenamento temporário (o duto sendo utilizado como um tanque).

Baseado nestas diretrizes operacionais, bateladas típicas de bombeio são definidas para cada produto, em cada origem de bombeio. Um outro fato relevante em relação à definição da batelada de bombeio é que existe a possibilidade do seu volume exceder ligeiramente o valor a ser enviado. Por exemplo, se no fechamento do montante referente ao planejamento mensal ainda houver um volume a ser entregue de um certo produto que não seja um múltiplo dos valores típicos de batelada, via de regra, é preferível exceder minimamente o volume de envio planejado para que a batelada atenda aos requisitos de volume típico de transporte. O excedente de produto movimentado permanece como um saldo para programações futuras.

Na seção seguinte serão tratadas particularidades da rede de dutos considerada neste trabalho e as características pertinentes à sua programação de operações, constituindo uma primeira abstração do problema.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE DUTOS

Este trabalho trata do escalonamento de operações em uma rede de dutos responsável pelo transporte de claros (derivados leves de petróleo de alto valor agregado). A Figura 2 modela, na forma de um grafo direcionado, a topologia da rede de dutos em estudo. Vale ressaltar que as setas indicam a direção da movimentação, sendo que 2 setas no mesmo arco indicam possibilidade de movimentação em ambos os sentidos.

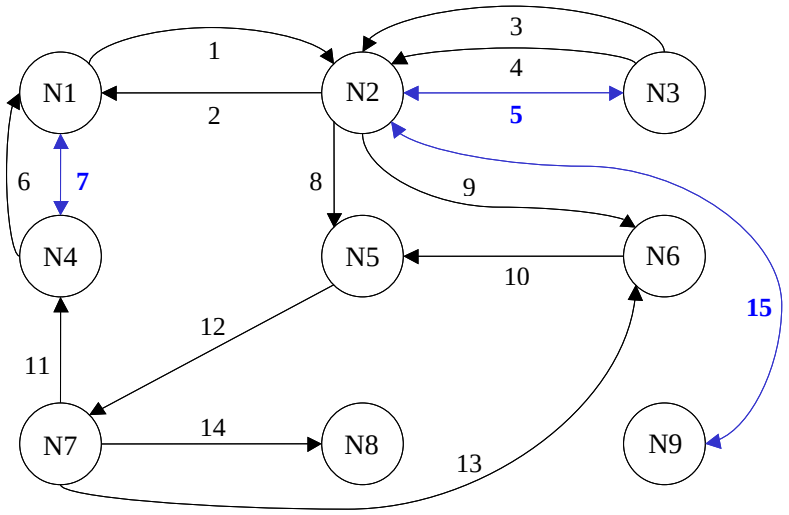

Figura 2 – Grafo direcionado da rede de dutos

A rede é composta por 9 áreas operacionais, incluindo 3 refinarias (nós N1, N3 e N7), 1 porto (nó N9) responsável pelo recebimento e envio de produtos e 5 centros de distribuição. As áreas são interligadas por um conjunto de 15 trechos de dutos, sendo que 3 deles são passíveis de reversão, ou seja, produtos podem ser movimentados em ambos os sentidos (dutos 5, 7 e 15). Os dutos podem transportar vários tipos de derivados de petróleo (gasolina, querosene de aviação, nafta, diesel, etc.) e álcool entre áreas adjacentes, somando mais de 10 produtos diferentes. As áreas possuem tancagem agregada para um conjunto específico de produtos, podendo ainda operar como fornecedoras (refinarias, navios de importação) ou consumidoras de derivados (centros de distribuição, navios de exportação, clientes finais). Existem movimentações preferenciais para cada produto em cada trecho de duto, formando assim rotas de fluxo conhecidas *a priori*. A menos dos períodos horossazonais, a rede opera ininterruptamente no transporte dos lotes de produtos agendados. Com base num sistema de planejamento (horizonte de 30 dias), a tarefa de escalonamento da rede consiste em realizar a programação das atividades de bombeio dos produtos requisitados, gerenciando o atendimento das demandas e a manutenção dos estoques. Para tanto, o processo de escalonamento deve considerar as movimentações já realizadas, os estoques disponíveis em cada área, as demandas requeridas, carga/descarga de navios atracados e previsões de produção nas refinarias. No Capítulo 2, foram citados traba-

lhos encontrados na literatura que tratam do problema de escalonamento em rede de dutos, mas consideram cenários bem mais simples que este, com poucos dutos e um número reduzido de áreas. A seguir serão discutidos alguns procedimentos e restrições operacionais que devem ser observados para uma correta modelagem do sistema em estudo.

Tancagem Agregada

Para efeitos de programação, limites superiores e inferiores de tancagem agregada devem ser considerados. A tancagem agregada é definida pela soma das capacidades de todos os tanques de um mesmo produto em cada área. A Figura 3 mostra os patamares adequados para a maior parte das áreas envolvidas em função da capacidade total agregada (CP).

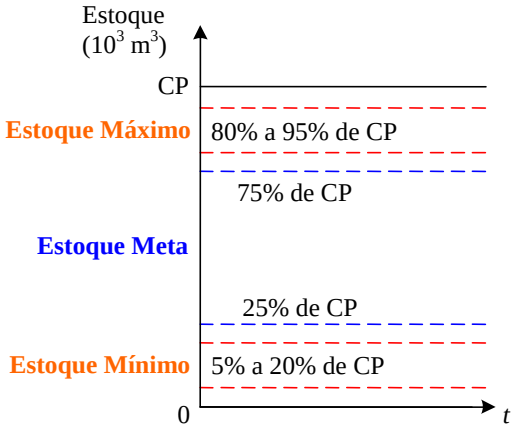

Figura 3 – Estoque agregado por área

No início de cada período de planejamento, o sistema atualiza a capacidade agregada de armazenamento operacional disponível em cada área para cada produto. Alterações de capacidade agregada devido à manutenção programada de tanques e trocas de serviço devem ser informadas antes da programação de operações de envio de produtos. A rotina operacional normalmente envolve a conferência de estoques e espaços de armazenagem disponíveis em cada área. O estoque meta constitui inventários desejáveis para cada produto em cada área ao final do horizonte de planejamento, permitindo um balanço da rede e a garantia de atendimento dos clientes e dos níveis adequados de tancagem nas refinarias (estoque de segurança). Normalmente, o estoque meta é definido dentro dos limites de 25% a 75% (Figura 3) da capacidade total de armazenamento agregado (CP). Também define-se uma faixa entre 80% a 90% de CP como estoque máximo permitido e 5% a 20% de CP como estoque mínimo aceitável.

Rotas de Fluxo

O conjunto de áreas e trechos de dutos através dos quais uma batelada é transportada de uma origem até um destino é denominado rota de fluxo (LIPORACE, 2005). Todo transporte deve necessariamente ocorrer por meio de uma rota de fluxo certificada. Uma rota é dita ativa num determinado instante de tempo quando há transporte de produto pela rota. Existe um conjunto de rotas de fluxo pré-cadastradas.

A vazão de uma rota de fluxo é definida em função dos limites inferiores e superiores de vazão associados a cada trecho de duto que compõe a rota de fluxo. Neste trabalho, será considerado que uma rota de fluxo opera com um valor de vazão pré-definido, isto é, durante uma operação de bombeio não ocorre variação da vazão. Para os propósitos de programação das atividades, a vazão do bombeio é considerada constante para um dado produto, trecho de duto (valor típico), o parque de bombas disponível, a origem do bombeio, produto no duto e área de destino.

Conforme será visto adiante, o bombeio de um produto sempre ocorre na origem de uma rota de fluxo, com exceção das operações de rebombeio e pulmão que podem ter a rota de fluxo subdividida (ocorrendo bombeio em áreas intermediárias entre uma origem e um destino). A vazão de um determinado produto ao longo do transporte na malha (após o término do bombeio na origem) é influenciada pelas vazões dos produtos que o deslocam. O tempo de transporte de uma batelada é função desta composição de vazões, que ocorre ao longo do caminho que o produto será transportado na malha dutoviária.

Embora a ativação de uma rota de fluxo esteja associada ao bombeio de apenas um produto, um duto pode ser compartilhado por diferentes produtos em um dado instante de tempo. Porém, note que rotas de fluxo coincidentes, isto é, que possuem trechos de dutos em comum, não devem ser ativadas simultaneamente, evitando assim sobreposição de movimentações.

Operações de Movimentação

O envio de uma batelada a partir de uma área de origem é denominado operação de bombeio e é referente à área mencionada. Analogamente, a operação de recebimento é associada à área de destino de uma batelada. De maneira geral, a movimentação de uma batelada desde uma área de origem até uma área de destino pode envolver sua passagem por outras áreas. A Figura 4 (b) ilustra uma operação de passagem do produto p1 pela área N2, com origem de bombeio em N1 e destino de recebimento em N4. Desta forma, a batelada pode percorrer um ou mais trechos de duto durante seu transporte. Neste caso, o alinhamento direto da batelada através de uma área é denominado operação de passagem. Em contraste, caso a batelada seja recebida em um tanque da área e ao mesmo tempo seja enviada deste tanque para outro tre-

cho de duto com vazão igual ou não àquela do recebimento, tem-se uma operação pulmão. A operação pulmão normalmente ocorre devido à limitação de vazão na linha, impossibilitando o alinhamento de movimentações em uma determinada área.

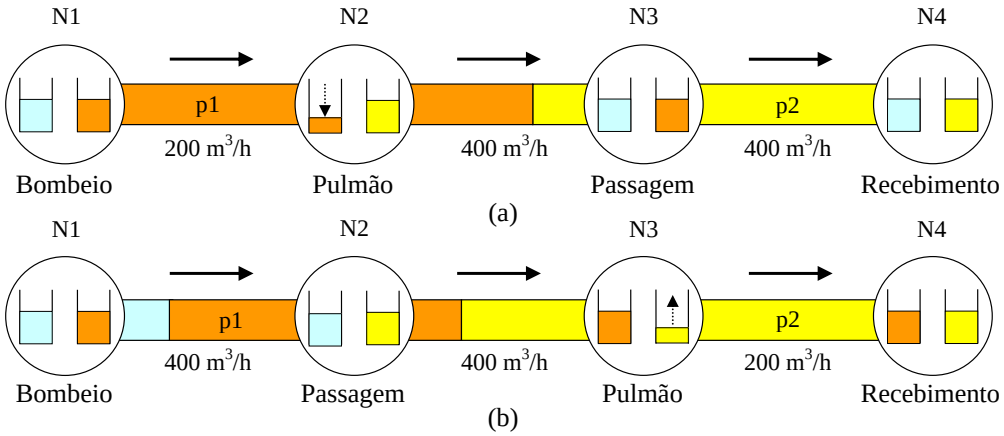

Figura 4 – Operações de movimentação

A Figura 4 (a) mostra a possibilidade da operação pulmão envolvendo o produto p1, com aumento da vazão de rebombeio na área N2 (200 m^3/h para 400 m^3/h). Como a vazão de envio é maior que a vazão de recebimento em N2, o tanque da área N2 deve conter volume suficiente para permitir o rebombeio do produto p1 à vazão de 400 m^3/h. A Figura 4 (b) exemplifica a operação pulmão envolvendo o produto p2 com redução da vazão de rebombeio na área N3 (400 m^3/h para 200 m^3/h). Neste caso, como a vazão de envio é menor que a vazão de recebimento em N3, a operação de rebombeio pode ocorrer simultaneamente com o início do recebimento em N3. Em termos práticos, na área em que ocorre a operação pulmão deve existir um tanque para armazenar o produto resultante desta diferença de vazões. Já na operação de passagem ocorrem manobras que alinham a batelada em movimentação, não havendo necessidade de estocagem intermediária.

Reversão de Dutos

Alguns dutos presentes no cenário em análise podem ter seu sentido de bombeio revertido (ex.: dutos 5, 7 e 15). Ou seja, existe um sentido de bombeio normal e um sentido de bombeio reverso dos dutos. As operações de reversão devem ser, quando possível, minimizadas dentro do horizonte de programação devido ao atraso associado à operação de deslocamento do duto antes da sua reversão, perdas por degradação de produtos e custo elétrico de bombeio da batelada auxiliar. 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 único produto. A exceção é o caso de dutos longos que geralmente revertem com mais de um produto em linha, devido aos custos operacionais envolvidos na substituição de todo o volume do duto por um único produto apenas (principalmente custo elétrico de bombeio). Uma operação de reversão entre as áreas N2 e N3 é ilustrada na Figura 5. A Figura 5 (a) apresenta as bateladas inicialmente presentes no duto. As Figuras 5 (b) e 5 (c) mostram o início do bombeio da batelada auxiliar de reversão 1 e o deslocamento das bateladas 5 e 6 em direção ao destino N2. A Figura 5 (d) ilustra a ocupação de todo o duto pela batelada 1 antes deste ser revertido. Finalmente, nas Figuras 5 (e) e 5 (f) pode-se notar a inversão no sentido de fluxo e a movimentação das bateladas 3 e 4 em direção ao destino N3, fazendo retornar a batelada 1 de reversão para sua origem.

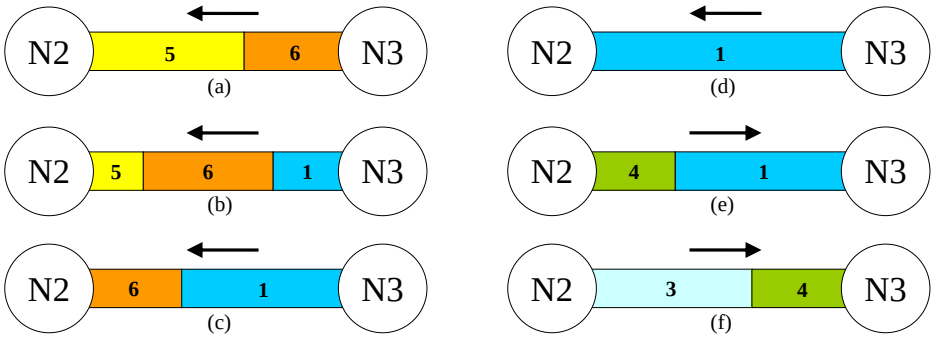

Figura 5 – Operação de reversão

Neste caso em particular, a batelada 1 auxilia o recebimento das bateladas 5 e 6 na área N2, sem necessariamente cumprir requisitos de demanda. O conceito da operação de reversão, a exemplo da operação pulmão mostrada anteriormente, servirá de base para o modelo matemático implementado no Capítulo 4 e a correta interpretação dos resultados apresentados no Capítulo 5.

Restrições Locais

Denominam-se restrições locais aquelas que são específicas da operação de uma determinada área. São normalmente relacionadas ao número máximo de bombeios e recebimentos simultâneos, devido principalmente a limitações do conjunto de bombas e equipamentos de manobra. Além disso, para cada família de produtos, um conjunto de bombas é dedicado em virtude das diferentes propriedades envolvidas, principalmente viscosidade e densidade distintas. Por exemplo, N2 permite apenas 2 bombeios e 2 recebimentos simultâneos, apesar da grande concentração de dutos envolvendo esta área, sendo considerada um potencial gargalo para o sistema. Já o terminal N9 não pode bombear um mesmo produto para a área N2 e para os navios, devido a existência de apenas 1 conjunto de bombas. A área N7 permite apenas um bombeio, ou seja, não se pode bombear simultaneamente para os trechos de duto 11, 13

e 14. Desta forma, a ferramenta que está sendo proposta busca sugerir uma programação que considera antecipadamente grande parte das restrições impostas, criando condições para que outros aspectos da solução sejam analisados pelos programadores, tais como escolha de rotas alternativas, perfis de tancagem, agendamento de navios e movimentações de produtos críticos que cada planejamento exige. Mais detalhes sobre restrições locais serão evidenciados durante o processo de elaboração do modelo matemático.

Restrições Horossazonais e Troca de Turno

Devido ao elevado consumo energético necessário para o transporte dos produtos em dutos, o bombeio de produtos em algumas áreas da rede de claros deve ser interrompido periodicamente ao longo dos dias úteis da semana. O período restritivo é normalmente das 17:30 h às 20:30 h. No horário de verão, este período vai das 18:30 h às 21:30 h (ANEEL, 2009).

Em relação ao sistema de claros estudado:

- Há interrupção nos dutos da área N3: dutos 3, 4 e 5;
- Há interrupção nas áreas operacionais N2, N5 e N9 (exceto carga de navios).

Além disso, durante a atividade de programação, deve-se evitar que operações de envio e recebimento sejam iniciadas ou concluídas durante os períodos de troca de turno (o que demandaria uma série de manobras complexas a serem iniciadas e concluídas normalmente pelo mesmo operador). Uma determinada área pode ter mais de um período de troca de turno especificado e devem ser respeitados ao longo do horizonte de planejamento. Operações em andamento durante os períodos de troca de turno não sofrem interrupções.

Em relação à rede de claros, tanto nas refinarias quanto nos terminais, a troca de turno ocorre nos seguintes períodos: 07:00 h, 15:00 h e 23:00 h.

Compatibilidade de Produtos

Quando dois produtos são transportados sequencialmente pelo mesmo trecho de duto, é inevitável que ocorram contaminações e perdas na região de contato (denominada interface) devido à mistura entre os derivados dentro do duto (JOLY, 1999). 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. Existem casos em que o bombeio sequencial de certos produtos não é recomendável, tipicamente pela degradação excessiva do produto mais nobre. Deste modo, é procedimento operacional considerar certas sequências de bombeio como não

permitidas. Como premissa de primeira abordagem, as decisões relativas à compatibilidade entre produtos será delegada a um nível operacional, ou seja, as bateladas não compatíveis serão tratadas nas áreas de envio e recebimento. Dessa forma, não serão tratadas no modelo proposto no Capítulo 4 restrições de compatibilidade entre produtos no momento de gerar a programação da malha dutoviária sob análise.

Levando-se em conta as considerações da seção desta seção, o passo seguinte é definir a abordagem de solução do problema de programação do transporte de derivados, conforme descrito a seguir.

3.4 ABORDAGEM DE SOLUÇÃO

Dentro do problema em estudo, a busca por resultados práticos considerando uma carga computacional aceitável torna-se um grande desafio. Desta forma, uma abordagem de decomposição é proposta para tornar viável a implementação do solucionador de programações. A Figura 6 descreve a arquitetura proposta para a solução do problema (NEVES-JR et al., 2007a). Como discutido na seção 2.1, problemas de escalonamento são inerentemente difíceis de serem tratados, sendo que sua decomposição visa tratar subproblemas mais simples ao considerar separadamente os aspectos de alocação, sequenciamento e temporização.

Esta subdivisão está baseada nos três elementos-chaves do escalonamento (*scheduling*): a determinação dos recursos a serem utilizados (*assignment*), o sequenciamento de atividades (*sequencing*) e a temporização (*timing*) do uso dos recursos pelas atividades (REKLAITIS, 1992).

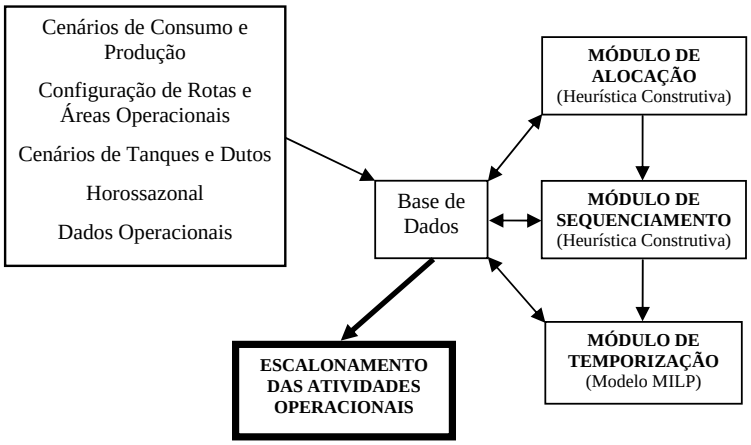

Figura 6 – Arquitetura proposta: módulos construtivos

O foco deste trabalho está no desenvolvimento de um modelo MILP para realizar a temporização das operações, o qual recebe informações dos módulos que implementam as heurísticas de operação dos programadores. Entretanto, no Capítulo 6, uma abordagem diferente para o problema de sequenciamento é também proposta.

Pela Figura 6, as informações oriundas do bloco de entrada (Cenário de Produção e Consumo, Cenário de Tanques e Dutos, Dados Operacionais), juntamente com a interação do usuário (programador), fornecem uma instância de programação a ser disponibilizada pela Base de Dados. A definição do cenário a ser contemplado é a etapa inicial do processo de programação de operações, contendo dados dinâmicos (parâmetros de entrada) e dados estáticos (topologia da rede). De forma simplificada, o módulo de Alocação de Recursos é responsável pela determinação dos recursos a serem utilizados (estoques, áreas, trechos de dutos e bateladas programadas), o módulo de Sequenciamento determina a ordem de bombeio das bateladas, sendo que o Módulo de Temporização utiliza um modelo MILP para determinar a temporização de uso dos recursos pelas atividades de bombeio. Cada um dos sub-problemas gerados pode ser tratado por diferentes abordagens, seja através de métodos determinísticos, heurísticos ou meta-heurísticos. Os módulos descritos a seguir antecedem o modelo de temporização MILP e, embora não façam parte deste trabalho, agregam informações importantes para a solução geral do problema.

Módulo de Alocação de Recursos

Em função das taxas de produção e demanda, estado inicial da rede, tamanho típico de bateladas e estoques disponíveis, o bloco Alocação de Recursos determina um conjunto de bateladas a serem bombeadas ao longo do horizonte de programação através de uma heurística construtiva. O cálculo do volume e a escolha de rotas das bateladas são realizadas separadamente para cada produto envolvido na programação a ser efetuada. Este resultado é constituído essencialmente das previsões de realização dessas operações (previsão de estoques), indicando a rota pré-cadastrada a ser utilizada, o volume do produto a ser transferido, a vazão alocada ao produto e as janelas de tempo associadas ao envio de produtos na origem e recebimento de produtos no destino. O resultado final do Módulo de Alocação é uma carteira de bateladas fornecida na forma de uma lista de movimentos que deverão atender todos os requisitos de inventário das áreas durante o período de planejamento (aproximadamente 30 dias).

A Figura 7 reproduz a concepção dos cálculos das janelas de tempo com base nos estoques agregados dos terminais de oferta e demanda. As janelas de tempo para as sequências de bateladas são calculadas em função dos patamares de estoque limite para cada área, valores estes que não podem ser violados durante a fase de temporização das operações. Estas janelas de tempo estão ilustradas na Figura 7. Através da Figura 7 (a), o Tempo de Recebimento Disponível (TRD) é o instante em que a área de demanda alcança o valor de estoque que possibilita o armazenamento completo de uma nova batelada, sendo que o Tempo de Recebimento Crítico (TRC) é definido como o instante em que a área de demanda alcança o valor de estoque

mínimo. A Figura 7 (b) ilustra o efeito da chegada de novas bateladas ao terminal de demanda. De maneira análoga, através da Figura 7 (c), o Tempo de Envio Disponível (TED) é definido como o instante em que a área de oferta atinge o valor de estoque suficiente para enviar uma batelada completa, sendo que o Tempo de Envio Crítico (TEC) é determinado como o instante em que área de oferta atinge o valor de estoque máximo. A Figura 7 (d) aponta os instantes de retirada das bateladas solicitadas no terminal de oferta. Com isso, tem-se uma janela de tempo na área de demanda, indicando o intervalo quando o recebimento do produto deve ser realizado, e outra na área de oferta, indicando o intervalo quando deve ocorrer o envio do produto.

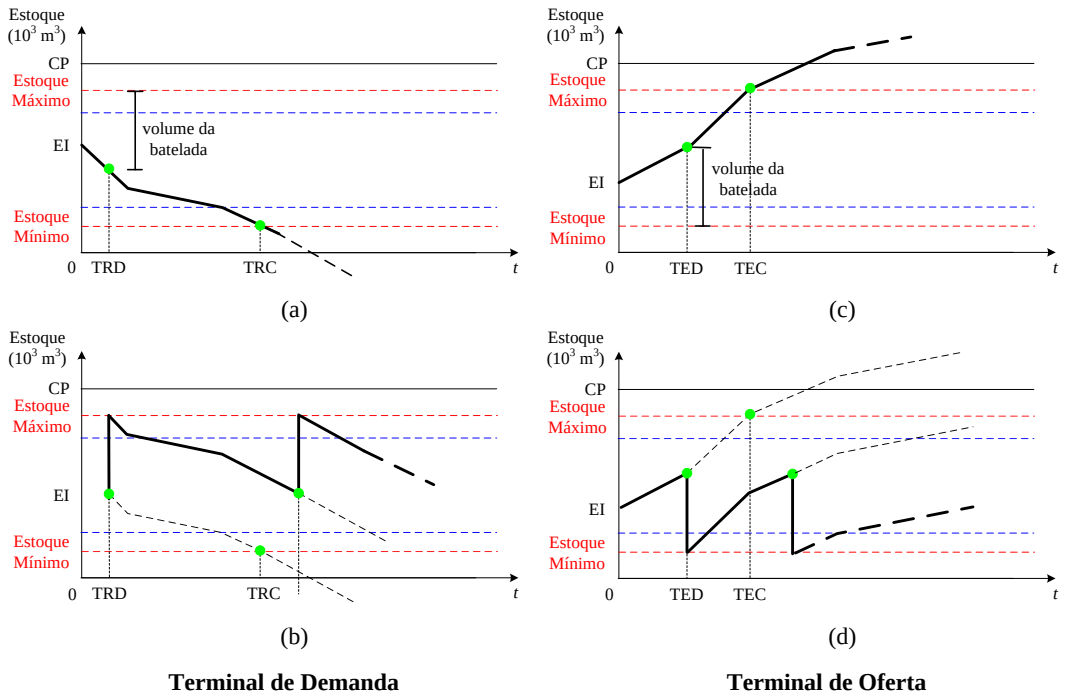

Figura 7 – Janelas de envio e recebimento

Módulo de Sequenciamento

Após a escolha dos pares de origem e destino (associação de uma área de oferta com uma área de demanda) e designação de uma rota típica, cada batelada deve ser integrada em uma lista de forma hierárquica segundo critérios de prioridade. Atualmente, o critério de ordenação das bateladas é baseado em uma abordagem que considera as janelas de tempo na origem e no destino, já calculadas no módulo anterior, atributos comuns a todos os movimentos. Para cada batelada b é calculado um fator de peso C_b, sendo que o conjunto desses movimentos é ordenado de forma crescente de acordo com este valor. Quanto menor o valor deste peso, maior é a prioridade de envio da batelada. A equação 2 representa a base de cálculo para a ordenação

da lista de todas as bateladas geradas.

$$C_b = TED + (TEC + 1 - TED)\frac{TED}{TEC+1} + \frac{TED+TEC}{TED+TEC+1} + \\ TRD + (TRC + 1 - TRD)\frac{TRD}{TRC+1} + \frac{TRD+TRC}{TRD+TRC+1} \tag{2}$$

Este critério foi obtido heuristicamente, levando-se em conta a prioridade das bateladas segundo sua disponibilidade de envio e recebimento em um instante de tempo menor, o estreitamento ou não das suas janelas de tempo na origem e no destino e a precedência dos instantes de tempo críticos para que a operação ocorra (BONACIN et al., 2007). O cálculo é realizado considerando-se as janelas de tempo na origem e no destino de maneira análoga e são atribuídos pesos iguais às duas situações. Em função dos valores absolutos dos instantes de tempo TED e TEC, o termo $\frac{TED+TEC}{TED+TEC+1}$ possui valor próximo do unitário para a maior parte das bateladas. Entretanto, este termo é responsável por ordenar as bateladas do início do horizonte de programação, quando os valores de TED costumam ser próximos de zero [1]. No cálculo do fator para as demais bateladas da carteira, onde os fatores TED e TEC envolvidos são elevados, o peso deste termo torna-se desprezível. A ordem de precedência das bateladas obtida pela ponderação das janelas de tempo se aproxima muito da ordenação gerada intuitivamente pelos operadores, objetivo inicialmente alcançado pela heurística proposta. A Tabela 1 ilustra a ordenação global de algumas bateladas que fazem parte de um cenário real de programação. Foram escolhidas bateladas de números alternados para exemplificar a variação do valor de C_b ao longo da carteira de bateladas.

Tabela 1 – Ordenação de bateladas em função de C_b

b	TED	TEC	TRD	TRC	C_b
3	0	684	0	130	1,990
7	0	682	0	2000	1,996
20	77	263	171	217	341,403
28	139	1224	147	328	492,544
35	503	827	0	729	702,431
42	392	434	368	433	856,710
47	372	1457	302	483	1066,647
52	436	797	410	668	1204,512
57	527	713	657	703	1367,884
65	604	1689	457	6380	1581,294

Pode-se notar que a batelada 3 possui uma prioridade superior a batelada 7 na lista de bateladas, apesar da pequena diferença entre os valores de C_b calculados (1,990 contra 1,996). Em uma situação de disputa de recursos durante as operações de envio a partir de uma área de origem (restrição local de bombeio) ou passagem em áreas intermediárias, a batelada 3 teria preferência sobre a batelada 7.

[1] No início do cenário de programação, normalmente os estoques das áreas de origem permanecem em um nível próximo da meta (nível médio de estoque), contendo volume suficiente para a geração de uma batelada típica.

Em conjunto com a heurística construtiva, a utilização de um método meta-heurístico baseado em algoritmo genético multiobjetivo está sendo desenvolvido para obtenção de diversas soluções de sequenciamento (YAMAMOTO, 2009). O objetivo é permitir que sequências alternativas sejam sugeridas para o módulo de temporização, visando obter uma programação factível, com o mínimo de violação das janelas de tempo que gerenciam indiretamente o atendimento dos estoques.

Após a ordenação global das bateladas na rede, o módulo de Alocação de Recursos trata ainda as operações de pulmão e reversão, completando a carteira de bombeios a ser executada. Basicamente, a operação pulmão é resultado da quebra das bateladas e da rota de fluxo associada à área que provoca mudanças no valor da vazão (Figura 4). Já a operação de reversão é associada à inserção de bateladas auxiliares, normalmente com volumes iguais aos dos trechos de dutos que sofrem reversão (Figura 5). Os dados fornecidos pelo Módulo de Alocação de Recursos e o resultado do Módulo de Sequenciamento são então utilizados pelo Módulo de Temporização para determinar o escalonamento das atividades de transporte de toda a rede de dutos. As janelas de tempo previamente fornecidas deverão ser respeitadas pelo modelo matemático MILP como uma medida indireta para manter os inventários dentro de níveis operacionais. Os resultados das instâncias de solução ficam disponíveis na Base de Dados e podem ser utilizados para o estabelecimento da efetiva programação que será utilizada na rede física.

3.5 CONCLUSÃO

Ficam assim descritas as principais características que envolvem o escalonamento de operações em uma malha dutoviária, em especial aquelas referentes a uma rede de dutos responsável pelo transporte de derivados leves. A principal contribuição deste capítulo foi descrever detalhadamente o conhecimento especialista, fornecendo uma abstração do problema que será utilizada no desenvolvimento do modelo MILP do capítulo seguinte. O entendimento e a formalização do processo heurístico utilizado pelos programadores são procedimentos indispensáveis para a obtenção de resultados práticos. Em vista da diversidade de aspectos a serem considerados, é evidente a importância de uma estrutura de otimização para o apoio à tomada de decisões durante a operação da rede. Devido às dificuldades inerentes ao sistema, obter soluções de programação válidas em tempos de processamento viáveis é uma tarefa desafiadora. A forte orientação a resultados práticos motivou a pesquisa por abordagens de subdivisão do problema, onde cada bloco tenta agregar, de forma hierárquica, propostas que minimizem o esforço computacional. Neste sentido, a arquitetura de solução proposta é inspirada na decomposição do problema considerando os três elementos chave do escalonamento (*scheduling*): a determinação dos recursos a serem utilizados (*assignment*), o sequenciamento de atividades (*sequencing*) e a temporização (*timing*) do uso dos recursos pelas atividades (REKLAITIS, 1992).

Juntamente com a estrutura de subdivisão, outras considerações impactam diretamente na formulação matemática proposta no Capítulo 4. Através do módulo de Alocação de Recursos, a medida indireta de estoques agregados a partir das janelas de tempo permite que decisões da etapa de planejamento sejam consideradas durante a fase de escalonamento para horizontes de tempo compatíveis com as necessidades dos programadores. Adicionalmente, rotas de fluxo cadastradas permitem que decisões de movimentação sejam restritas às práticas consolidadas pelos especialistas da rede, desonerando o modelo matemático de sugerir rotas alternativas. Conceito similar é utilizado através do módulo de Sequenciamento que fornece a prioridade de bombeio das bateladas em função das janelas de tempo, retirando-se do modelo de temporização o processo de ordenação das bateladas da carteira.

A partir desta abordagem, o capítulo seguinte desenvolve o modelo de temporização em MILP como parte de uma estrutura de auxílio à programação do transporte de derivados de petróleo em uma rede de dutos, visando gerenciar os aspectos operacionais deste cenário específico.

4 MODELO DE ESCALONAMENTO PARA UMA REDE DE DUTOS

Neste capítulo, um modelo baseado em técnicas de programação linear inteira mista (MILP) com domínio de tempo contínuo foi desenvolvido para fornecer a programação ótima, sob determinados critérios, da rede de dutos descrita no capítulo anterior. Durante a criação do modelo é necessário assumir certas hipóteses simplificadoras. A adequação do nível de detalhes é fundamental para atingir resultados aceitáveis em um tempo de processamento compatível com as exigências operacionais da rede. Neste sentido, serão descritas as premissas de abordagem do modelo com base nas informações obtidas através da heurística de programação da rede, bem como detalhes da estrutura de geração das variáveis, subsídio fundamental para o entendimento das restrições que orientam a solução do problema. O modelo a ser apresentado tem como objetivo principal determinar o comportamento temporal da rede de dutos durante as atividades de transporte de derivados, caracterizado por uma situação operacional intermitente ao longo do horizonte de programação. Durante a elaboração do modelo, pretende-se evidenciar os principais desafios deste trabalho e as técnicas utilizadas para a sua solução.

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um aspecto importante a ser ressaltado refere-se à estratégia de decomposição proposta para o problema, considerando a rede de dutos como parte de um sistema complexo. A saída esperada é a solução de escalonamento fornecida pelo modelo MILP, porém, tal solução é influenciada por parâmetros previamente estabelecidos pelos outros dois módulos da arquitetura proposta na seção 3.4 (Figura 6). Em função destes parâmetros, tais como a carteira de bateladas definida *a priori* pelo módulo de sequenciamento, o cenário de tancagem das áreas operacionais e o estado inicial da rede de dutos, o modelo deverá determinar o escalonamento das operações de transporte de produtos ao longo do horizonte de programação. Considerando-se que a lista de bateladas é ordenada em função de critérios de prioridade de bombeio, o objetivo é determinar os instantes de envio e recebimento dos produtos requisitados, atendendo restrições operacionais e de demanda.

Em sua formulação, o modelo considera rotas de fluxo previamente cadastradas (origem de bombeio, trechos de dutos e destino final), volume e vazão típica para cada produto a

ser transportado. Os trechos de duto possuem volumes não desprezíveis, sendo que permanecem completamente preenchidos, armazenando diferentes produtos durante os procedimentos de transporte. Enquanto um produto é bombeado a partir de uma área de origem, produtos previamente armazenados ao longo da rota são empurrados com a vazão imposta por esta nova batelada. Produtos armazenados nos trechos de duto devem ser roteados para seus destinos previamente especificados. Em cada uma das áreas, produtos recebidos dos trechos de duto podem ser bombeados para tanques específicos ou encaminhados para outros trechos de duto. Os níveis de inventário (estoque agregado) em cada área podem ser incrementados ou decrementados de acordo com o volume e vazão de cada produto recebido, enviado ou devido às taxas de produção e consumo locais. Deve-se considerar ainda os horários de sobretaxa de energia, evitando o início das operações de bombeio dentro destes intervalos. Várias restrições operacionais, tais como simultaneidade de bombeio/recebimento devem ser consideradas, orientando a correta temporização das operações a serem programadas (FELIZARI et al., 2007; NEVES-JR et al., 2007b).

Para a formulação a ser descrita posteriormente, algumas questões gerais de requisitos e procedimentos operacionais devem ser observados, orientando a modelagem do problema:

1. As cotas mensais de planejamento são divididas em volumes menores (carteira de bateladas) que devem ser bombeados ao longo do horizonte de trabalho;
2. Produtos podem ser bombeados de diferentes áreas de origem, de acordo com uma sequência de envios pré-definida, gerando uma ordem de movimentações a ser respeitada;
3. Os volumes de bombeio das bateladas são definidos *a priori* para cada produto, sendo função dos estoques de origem, dos estoques de destino ou trecho de duto (por exemplo, bateladas de reversão);
4. Dentro da rede em estudo existem rotas de fluxo preferenciais (previamente homologadas) para cada produto a ser movimentado;
5. A vazão de bombeio é considerada constante (valor típico), de acordo com o produto e rota de fluxo adotada, sendo que em relação a um destino, a vazão de recebimento de uma batelada dependerá, além de sua vazão, das vazões dos produtos que a empurram;
6. Diz-se que ocorre uma operação pulmão caso a batelada seja recebida em um tanque da área e ao mesmo tempo seja bombeada deste tanque para outro trecho de duto com vazão igual ou não àquela do recebimento;
7. As bateladas utilizadas no procedimento de reversão (mudança no sentido de bombeio) dos dutos do cenário em análise são previamente determinadas;
8. A capacidade de tancagem é considerada como sendo agregada por produto e área, devendo respeitar limites superiores e inferiores de estocagem;

9. Em função dos limites superiores e inferiores de tancagem agregada para cada produto e área, a etapa de Alocação de Recursos determina janelas de tempo para o envio e recebimento de bateladas, prevendo-se quando as áreas alcançarão os estoques críticos. As janelas de tempo são parâmetros de entrada para o modelo MILP, passíveis de violação sob penalização na função objetivo;

10. Existem restrições locais em cada terminal ou refinaria, tais como simultaneidade de bombeio/recebimento que devem ser respeitadas na programação;

11. Os produtos podem permanecer parados no interior de um trecho de duto, entretanto, esta situação gera um custo operacional, devendo ser minimizada;

12. Bateladas que estejam previamente nos dutos devem ser consideradas para efeito de cumprimento de demandas e balanço de estoques;

13. Devido ao elevado consumo energético necessário para o transporte em dutos, o bombeamento deve ser, em alguns casos, interrompido periodicamente ao longo dos dias úteis da semana. O período restritivo é das 17:30 h às 20:30 h. No horário de verão, das 18:30 h às 21:30 h;

14. Durante a atividade de programação, deve-se evitar que operações de envio e recebimento sejam iniciadas ou concluídas durante os períodos de troca de turno. Em relação à rede de claros, tanto nas refinarias quanto nos terminais, a troca de turno ocorre três vezes ao dia: 7:00 h, 15:00 h e 23:00 h;

15. A rotina de evitar a geração de interface entre bateladas não compatíveis (região de contaminação) será delegada a um nível operacional.

Prevendo-se o transporte de diversos produtos derivados de petróleo ao longo do horizonte de programação, o problema de temporização consiste em determinar os seguintes resultados:

1. Tempos de início e término das operações de bombeio e recebimento das bateladas em cada área operacional da rede;

2. Tempos de início e término de parada das bateladas em cada trecho de duto;

3. Movimentação das bateladas ao longo das rotas de fluxo;

4. Violações das janelas de tempo impostas ao bombeio e recebimento de bateladas, permitindo avaliação dos estoques agregados nas áreas operacionais.

Para a correta modelagem do problema de programação de transporte da rede de dutos, a seguir serão descritas a nomenclatura utilizada e as particularidades relacionadas à estrutura do modelo.

4.2 MODELO DE ESCALONAMENTO

O modelo matemático desenvolvido utiliza técnicas de programação matemática inteira mista (MILP) com domínio de tempo contínuo. Neste tipo de abordagem, a temporização do processo é representada por variáveis contínuas e deve ser determinada por meio de restrições de temporização. A tendência dos trabalhos atuais aponta para o desenvolvimento de formulações em tempo contínuo, de forma a explorar características particulares de cada problema (PINTO; GROSSMANN, 1995; MOCKUS; REKLAITIS, 1997; IERAPETRITOU; FLOUDAS, 1998; MORO, 2000; MÉNDEZ; CERDÁ, 2002; MAGATÃO, 2005; CAFARO; CERDÁ, 2008). As decisões são modeladas por variáveis binárias e contínuas, interligadas através de restrições lineares. O modelo proposto tem objetivo minimizar o tempo total de programação das operações de movimentação de produtos (priorizando que a movimentação seja realizada no curto prazo), os tempos de parada e as violações dos estoques nas origens e destinos através do atendimento das janelas de tempo impostas ao bombeio e recebimento de bateladas.

Tomando em conta as considerações de operação, requisitos e procedimentos operacionais e o critério de otimização adotado, a formulação do problema de programação da rede de dutos é apresentada na sequência.

Na descrição do modelo de escalonamento, a seguinte notação é utilizada:

4.2.1 Notação

Índices

b	batelada de produto ($b \in B$);
n	área operacional ($n \in N$);
d	trecho de duto ($d \in N$);
h	horário de ponta ($h \in HP$);
tr	horário de troca de turno ($tr \in TT$).

Conjuntos

B conjunto de bateladas, $B = \{1, 2, \ldots, nb\}$;

N conjunto de áreas operacionais, $N = \{1, 2, \ldots, nn\}$;

N_{HOR} conjunto de áreas em que ocorre parada de bombeio de produtos nos horários de ponta, N_{HOR}={2, 3, 5, 9};

N_{TT} conjunto de áreas que sofrem restrições de envio e recebimento de produtos durante horários de troca de turno, N_{TT}={1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9};

D conjunto de trechos de dutos, $D = \{1, 2, \ldots, nd\}$;

D_{REV} conjunto de trechos de dutos que sofrem reversão de fluxo, $D_{REV} = \{5, 7, 15\}$;

P conjunto de produtos, $P = \{1, 2, \ldots, np\}$;

RFX conjunto das rotas de fluxo, $RFX = \{1, 2, \ldots, nrfx\}$;

HP conjunto formado pelos períodos de ponta, $HP = \{1, 2, \ldots, nh\}$;

TT conjunto formado pelos períodos de troca de turno, $TT = \{1, 2, \ldots, ntr\}$.

Parâmetros gerais

nn número de áreas operacionais;

nd número de trechos de duto;

np número de produtos;

$nrfx$ número de rotas de fluxo cadastradas;

nhp número de horários de ponta ao longo do horizonte de programação;

vol_d volume do duto d (m^3);

ih_h tempo de início do período de ponta h dentro do horizonte de programação (h);

fh_h tempo de término do período de ponta h dentro do horizonte de programação (h);

it_{tr} tempo de início do período de troca de turno tr dentro do horizonte de programação (h);

ft_{tr} tempo de término do período de troca de turno tr dentro do horizonte de programação (h);

dp_h tempo de duração do horário de ponta h (h);

M número positivo suficientemente grande;

eps número positivo suficientemente pequeno;

ktb custo associado à prioridade de bombeio e recebimento ($/h);

ktp custo associado aos tempos de parada ($/h).

Parâmetros fornecidos pelo módulo Alocação de Recursos

nb número de bateladas;

nb_{INI} número de bateladas já existentes na rede (inicialização);

no_b área de origem da batelada b ($no_b \in N$);

nd_b área de destino da batelada b ($nd_b \in N$);

vol_b volume da batelada b (m^3);

p_b produto associado à batelada b ($p_b \in P$);

rfx_b rota de fluxo associada à batelada b ($rfx_b \in RFX$);

vaz_b vazão associada à batelada b (m^3/h);

ted_b tempo de envio disponível da batelada b na área de origem (h);

tec_b tempo de envio crítico da batelada b na área de origem (h);

trd_b tempo de recebimento disponível da batelada b na área de destino (h);

trc_b tempo de recebimento crítico da batelada b na área de destino (h);

ei_{n,p_b} estoque inicial do produto p_b na área n (m^3);

kto custo de violação da janela de tempo de bombeio na origem ($/h);

ktd custo de violação da janela de tempo de recebimento no destino ($/h);

ktt custo de violação do período de troca de turno ($/h);

H_{REF} horizonte de referência para início da programação (h).

Variáveis

$ib_{b,n,n1,d}$ tempo de início de envio da batelada b, da área n para a área $n1$, através do duto d, onde d conecta n a $n1$ (h);

$fb_{b,n,n1,d}$ tempo de término de envio da batelada b, da área n para a área $n1$, através do duto d, onde d conecta n a $n1$ (h);

$ir_{b,n,n1,d}$ tempo de início de recebimento da batelada b na área $n1$, enviada da área n, através do duto d, onde d conecta n a $n1$ (h);

$fr_{b,n,n1,d}$ tempo de término de recebimento da batelada b na área $n1$, enviada da área n, através do duto d, onde d conecta n a $n1$ (h);

$ip_{b,d}$ tempo de início de parada da batelada b no trecho de duto d (h);

$fp_{b,d}$ tempo de término de parada da batelada b no trecho de duto d (h);

$ao_{b,n}$ tempo de adiantamento no envio da batelada b, da área de origem n, em relação ao parâmetro ted_b (h);

$do_{b,n}$ tempo de atraso no envio da batelada b, da área de origem n, em relação ao parâmetro tec_b (h);

$ad_{b,n}$ tempo de adiantamento no recebimento da batelada b, na área de destino n, em relação ao parâmetro trd_b (h);

$dd_{b,n}$ tempo de atraso no recebimento da batelada b, na área de destino n, em relação ao parâmetro trc_b (h);

$x_{b,n,h}$ variável binária indicando se o parâmetro ih_h é maior ou igual a $ib_{b,n,n1,d}$ ($x_{b,n,h} = 1$), caso contrário ($x_{b,n,h} = 0$);

$w_{b,n,h}$ variável binária indicando se $ib_{b,n,n1,d}$ é menor ou igual a ih_h ($w_{b,n,h} = 1$), caso contrário ($w_{b,n,h} = 0$), $ib_{b,n,n1,d}$ é maior ou igual a fh_h;

$y_{b,n,h}$ variável binária indicando se $fb_{b,n,n1,d}$ é maior ou igual ao parâmetro ih_h ($y_{b,n,h} = 1$), caso contrário ($y_{b,n,h} = 0$);

$z_{b,n,h}$ variável binária indicando que ocorre parada de bombeio da batelada b, na área n, durante o horário de ponta h ($z_{b,n,h} = 1$), caso contrário ($z_{b,n,h} = 0$);

$tt1ib_{b,n,tr}$ variável binária indicando se $ib_{b,n,n1,d}$ é maior ou igual ao parâmetro it_{tr} ($tt1ib_{b,n,tr} = 1$), caso contrário ($tt1ib_{b,n,tr} = 0$);

$tt2ib_{b,n,tr}$ variável binária indicando se $ib_{b,n,n1,d}$ é menor ou igual ao parâmetro ft_{tr} ($tt2ib_{b,n,tr} = 1$), caso contrário ($tt2ib_{b,n,tr} = 0$);

$ttib_{b,n,tr}$ variável binária indicando o início de bombeio da batelada b, na área n, durante a troca de turno tr ($ttib_{b,n,tr} = 1$), caso contrário ($ttib_{b,n,tr} = 0$);

$tt1fb_{b,n,tr}$ variável binária indicando se $fb_{b,n,n1,d}$ é maior ou igual ao parâmetro it_{tr} ($tt1fb_{b,n,tr} = 1$), caso contrário ($tt1fb_{b,n,tr} = 0$);

$tt2fb_{b,n,tr}$ variável binária indicando se $fb_{b,n,n1,d}$ é menor ou igual ao parâmetro ft_{tr} ($tt2fb_{b,n,tr} = 1$), caso contrário ($tt2fb_{b,n,tr} = 0$);

$ttfb_{b,n,tr}$ variável binária indicando o final de bombeio da batelada b, na área n, durante a troca de turno tr ($ttfb_{b,n,tr} = 1$), caso contrário ($ttfb_{b,n,tr} = 0$);

$tt1ir_{b,n1,tr}$ variável binária indicando se $ir_{b,n,n1,d}$ é maior ou igual ao parâmetro it_{tr} ($tt1ir_{b,n1,tr} = 1$), caso contrário ($tt1ir_{b,n1,tr} = 0$);

$tt2ir_{b,n1,tr}$ variável binária indicando se $ir_{b,n,n1,d}$ é menor ou igual ao parâmetro ft_{tr} ($tt2ir_{b,n1,tr} = 1$), caso contrário ($tt2ir_{b,n1,tr} = 0$);

$ttir_{b,n1,tr}$ variável binária indicando o início de recebimento da batelada b, na área $n1$, durante a troca de turno tr ($ttir_{b,n1,tr} = 1$), caso contrário ($ttir_{b,n1,tr} = 0$);

$tt1fr_{b,n1,tr}$ variável binária indicando se $fr_{b,n,n1,d}$ é maior ou igual ao parâmetro it_{tr} ($tt1fr_{b,n1,tr} = 1$), caso contrário ($tt1fr_{b,n1,tr} = 0$);

$tt2fr_{b,n1,tr}$ variável binária indicando se $fr_{b,n,n1,d}$ é menor ou igual ao parâmetro ft_{tr} ($tt2fr_{b,n1,tr} = 1$), caso contrário ($tt2fr_{b,n1,tr} = 0$);

$ttfr_{b,n1,tr}$ variável binária indicando o início de recebimento da batelada b, na área $n1$, durante a troca de turno tr ($ttfr_{b,n1,tr} = 1$), caso contrário ($ttfr_{b,n1,tr} = 0$);

4.2.2 Variáveis

Um aspecto importante na criação das variáveis do modelo matemático refere-se ao conceito de rota de fluxo. Cada rota de fluxo é composta por uma sequência de áreas intercaladas por segmentos de dutos, constituindo o caminho de movimentação das bateladas desde a origem até o destino. A importância desta representação justifica-se quando se analisa a geração das variáveis adotadas na implementação do modelo matemático, cujos índices são elementos de conjuntos esparsos, gerados de acordo com a carteira de bateladas fornecida pelo módulo de Alocação de Recursos.

A Figura 8 mostra o grafo utilizado para representar a rede de dutos, sendo os nós correspondentes às áreas e os arcos correspondentes aos trechos de duto interligando as áreas (arcos bidirecionais representam dutos que podem movimentar produtos em ambas as direções). Em particular, a Figura 8 ilustra a rota a ser utilizada por uma batelada b com origem em no_b=3 e destino em nd_b=8.

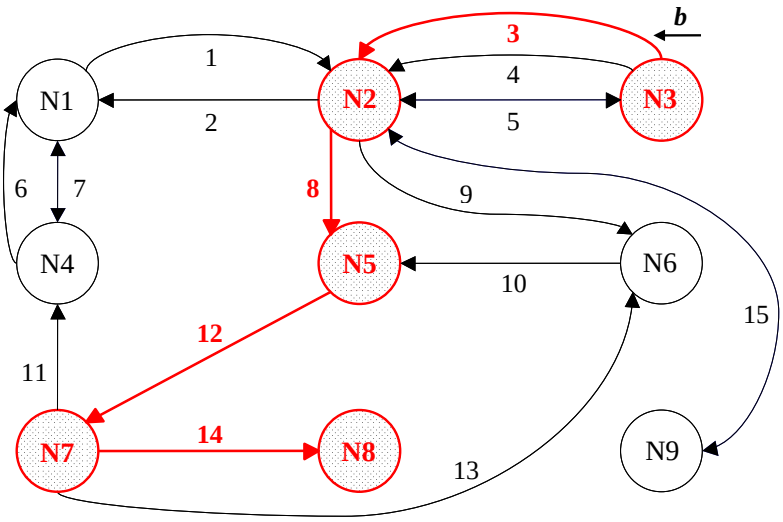

Figura 8 – Caminho da rota de fluxo rfx_b

Para cada batelada, onde a rota de movimentação é fornecida pelo módulo de Alocação de Recursos, apenas as variáveis de interesse são criadas e utilizadas pelo modelo matemático. Os exemplos que seguem descrevem esse procedimento:

Variáveis de bombeio e recebimento

De forma simplificada, a estrutura do modelo utiliza variáveis que determinam o instante exato em que o procedimento de envio de uma batelada $b \in B$ inicia ($ib_{b,n,n1,d}$) e termina ($fb_{b,n,n1,d}$), em relação a uma determinada área n, através de um duto específico $d \in D$, que conecta a área n a $n1 \in N$, $n \neq n1$. Ou seja, o início de entrada do produto no duto d. De forma similar, são utilizadas variáveis que determinam os tempos em que uma área inicia ($ir_{b,n,n1,d}$) e

termina o recebimento ($fr_{b,n,n1,d}$) de uma batelada ($b \in B$). Ou seja, o instante em que o produto sai do duto d.

A tupla $(b,n,n1,d)$ associada aos índices das variáveis $ib_{b,n,n1,d}$, $fb_{b,n,n1,d}$, $ir_{b,n,n1,d}$ e $fr_{b,n,n1,d}$ assume um conjunto de combinações em função da rota de fluxo, pois esta determina os valores de n, $n1$ e d. Considerando i a posição sequencial dentro da rota de fluxo rfx_b, mostrada na Figura 8, a sequencia de áreas e dutos assume os seguintes valores: $n = [rfx_b, i]$, $n1 = [rfx_b, i+2]$ e $d = [rfx_b, i+1]$, para i = 1,3,5,7. O limite do fator i é função do comprimento das rotas de fluxo cadastradas, sendo que a maior rota em utilização pela rede em estudo possui atualmente 5 áreas e 4 trechos de dutos ($i = 7$, correspondendo a 9 elementos no total). Considerando a rota de fluxo da Figura 8, esta combinação gera para a batelada $b = 1$ o seguinte conjunto de índices:

$$\begin{aligned}(b,n,n1,d) \quad \in \quad & \{(1,3,2,3), (1,2,5,8), \\ & (1,5,7,12), (1,7,8,14)\}\end{aligned}$$

Neste exemplo específico, a batelada b é bombeada da área N3 para a área N2 através do duto 3, sendo deslocada em seguida da área N2 para a área N5 através do duto 8, e assim consecutivamente até a área de destino N8, através do duto 14. Deve-se ressaltar que a movimentação da batelada b depende da existência de outras bateladas que a empurrem até a área de recebimento. Limitar o número de rotas possíveis que uma batelada pode assumir, não apenas reduz o número de variáveis de bombeio e recebimento, como também reduz o número de variáveis a elas associadas. Além disso, novas rotas de fluxo podem ser cadastradas e utilizadas pelo modelo matemático, tornando flexível a geração de novos cenários de programação.

Variáveis de parada

Para as variáveis de tempos de parada ($ip_{b,d}, fp_{b,d}$), a batelada b é associada a todos os dutos d ao longo da rota de fluxo:

$$\begin{aligned}(b,d) \quad \in \quad & \{(1,3),(1,8), \\ & (1,12),(1,14)\}\end{aligned}$$

As paradas relacionadas à batelada b podem ocorrer não apenas no duto adjacente à área de bombeio, mas em todos os trechos de duto da rota de movimentação considerada (3,8,12 e 14), para o exemplo da Figura 8.

Variáveis de adiantamento e atraso

As variáveis de tempo de adiantamento e atraso no envio ($ao_{b,n}, do_{b,n}$) e recebimento ($ad_{b,n}, dd_{b,n}$), relacionam-se com as áreas de origem no_b e destino nd_b, respectivamente. Para o exemplo dado,

$$(b,n) \quad \in \quad \{(1,3),(1,8)\}$$

Variáveis de horossazonalidade e troca de turno

As variáveis $x_{b,n,h}$, $w_{b,n,h}$, $y_{b,n,h}$ e $z_{b,n,h}$, utilizadas para determinar a ocorrência de parada de bombeio da batelada b, na área de origem de bombeio $n \in N_{HOR}$, durante o horário de ponta $h \in HP$, são relacionadas à tupla (b,n,h). O conjunto de índices são relativos à origem de bombeio da batelada (no_b), sendo que h corresponde à posição dos vetores ih e fh ao longo do horizonte de programação. O vetor ih contém os horários de início dos períodos de horossazonalidade e o vetor fh contém os horários de término desses períodos. O exemplo abaixo considera o conjunto de índices para o horizonte de uma semana (dias úteis):

$$\begin{aligned}(b,n,h) \quad \in \quad & \{(1,3,2),(1,3,3),(1,3,4),\\ & (1,3,5),(1,3,6)\}\end{aligned}$$

As variáveis utilizadas nas restrições de troca de turno, como por exemplo $ttib_{b,n,tr}$, $tt1ib_{b,n,tr}$ e $tt2ib_{b,n,tr}$, referentes ao início de bombeio de uma batelada b, na área de origem de bombeio $n \in N_{TT}$, durante o período de troca $tr \in TT$, são relacionadas à tupla (b,n,tr). Os índices são relativos à origem de bombeio da batelada (no_b), sendo que tr corresponde à posição dos vetores it e ft ao longo do horizonte de programação. O vetor it aponta os horários de início dos períodos de troca de turno e o vetor ft contém os horários de término desses períodos. Para um mesmo dia de programação, existem três períodos de troca de turno. Para os demais conjuntos de variáveis de troca de turno (final de bombeio na origem, início e final de recebimento no destino), a lógica de geração é similar. O exemplo a seguir considera o conjunto de índices para os primeiros dois dias de programação:

$$\begin{aligned}(b,n,tr) \quad \in \quad & \{(1,3,1),(1,3,2),(1,3,3),\\ & (1,3,4),(1,3,5),(1,3,6)\}\end{aligned}$$

A forma esparsa de geração das variáveis, além de reduzir o tempo computacional de resolução do modelo matemático, auxilia na construção e formulação das restrições consideradas no problema.

4.2.3 Função Objetivo

A função objetivo (FO), descrita pela equação 3, consiste na minimização dos tempos associados às operações de bombeio ($ib_{b,n,n1,d}, fb_{b,n,n1,d}$) e recebimento ($ir_{b,n,n1,d}, fr_{b,n,n1,d}$) de produtos (*makespan*), tempos de parada em duto ($fp_{b,d} - ip_{b,d}$), adiantamento e atraso de bombeio de produtos nas origens ($ao_{b,n}, do_{b,n}$), adiantamento e atraso de recebimento de produtos nos destinos ($ad_{b,n}, dd_{b,n}$) e violações dos períodos de troca de turno ($ttib_{b,n,tr}, ttfb_{b,n,tr}, ttir_{b,n,tr}$, $ttfr_{b,n,tr}$).

$$
\begin{aligned}
&\text{minimizar} \\
&\quad \sum_{b\in B}\sum_{n\in N}\sum_{\substack{n1\in N,\\ n1\neq n}}\sum_{d\in D}(ib_{b,n,n1,d} + fb_{b,n,n1,d} + ir_{b,n,n1,d} + fr_{b,n,n1,d})\cdot ktb \\
+ &\quad \sum_{b\in B}\sum_{d\in D}(fp_{b,d} - ip_{b,d})\cdot ktp \\
+ &\quad \sum_{\substack{b\in B,\\ n=no_b}}(ao_{b,n} + do_{b,n})\cdot kto \quad + \quad \sum_{\substack{b\in B,\\ n=nd_b}}(ad_{b,n} + dd_{b,n})\cdot ktd \\
+ &\quad \sum_{b\in B}\sum_{n\in N}\sum_{tr\in TT}(ttib_{b,n,tr} + ttfb_{b,n,tr} + ttir_{b,n,tr} + ttfr_{b,n,tr})\cdot ktt
\end{aligned}
\tag{3}
$$

A função objetivo é ponderada por fatores de custos operacionais (ktb, ktp, kto, ktd e ktt), onde pesos podem ser definidos de forma a penalizar a solução em relação à satisfação de estoques através das janelas de tempo, prioridade das operações de bombeio/recebimento em relação às áreas de origem/destino, tempos de parada e violações dos períodos de troca de turno. Desta forma, uma série de fatores podem ser considerados a fim de determinar uma condição de escalonamento que atenda as movimentações de produtos durante o horizonte de programação.

4.2.4 Restrições

Além da função objetivo, o modelo de otimização é sujeito a uma série de restrições operacionais, expressas por equações ou inequações, numeradas de 4 até 97. A restrição 4 define o início das operações de bombeio ($ib_{b,n,n1,d}$) em relação ao horizonte de referência de programação H_{REF}.

$$
\begin{gathered}
ib_{b,n,n1,d} \geq H_{REF} \\
b \in B\ (b > nb_{INI}), n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), d \in D
\end{gathered}
\tag{4}
$$

As restrições 5 a 8 determinam a precedência temporal entre as variáveis de envio e recebimento de uma dada batelada b.

$$ib_{b,n,n1,d} \leq fb_{b,n,n1,d} \quad b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), d \in D \tag{5}$$

$$ir_{b,n,n1,d} \leq fr_{b,n,n1,d} \quad b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), d \in D \tag{6}$$

$$ib_{b,n,n1,d} \leq ir_{b,n,n1,d} \quad b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), d \in D \tag{7}$$

$$fb_{b,n,n1,d} \leq fr_{b,n,n1,d} \quad b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), d \in D \tag{8}$$

As restrições 9 a 11 identificam o tempo em que a batelada b ficou parada no duto d, até uma batelada $b1$ empurrá-la. A diferença $(fp_{b,d} - ip_{b,d})$, que indica o tempo total de parada, deve ser minimizada na função objetivo.

$$ip_{b,d} = fb_{b,n,n1,d} \quad b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), d \in D \tag{9}$$

$$fp_{b,d} = ib_{b1,n,n1,d} \quad b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), d \in D \tag{10}$$

$$ip_{b,d} \leq fp_{b,d} \quad b \in B, d \in D \tag{11}$$

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, apesar de passíveis de violação sob penalização na função objetivo. As variáveis $ao_{b,n}$ e $do_{b,n}$ armazenam as violações no tempo de envio de uma batelada b, com origem na área de oferta n, em relação à janela de tempo de liberação (restrições 12 e 13).

$$ib_{b,n,n1,d} \geq ted_b - ao_{b,n} \quad b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D \tag{12}$$

$$ib_{b,n,n1,d} \leq tec_b + do_{b,n} \quad b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D \tag{13}$$

Da mesma forma, em relação a uma área de demanda de produtos, os tempos de recebimento disponível (trd_b) e recebimento crítico (trc_b) de uma batelada b devem ser respeitados. As variáveis $ad_{b,n}$ e $dd_{b,n}$ armazenam as violações no tempo de recebimento de uma batelada b,

na área de demanda $n1$, em relação à janela de tempo fornecida (restrições 14 e 15). As variáveis de relaxação relacionadas ao bombeio na origem ($ao_{b,n}$ e $do_{b,n}$) e ao recebimento de produtos no destino ($ad_{b,n}$ e $dd_{b,n}$) informam indiretamente as violações de tancagem que ocorrem nestas áreas. Além de tornar a resolução do modelo factível, as variáveis de relaxação quantificam as violações e apontam quais áreas e bateladas estão envolvidas com atrasos e adiantamentos de bombeio e recebimento de produtos.

$$\begin{aligned} ir_{b,n,n1,d} &\geq trd_b - ad_{b,n1} \\ b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), n1 = nd_b, d \in D \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} ir_{b,n,n1,d} &\leq trc_b + dd_{b,n1} \\ b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), n1 = nd_b, d \in D \end{aligned} \tag{15}$$

Em relação a uma origem n, a sequencia de bombeio pré-estabelecida pela carteira de bateladas deve ser respeitada. A batelada $b1$ é bombeada logo após a batelada b (restrição 16).

$$\begin{aligned} ib_{b1,n,n1,d} &\geq fb_{b,n,n1,d} + fp_{b,d} - ip_{b,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), d \in D \end{aligned} \tag{16}$$

Em relação a um destino $n1$, o início de recebimento da batelada $b1$ deve ocorrer após o término de recebimento de b. Não seria possível receber $b1$ antecipadamente, pois b e $b1$ são bombeados da mesma origem n e pelo mesmo duto d (restrição 17).

$$\begin{aligned} ir_{b1,n,n1,d} &\geq fr_{b,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), d \in D \end{aligned} \tag{17}$$

O tempo referente ao início de bombeio de uma batelada b em uma área intermediária $n1$ deve ser maior ou igual ao tempo de início de recebimento de b nessa área (restrição 18).

$$\begin{aligned} ib_{b,n1,n2,d1} &\geq ir_{b,n,n1,d} \\ b \in B, n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1) \end{aligned} \tag{18}$$

O tempo referente ao final de bombeio de uma batelada b, em uma área intermediária $n1$, deve ser maior ou igual ao tempo de final de recebimento de b nessa área (restrição 19).

$$\begin{aligned} fb_{b,n1,n2,d1} &\geq fr_{b,n,n1,d} \\ b \in B, n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1) \end{aligned} \tag{19}$$

Em relação a uma área intermediária $n1$, a restrição 20 garante que o bombeio de b ocorra em passagem, caracterizando o alinhamento dos dutos d e $d1$.

$$\begin{aligned} ib_{b,n1,n2,d1} &= ir_{b,n,n1,d} \\ b \in B, n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1) \end{aligned} \tag{20}$$

Uma batelada b é recebida na área adjacente (intermediária) $n1$ quando deslocar todo o volume do duto d. Deve-se notar que a vazão de recebimento da batelada b é função apenas de sua vazão de bombeio, devido a condição $vol_b \geq vol_d$ ser verificada. A janela temporal descrita é dada pela restrição 21.

$$\begin{aligned} ir_{b,n,n1,d} &\geq ib_{b,n,n1,d} + vol_d/vaz_b \\ b \in B, n \text{ e } n1 &\in N\ (n \neq n1), d \in D, \\ &\text{para } vol_b \geq vol_d \end{aligned} \tag{21}$$

Para o caso em que $vol_b < vol_d$, a vazão de recebimento da batelada b será composta por sua vazão e pela vazão da batelada $b1$ que a desloca. Esta condição é válida apenas quando o volume de $b1$ for maior ou igual à diferença $(vol_d - vol_b)$ (restrição 22).

$$\begin{aligned} ir_{b,n,n1,d} &\geq ib_{b1,n,n1,d} + (vol_d - vol_b)/vaz_{b1} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 &\in N\ (n \neq n1), d \in D, \\ &\text{para } vol_b < vol_d, vol_{b1} \geq (vol_d - vol_b) \end{aligned} \tag{22}$$

As restrições 23 a 25 atendem a condição $vol_b \geq (vol_d + vol_{d1})$. O volume da batelada b, com origem em n, alcança a área intermediária $n2$ através de dois trechos de duto (d e $d1$).

$$\begin{aligned} ir_{b,n1,n2,d1} &\geq ib_{b,n1,n2,d1} + vol_{d1}/vaz_b \\ b \in B, n1 \text{ e } n2 &\in N\ (n1 \neq n2), d1 \in D, \\ &\text{para } vol_b \geq (vol_d + vol_{d1}), n = no_b \end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned} ib_{b,n1,n2,d1} &\geq ir_{b,n,n1,d} \\ b \in B, n1 \text{ e } n2 \in N\ (n1 \neq n2), n = no_b, d \text{ e } d1 &\in D\ (d \neq d1), \\ &\text{para } vol_b \geq (vol_d + vol_{d1}) \end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned} ib_{b,n2,n3,d2} &\geq ir_{b,n1,n2,d1} \\ b \in B, n1 \text{ e } n2 \text{ e } n3 \in N\ (n1 \neq n2 \neq n3), d1 \text{ e } d2 &\in D\ (d1 \neq d2), \\ &\text{para } vol_b \geq (vol_d + vol_{d1}), n = no_b \end{aligned} \tag{25}$$

A restrição 26 define o tempo mínimo do bloco temporal de uma batelada b em relação a sua origem de bombeio. A diferença dada por $(fb_{b,n,n1,d} - ib_{b,n,n1,d})$ reflete o tempo de acionamento do conjunto de bombas durante a operação de bombeio. O fator $\sum_{\substack{b \in B, \\ n = no_b}} \sum_{h \in HP} z_{b,n,h} \cdot dp_h$ representa as paradas de bombeio em função da tarifação horossazonal que podem ocorrer nos intervalos $h \in HP$, nas áreas $n \in N_{HOR}$ sujeitas à tarifação de energia elétrica durante o horário de ponta. Cada parada possui a duração dp_h, sendo que em função do volume da batelada b a ser bombeada, é possível a ocorrência de várias paradas ao longo do horizonte de programação,

o que é caracterizado pela variável binária $z_{b,n,h}$. As restrições referentes à horossazonalidade serão detalhadas adiante.

$$\begin{aligned} fb_{b,n,n1,d} - ib_{b,n,n1,d} \geq vol_b/vaz_b + \sum_{\substack{b\in B,\\ n=no_b}} \sum_{h\in HP} z_{b,n,h} \cdot dp_h \\ b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D \end{aligned} \tag{26}$$

Para o caso em que $vol_b \geq vol_d$, a duração do tempo de bombeio da batelada b na área intermediária $n1$ é dada pela restrição 27.

$$\begin{aligned} fb_{b,n1,n2,d1} - ib_{b,n1,n2,d1} \geq (vol_b - vol_d)/vaz_b + \sum_{\substack{b\in B,\\ n=no_b}} \sum_{h\in HP} z_{b,n,h} \cdot dp_h \\ b \in B, n1 \text{ e } n2 \in N\ (n1 \neq n2), d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), \\ \text{para } vol_b \geq vol_d, n = no_b \end{aligned} \tag{27}$$

A restrição 28 define o tempo mínimo do bloco temporal de uma batelada b em relação ao seu recebimento na área adjacente $n1$. A restrição é válida quando o volume da batelada $b1$ for suficiente para deslocar b até $n1$.

$$\begin{aligned} fr_{b,n,n1,d} \geq fb_{b,n,n1,d} + vol_d/vaz_{b1} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b = no_{b1}, d \in D, \\ \text{para } vol_b \geq vol_d, vol_{b1} \geq vol_d \end{aligned} \tag{28}$$

A restrição 29 define o tempo mínimo do bloco temporal de uma batelada b em relação ao seu recebimento na área adjacente $n1$, considerando que o volume da batelada $b1$ não seja suficiente para deslocar b até $n1$. Neste caso, no deslocamento da diferença de volume $(vol_d - vol_b)$, a vazão de uma terceira batelada $b2$ deve ser considerada.

$$\begin{aligned} fr_{b,n,n1,d} \geq fb_{b,n,n1,d} + vol_{b1}/vaz_{b1} + (vol_d - vol_{b1})/vaz_{b2} \\ b \text{ e } b1 \text{ e } b2 \in B\ (b < b1 < b2), n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), \\ n = no_b = no_{b1} = no_{b2}, d \in D, \\ \text{para } vol_{b1} < vol_d \end{aligned} \tag{29}$$

Para uma área intermediária $n1$, a relação entre os tempos de envio e recebimento seguem uma precedência (30).

$$\begin{aligned} fb_{b,n1,n2,d1} - ib_{b,n1,n2,d1} \geq fr_{b,n,n1,d} - ir_{b,n,n1,d} \\ + \sum_{\substack{b\in B,\\ n=no_b}} \sum_{h\in HP} z_{b,n,h} \cdot dp_h \\ b \in B, n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), n \neq no_b, \\ d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1) \end{aligned} \tag{30}$$

As restrições 31 a 35 calculam as janelas de tempo de bombeio envolvendo o volume e a vazão de até quatro bateladas com origem na mesma área n. Devido ao tamanho típico das bateladas normalmente movimentadas, o compartilhamento simultâneo de um trecho de duto por no máximo quatro bateladas é uma premissa operacional válida. A restrição 31 é verificada para as condições $vol_b \geq vol_d$ e $vol_{b1} \geq vol_d$.

$$\begin{aligned} fb_{b,n1,n2,d1} - ib_{b,n1,n2,d1} \geq (vol_b - vol_d)/vaz_b + vol_d/vaz_{b1} \\ + \sum_{\substack{b \in B, \\ n=no_b}} \sum_{h \in HP} z_{b,n,h} \cdot dp_h \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n1 \text{ e } n2 \in N\ (n1 \neq n2), d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), \\ \text{para } vol_b \geq vol_d, vol_{b1} \geq vol_d, n = no_b = no_{b1} \end{aligned} \tag{31}$$

A restrição 32 é válida para as condições $vol_b < vol_d$ e $vol_{b1} \geq vol_d$, sendo que o volume da batelada b é totalmente deslocado à vazão da batelada $b1$.

$$\begin{aligned} fb_{b,n1,n2,d1} - ib_{b,n1,n2,d1} \geq vol_b/vaz_{b1} + \sum_{\substack{b \in B, \\ n=no_b}} \sum_{h \in HP} z_{b,n,h} \cdot dp_h \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n1 \text{ e } n2 \in N\ (n1 \neq n2), d1 \in D, \\ \text{para } vol_b < vol_d, vol_{b1} \geq vol_d, n = no_b = no_{b1} \end{aligned} \tag{32}$$

Caso o volume da batelada $b1$ não seja suficiente para movimentar a batelada b até a área $n1$, a vazão de uma terceira batelada $b2$ deve ser considerada no deslocamento da diferença de volume $(vol_d - vol_{b1})$, desde que a relação $(vol_{b1} + vol_{b2}) \geq vol_d$ seja verdadeira (restrição 33).

$$\begin{aligned} fb_{b,n1,n2,d1} - ib_{b,n1,n2,d1} \geq vol_{b1}/vaz_{b1} + (vol_d - vol_{b1})/vaz_{b2} \\ + \sum_{\substack{b \in B, \\ n=no_b}} \sum_{h \in HP} z_{b,n,h} \cdot dp_h \\ b \text{ e } b1 \text{ e } b2 \in B\ (b < b1 < b2), n1 \text{ e } n2 \in N\ (n1 \neq n2), \\ d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), \\ \text{para } vol_b < vol_d, vol_{b1} < vol_d, \\ (vol_{b1} + vol_{b2}) \geq vol_d, n = no_b = no_{b1} = no_{b2} \end{aligned} \tag{33}$$

A restrição 34 considera três valores de vazão na composição da janela de tempo de bombeio a partir da área de origem n.

$$\begin{aligned} fb_{b,n1,n2,d1} - ib_{b,n1,n2,d1} \geq (vol_b - vol_d)/vaz_b + vol_{b1}/vaz_{b1} \\ +(vol_d - vol_{b1})/vaz_{b2} + \sum_{\substack{b \in B, \\ n=no_b}} \sum_{h \in HP} z_{b,n,h} \cdot dp_h \\ b \text{ e } b1 \text{ e } b2 \in B\ (b < b1 < b2), n1 \text{ e } n2 \in N\ (n1 \neq n2), \\ d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), \\ \text{para } vol_b \geq vol_d, vol_{b1} < vol_d, \\ (vol_{b1} + vol_{b2}) \geq vol_d, n = no_b = no_{b1} = no_{b2} \end{aligned} \tag{34}$$

Finalmente, a restrição 35 determina a janela de bombeio na origem envolvendo o compartilhamento do mesmo trecho de duto por até quatro bateladas.

$$\begin{aligned} fb_{b,n1,n2,d1} - ib_{b,n1,n2,d1} \geq (vol_b - vol_d)/vaz_b + vol_{b1}/vaz_{b1} \\ +(vol_d - vol_{b1})/vaz_{b2} + (vol_d - vol_{b1} - vol_{b2})/vaz_{b3} \\ + \sum_{\substack{b \in B, \\ n=no_b}} \sum_{h \in HP} z_{b,n,h} \cdot dp_h \\ b \text{ e } b1 \text{ e } b2 \text{ e } b3 \in B\ (b < b1 < b2 < b3), n1 \text{ e } n2 \in N\ (n1 \neq n2), \\ d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), \\ \text{para } vol_b \geq vol_d, vol_{b1} < vol_d, \\ (vol_{b1} + vol_{b2}) < vol_d, n = no_b = no_{b1} = no_{b2} = no_{b3} \end{aligned} \tag{35}$$

As restrições 36 a 40 calculam as janelas de tempo de envio em até 4 trechos de dutos ao longo de uma rota de fluxo, envolvendo o volume e a vazão de duas bateladas ($b1$ movimentando b). Para a situação em que a origem da batelada $b1$ é n, a restrição 36 calcula a janela de tempo de envio da batelada b a partir da área intermediária $n2$.

$$\begin{aligned} fb_{b,n2,n3,d2} - ib_{b,n2,n3,d2} \geq (vol_b - vol_d - vol_{d1})/vaz_b \\ +(vol_d + vol_{d1})/vaz_{b1} + \sum_{\substack{b \in B, \\ n=no_b}} \sum_{h \in HP} z_{b,n,h} \cdot dp_h \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n2 \text{ e } n3 \in N\ (n2 \neq n3), \\ d \text{ e } d1 \text{ e } d2 \in D\ (d \neq d1 \neq d2), \\ \text{para } vol_b \geq (vol_d + vol_{d1}), \\ vol_{b1} \geq (vol_d + vol_{d1}), n = no_b = no_{b1} \end{aligned} \tag{36}$$

Para a condição em que a origem da batelada $b1$ é $n1$, a restrição 37 calcula a janela de tempo de envio da batelada b a partir da área intermediária $n2$, desde que a condição $vol_b \geq (vol_d + vol_{d1})$ seja verificada.

$$\begin{aligned} fb_{b,n2,n3,d2} - ib_{b,n2,n3,d2} \geq (vol_b - vol_d - vol_{d1})/vaz_b \\ +vol_{d1}/vaz_{b1} + \sum_{\substack{b \in B, \\ n=no_b}} \sum_{h \in HP} z_{b,n,h} \cdot dp_h \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n2 \text{ e } n3 \in N\ (n2 \neq n3), \\ d \text{ e } d1 \text{ e } d2 \in D\ (d \neq d1 \neq d2), \\ \text{para } vol_b \geq (vol_d + vol_{d1}), vol_{b1} \geq vol_{d1}, n = no_b, n1 = no_{b1} \end{aligned} \tag{37}$$

De forma semelhante, quando a origem da batelada $b1$ é $n1$, a restrição 38 calcula a janela de tempo de envio da batelada b a partir da área intermediária $n2$, considerando a condição $vol_b < vol_d$.

$$\begin{aligned} fb_{b,n2,n3,d2} - ib_{b,n2,n3,d2} \geq vol_b/vaz_{b1} + \sum_{\substack{b \in B, \\ n=no_b}} \sum_{h \in HP} z_{b,n,h} \cdot dp_h \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n2 \text{ e } n3 \in N\ (n2 \neq n3), d2 \in D, \\ \text{para } vol_b < vol_d, vol_{b1} \geq vol_{d1}, n = no_b, n1 = no_{b1} \end{aligned} \tag{38}$$

Para a condição em que a origem da batelada $b1$ é $n2$, a restrição 39 calcula a janela de tempo de envio da batelada b a partir da área intermediária $n2$.

$$\begin{aligned} fb_{b,n2,n3,d2} - ib_{b,n2,n3,d2} \geq (vol_b - vol_d - vol_{d1})/vaz_b \\ +vol_{d2}/vaz_{b1} + \sum_{\substack{b \in B, \\ n=no_b}} \sum_{h \in HP} z_{b,n,h} \cdot dp_h \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n2 \text{ e } n3 \in N\ (n2 \neq n3), n2 = no_{b1}, \\ d \text{ e } d1 \text{ e } d2 \in D\ (d \neq d1 \neq d2), \\ \text{para } vol_b \geq (vol_d + vol_{d1}), vol_{b1} \geq vol_{d2}, n = no_b \end{aligned} \tag{39}$$

Para a condição em que a origem da batelada $b1$ é $n3$, a restrição 40 calcula a janela de tempo de envio da batelada b a partir da área intermediária $n3$.

$$\begin{aligned} fb_{b,n3,n4,d3} - ib_{b,n3,n4,d3} \geq (vol_b - vol_d - vol_{d1})/vaz_b \\ +vol_{d3}/vaz_{b1} + \sum_{\substack{b \in B, \\ n=no_b}} \sum_{h \in HP} z_{b,n,h} \cdot dp_h \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n3 \text{ e } n4 \in N\ (n3 \neq n4), n3 = no_{b1}, \\ d \text{ e } d1 \text{ e } d3 \in D\ (d \neq d1 \neq d3), \\ \text{para } vol_b \geq (vol_d + vol_{d1}), vol_{b1} \geq (vol_{d3}), n = no_b \end{aligned} \tag{40}$$

A ocorrência de tarifação horossazonal de energia elétrica ao longo do horizonte de programação da rede de dutos em estudo deve ser considerada na modelagem do problema. Como descrito na seção 3.3, em determinadas áreas operacionais, todas as operações de bombeio devem ser interrompidas no horário de ponta. A Figura 19 ilustra diferentes ocorrências de bombeio de uma dada batelada b em relação à janela de tarifação. Nesta abordagem, considera-se proibitivo o início de bombeio ($ib_{b,n,n1,d}$) entre os instantes ih_h e fh_h, restando detectar apenas as possibilidades 2 e 3 de interseção com o horário de ponta h. A formulação apresentada a seguir para modelar as situações de tarifação horossazonal e troca de turno foi inicialmente desenvolvida nos trabalhos de Magatão (2005) e Stebel (2006) e estruturada através de técnicas em MILP.

As restrições 41 a 50 identificam a ocorrência de parada de bombeio das bateladas associadas às áreas $n \in N_{HOR}$, sujeitas à tarifação de energia elétrica durante o horário de ponta (dias úteis da semana). Para identificar se uma operação de bombeio encontra-se dentro do período de tarifação $h \in HP$, foram criadas as variáveis binárias $x_{b,n,h}$, $w_{b,n,h}$, $y_{b,n,h}$ e $z_{b,n,h}$.

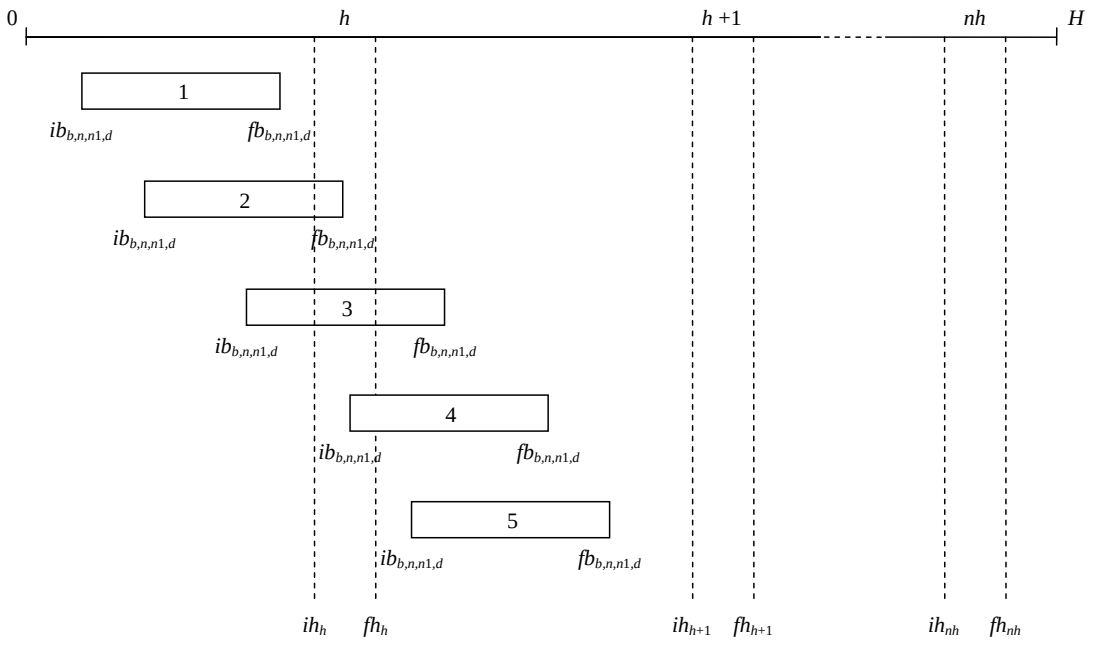

Figura 9 – Tarifação horossazonal

As restrições 41 a 44 fazem a verificação dos tempos de início de bombeio ($ib_{b,n,n1,d}$) em relação à janela do horário de ponta, formada pelos instantes ih_h e fh_h. Em particular, as restrições 43 e 44 garantem que o início de bombeio ($ib_{b,n,n1,d}$) não ocorra dentro da janela de

tarifação, evitando a situação 4 ilustrada na Figura 19.

$$ih_h - ib_{b,n,n1,d} \geq (1 - x_{b,n,h}) \cdot (-M) \quad b \in B, n \in N_{HOR}, n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D, h \in HP \tag{41}$$

$$ih_h - ib_{b,n,n1,d} \leq x_{b,n,h} \cdot (M + eps) - eps \quad b \in B, n \in N_{HOR}, n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D, h \in HP \tag{42}$$

$$ib_{b,n,n1,d} - ih_h \leq (1 - w_{b,n,h}) \cdot (M + eps) - eps \quad b \in B, n \in N_{HOR}, n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D, h \in HP \tag{43}$$

$$ib_{b,n,n1,d} - fh_h \geq w_{b,n,h} \cdot (-M) \quad b \in B, n \in N_{HOR}, n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D, h \in HP \tag{44}$$

As restrições 45 e 46 fazem a verificação dos tempos de final de bombeio ($fb_{b,n,n1,d}$) em relação ao início do horário de ponta (ih_h).

$$fb_{b,n,n1,d} - ih_h \geq (1 - y_{b,n,h}) \cdot (-M) \quad b \in B, n \in N_{HOR}, n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D, h \in HP \tag{45}$$

$$fb_{b,n,n1,d} - ih_h \leq y_{b,n,h} \cdot (M + eps) - eps \quad b \in B, n \in N_{HOR}, n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D, h \in HP \tag{46}$$

As restrições 47 a 49 realizam a operação *AND* entre as variáveis binárias ($z_{b,n,h} = x_{b,n,h} \wedge y_{b,n,h}$)[1]. Desta forma, quando $z_{b,n,h} = 1$, a operação de bombeio da batelada $b \in B$, na área $n \in N_{HOR}$ encontra-se dentro do horário de ponta $h \in HP$. Para cada incidência de horossazonalidade, a variável $z_{b,n,h}$ é ativada e soma-se ao tempo de bombeio da batelada o tempo dp_h, representando uma parada equivalente ao intervalo h. A variável $z_{b,n,h}$ é utilizada em conjunto com as restrições que calculam as janelas de tempo referentes às operações de bombeio, totalizando todas as paradas por horossazonalidade que uma batelada b sofre ao longo do horizonte de escalonamento.

$$z_{b,n,h} \leq x_{b,n,h} \quad b \in B, n \in N_{HOR}, n = no_b, h \in HP \tag{47}$$

$$z_{b,n,h} \leq y_{b,n,h} \quad b \in B, n \in N_{HOR}, n = no_b, h \in HP \tag{48}$$

$$z_{b,n,h} \geq x_{b,n,h} + y_{b,n,h} - 1 \quad b \in B, n \in N_{HOR}, n = no_b, h \in HP \tag{49}$$

[1] A operação *AND* envolvendo variáveis binárias é bem conhecida. Para $c = a \wedge b$, sendo a e b variáveis binárias, a formulação equivalente da operação *AND* é composta pelo seguinte conjunto de inequações: $c \leq a, c \leq b$ e $c \geq a + b - 1$ (SCHRAGE, 2000).

Conforme as considerações feitas na seção 3.3, operações de envio e recebimento não devem ser iniciadas ou concluídas durante os períodos de troca de turno de trabalho. Durante estes intervalos, normalmente de 1 hora para a rede de dutos em estudo, evita-se que manobras complexas que exijam alinhamentos de dutos, recebimento e envio de produtos em tanques sejam realizadas, sendo que operações já em andamento não devem ser afetadas.

Uma determinada área operacional pode ter mais de um período de troca de turno especificado (normalmente 3 vezes ao dia) e os períodos de troca de turno devem ser cumpridos durante todos os dias do período de planejamento. Na Figura 10 estão destacadas as situações que devem ser evitadas. Transições relacionadas ao início e término das atividades de bombeio e recebimento devem ser adiantadas ou adiadas em relação aos instantes it_{tr} e ft_{tr}.

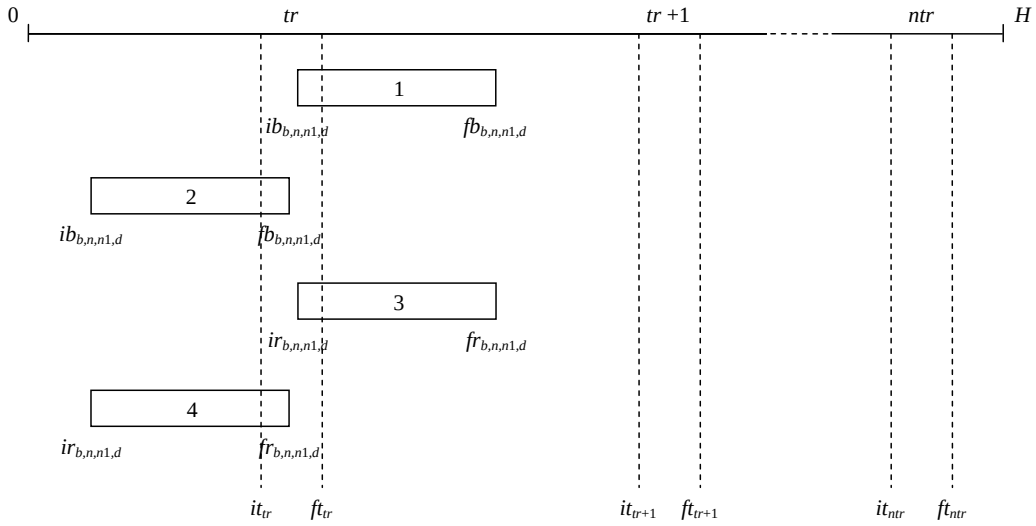

Figura 10 – Períodos de troca de turno de trabalho

As restrições 50 a 56, a exemplo da modelagem de horossazonalidade, utilizam estruturas MILP para detectar a interseção das variáveis ($ib_{b,n,n1,d}$), ($fb_{b,n,n1,d}$), ($ir_{b,n,n1,d}$) e ($fr_{b,n,n1,d}$) em relação aos vetores tr associados às áreas $n \in N_{TT}$ sujeitas à troca de turno de trabalho. Com exceção do entroncamento N6, onde são realizadas apenas operações de passagem, as demais áreas sofrem trocas de turno em períodos determinados. Para identificar se uma operação de bombeio encontra-se dentro do intervalo de troca $tr \in TT$, foram criados conjuntos de variáveis binárias relacionadas à cada um das operações de bombeio e recebimento.

As restrições 50 a 53 fazem a verificação dos tempos de início de bombeio ($ib_{b,n,n1,d}$) em relação ao tempo de início it_{tr} e término ft_{tr} da troca de turno correspondente (situação 1 ilustrada na Figura 10). A variável binária $tt1ib_{b,n,tr}$ indica se $ib_{b,n,n1,d}$ é maior ou igual a it_{tr} ($tt1ib_{b,n,tr} = 1$), caso contrário ($tt1ib_{b,n,tr} = 0$), $ib_{b,n,n1,d}$ é menor que it_{tr}. Da mesma forma, a variável binária $tt2ib_{b,n,tr}$ indica se $ib_{b,n,n1,d}$ é menor ou igual a ft_{tr} ($tt2ib_{b,n,tr} = 1$), caso contrário, $ib_{b,n,n1,d}$ é maior que ft_{tr} ($tt2ib_{b,n,tr} = 0$).

$$ib_{b,n,n1,d} - it_{tr} \geq (1 - tt1ib_{b,n,tr}) \cdot (-M) \quad b \in B, n \in N_{TT}, n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D, tr \in TT \tag{50}$$

$$ib_{b,n,n1,d} - it_{tr} \leq tt1ib_{b,n,tr} \cdot (M + eps) - eps \quad b \in B, n \in N_{TT}, n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D, tr \in TT \tag{51}$$

$$ib_{b,n,n1,d} - ft_{tr} \leq (1 - tt2ib_{b,n,tr}) \cdot M \quad b \in B, n \in N_{TT}, n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D, tr \in TT \tag{52}$$

$$ib_{b,n,n1,d} - ft_{tr} \geq tt2ib_{b,n,tr} \cdot (-M - eps) + eps \quad b \in B, n \in N_{TT}, n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D, tr \in TT \tag{53}$$

As restrições 54 a 56 realizam a operação *AND* entre as variáveis binárias ($ttib_{b,n,tr} = tt1ib_{b,n,tr} \wedge tt2ib_{b,n,tr}$). Desta forma, quando $ttib_{b,n,tr} = 1$, a operação de início de bombeio da batelada $b \in B$, na área de origem $n \in N_{TT}$ encontra-se dentro do período de troca de turno $tr \in TT$. Para que ocorra a penalização do início de bombeio de uma batelada durante o intervalo de troca de turno, a variável $ttib_{b,n,tr}$ foi incorporada à função objetivo de minimização dos custos operacionais. Além disso, deve-se ponderar o custo associado à satisfação de estoques com o custo da troca de turno, de forma que o atendimento das janelas de tempo tenha uma prioridade maior.

$$ttib_{b,n,tr} \leq tt1ib_{b,n,tr} \quad b \in B, n \in N_{TT}, n = no_b, tr \in TT \tag{54}$$

$$ttib_{b,n,tr} \leq tt2ib_{b,n,tr} \quad b \in B, n \in N_{TT}, n = no_b, tr \in TT \tag{55}$$

$$ttib_{b,n,tr} \geq tt1ib_{b,n,tr} + tt2ib_{b,n,tr} - 1 \quad b \in B, n \in N_{TT}, n = no_b, tr \in TT \tag{56}$$

Ponderando-se a função objetivo desta forma, os patamares de estoque ganham preferência no instante em que uma determinada área de oferta atinge seu valor de armazenamento máximo, obrigando o envio de produtos mesmo durante o período da troca de turno. Em situação de estoque mínimo, na área de destino ocorre o mesmo, sendo priorizado o recebimento das bateladas durante a troca de turno para que não ocorra falta de produtos.

De forma similar, as restrições 57 a 63 fazem a verificação dos tempos de final de bombeio ($fb_{b,n,n1,d}$) em relação ao tempo de início it_{tr} e término ft_{tr} da troca de turno de trabalho na área de origem (situação 2 ilustrada na Figura 10).

$$fb_{b,n,n1,d} - it_{tr} \geq (1 - tt1fb_{b,n,tr}) \cdot (-M) \quad b \in B, n \in N_{TT}, n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D, tr \in TT \tag{57}$$

$$fb_{b,n,n1,d} - it_{tr} \leq tt1fb_{b,n,tr} \cdot (M + eps) - eps \quad b \in B, n \in N_{TT}, n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D, tr \in TT \tag{58}$$

$$fb_{b,n,n1,d} - ft_{tr} \leq (1 - tt2fb_{b,n,tr}) \cdot M \quad b \in B, n \in N_{TT}, n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D, tr \in TT \tag{59}$$

$$fb_{b,n,n1,d} - ft_{tr} \geq tt2fb_{b,n,tr} \cdot (-M - eps) + eps \quad b \in B, n \in N_{TT}, n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D, tr \in TT \tag{60}$$

$$ttfb_{b,n,tr} \leq tt1fb_{b,n,tr} \quad b \in B, n \in N_{TT}, n = no_b, tr \in TT \tag{61}$$

$$ttfb_{b,n,tr} \leq tt2fb_{b,n,tr} \quad b \in B, n \in N_{TT}, n = no_b, tr \in TT \tag{62}$$

$$ttfb_{b,n,tr} \geq tt1fb_{b,n,tr} + tt2fb_{b,n,tr} - 1 \quad b \in B, n \in N_{TT}, n = no_b, tr \in TT \tag{63}$$

As restrições 64 a 70 fazem a verificação dos tempos de início de recebimento ($ir_{b,n,n1,d}$) em relação ao tempo de início it_{tr} e término ft_{tr} da troca de turno de trabalho na área de destino (situação 3 ilustrada na Figura 10).

$$ir_{b,n,n1,d} - it_{tr} \geq (1 - tt1ir_{b,n1,tr}) \cdot (-M) \quad b \in B, n1 \in N_{TT}, n1 \in N\ (n \neq n1), n1 = nd_b, d \in D, tr \in TT \tag{64}$$

$$ir_{b,n,n1,d} - it_{tr} \leq tt1ir_{b,n1,tr} \cdot (M + eps) - eps \quad b \in B, n1 \in N_{TT}, n1 \in N\ (n \neq n1), n1 = nd_b, d \in D, tr \in TT \tag{65}$$

$$ir_{b,n,n1,d} - ft_{tr} \leq (1 - tt2ir_{b,n1,tr}) \cdot M \quad b \in B, n1 \in N_{TT}, n1 \in N\ (n \neq n1), n1 = nd_b, d \in D, tr \in TT \tag{66}$$

$$ir_{b,n,n1,d} - ft_{tr} \geq tt2ir_{b,n1,tr} \cdot (-M - eps) + eps \quad b \in B, n1 \in N_{TT}, n1 \in N\ (n \neq n1), n1 = nd_b, d \in D, tr \in TT \tag{67}$$

$$ttir_{b,n1,tr} \leq tt1ir_{b,n1,tr} \quad b \in B, n1 \in N_{TT}, n1 = nd_b, tr \in TT \tag{68}$$

$$ttir_{b,n1,tr} \leq tt2ir_{b,n1,tr} \quad b \in B, n1 \in N_{TT}, n1 = nd_b, tr \in TT \tag{69}$$

$$ttir_{b,n1,tr} \geq tt1ir_{b,n1,tr} + tt2ir_{b,n,tr} - 1 \quad b \in B, n1 \in N_{TT}, n1 = nd_b, tr \in TT \tag{70}$$

As restrições 71 a 77 fazem a verificação dos tempos de fim de recebimento ($fr_{b,n,n1,d}$) em relação ao tempo de início it_{tr} e término ft_{tr} da troca de turno de trabalho na área de destino (situação 4 ilustrada na Figura 10).

$$fr_{b,n,n1,d} - it_{tr} \geq (1 - tt1fr_{b,n1,tr}) \cdot (-M) \quad b \in B, n1 \in N_{TT}, n1 \in N\ (n \neq n1), n1 = nd_b, d \in D, tr \in TT \tag{71}$$

$$fr_{b,n,n1,d} - it_{tr} \leq tt1fr_{b,n1,tr} \cdot (M + eps) - eps \quad b \in B, n1 \in N_{TT}, n1 \in N\ (n \neq n1), n1 = nd_b, d \in D, tr \in TT \tag{72}$$

$$fr_{b,n,n1,d} - ft_{tr} \leq (1 - tt2fr_{b,n1,tr}) \cdot M \quad b \in B, n1 \in N_{TT}, n1 \in N\ (n \neq n1), n1 = nd_b, d \in D, tr \in TT \tag{73}$$

$$fr_{b,n,n1,d} - ft_{tr} \geq tt2fr_{b,n1,tr} \cdot (-M - eps) + eps \quad b \in B, n1 \in N_{TT}, n1 \in N\ (n \neq n1), n1 = nd_b, d \in D, tr \in TT \tag{74}$$

$$ttfr_{b,n1,tr} \leq tt1fr_{b,n1,tr} \quad b \in B, n1 \in N_{TT}, n1 = nd_b, tr \in TT \tag{75}$$

$$ttfr_{b,n1,tr} \leq tt2fr_{b,n1,tr} \quad b \in B, n1 \in N_{TT}, n1 = nd_b, tr \in TT \tag{76}$$

$$ttfr_{b,n1,tr} \geq tt1fr_{b,n1,tr} + tt2fr_{b,n,tr} - 1 \quad b \in B, n1 \in N_{TT}, n1 = nd_b, tr \in TT \tag{77}$$

As expressões 78 a 84 gerenciam as restrições locais de bombeio e recebimento que devem ser respeitadas em todas as áreas em que ocorrem estas operações, inclusive intermediárias. Os bombeios e recebimentos simultâneos serão considerados em relação à mesma área de origem/destino.

A partir da área de origem N2, duas bateladas b e $b1$ podem ser bombeadas simultaneamente, sendo 1 bombeio através do duto 5 e outro através de um dos dutos com sentido de envio (2,8,9 ou 15). As operações de bombeio podem iniciar mesmo durante a passagem de outros produtos através da área N2 (restrições 78 e 79). A área N2 permite até 2 recebimentos simultâneos, porém apenas duas movimentações típicas possuem como destino esta área, não

sendo necessário o controle através de restrições.

$$\begin{aligned} ib_{b1,n,n2,d1} \geq fb_{b,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), n = no_b = 2, \\ d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), (d \neq 5, d1 \neq 5) \end{aligned} \tag{78}$$

$$\begin{aligned} ir_{b1,n2,n,d1} \geq fb_{b,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), n = no_b = 2, \\ d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), (d \neq 5, d1 \neq 5) \end{aligned} \tag{79}$$

As restrições 80 e 81 controlam as operações de bombeio a partir da área de origem N4. Neste caso, apenas 1 bombeio pode ocorrer através de um dos dutos com sentido de envio (6 ou 7). A área N4 permite até 3 recebimentos simultâneos, porém apenas os dutos 7, 11 e 12 possuem sentido de recebimento.

$$\begin{aligned} ib_{b1,n,n2,d1} \geq fb_{b,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), n = no_b = 4, \\ d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1) \end{aligned} \tag{80}$$

$$\begin{aligned} ir_{b1,n2,n,d1} \geq fb_{b,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), n = no_b = 4, \\ d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1) \end{aligned} \tag{81}$$

A área N7 permite apenas um bombeio, ou seja, não se pode bombear simultaneamente para dois trechos de duto. O número de recebimentos simultâneos é atendido sem necessidade de restrições adicionais (restrição 82).

$$\begin{aligned} ib_{b1,n,n2,d1} \geq fb_{b,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), \\ n = no_b = no_{b1} = 7, d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1) \end{aligned} \tag{82}$$

As restrições 83 e 84 controlam as operações de bombeio na área N1. Considerando o produto $p_b = 3$, não é possível bombear simultaneamente para os trechos de duto 1 e 7.

$$\begin{aligned} ib_{b1,n,n2,d1} \geq fb_{b,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), \\ n = no_b = 1, d \text{ e } d1 \in D, d = 1, d1 = 7, \\ \text{para } p_b = 3 \end{aligned} \tag{83}$$

$$\begin{aligned} ir_{b1,n2,n,d1} \geq fb_{b,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), \\ n = no_b = 1, d \text{ e } d1 \in D, d = 1, d1 = 7, \\ \text{para } p_b = 3 \end{aligned} \tag{84}$$

Como discutido na seção 3.3, a operação pulmão ocorre caso uma batelada seja recebida em um tanque da área e ao mesmo tempo seja enviada deste tanque para outro trecho de duto com vazão igual ou não àquela do recebimento. As restrições 85 a 90 gerenciam as operações em pulmão envolvendo um conjunto específico de produtos, áreas operacionais e diferentes situações de vazão no recebimento e rebombeio. Para a condição em que a vazão de recebimento (vaz_b) é maior ou igual a vazão de envio (vaz_{b1}), a restrição 85 controla a operação pulmão na área N2 para o produto $p_b = p_{b1} = 7$. Vale notar que o balanço de massa deve ser respeitado, ou seja, o volume recebido (vol_b) é igual ao volume enviado (vol_{b1}).

$$\begin{aligned} ib_{b1,n1,n2,d1} \geq ir_{b,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b1 = b+1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), \\ n = no_b = 2, d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), \\ \text{para } p_b = p_{b1} = 7, vol_b = vol_{b1}, vaz_b \geq vaz_{b1} \end{aligned} \tag{85}$$

Da mesma forma, para a condição em que a vazão de recebimento (vaz_b) é maior ou igual a vazão de envio (vaz_{b1}), as restrições 86 e 87 controlam a operação pulmão na área N4 para os produtos $p_b = p_{b1} = 7$ e $p_b = p_{b1} = 9$, respectivamente.

$$\begin{aligned} ib_{b1,n1,n2,d1} \geq ir_{b,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b1 = b+1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), \\ n = no_b = 4, d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), \\ \text{para } p_b = p_{b1} = 7, vol_b = vol_{b1}, vaz_b \geq vaz_{b1} \end{aligned} \tag{86}$$

$$\begin{aligned} ib_{b1,n1,n2,d1} \geq ir_{b,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b1 = b+1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), \\ n = no_b = 4, d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), \\ \text{para } p_b = p_{b1} = 9, vol_b = vol_{b1}, vaz_b \geq vaz_{b1} \end{aligned} \tag{87}$$

Caracterizando um segundo caso, para a condição em que a vazão de recebimento (vaz_b) é menor que a vazão de envio (vaz_{b1}), a restrição 88 controla a operação pulmão na área N2 para o produto $p_b = p_{b1} = 7$.

$$\begin{aligned} ib_{b1,n1,n2,d1} \geq ib_{b,n,n1,d} + vol_b/vaz_b - vol_{b1}/vaz_{b1} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b1 = b+1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), \\ n = no_b = 2, d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), \\ \text{para } p_b = p_{b1} = 7, vol_b = vol_{b1}, vaz_b < vaz_{b1} \end{aligned} \tag{88}$$

Finalmente, para a condição em que a vazão de recebimento (vaz_b) é menor que a vazão de envio (vaz_{b1}), as restrições 89 e 90 controlam a operação pulmão na área N4 para os produtos $p_b = p_{b1} = 7$ e $p_b = p_{b1} = 9$, respectivamente.

$$\begin{aligned} ib_{b1,n1,n2,d1} \geq ib_{b,n,n1,d} + vol_b/vaz_b - vol_{b1}/vaz_{b1} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b1 = b+1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), \\ n = no_b = 2, d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), \\ \text{para } p_b = p_{b1} = 7, vol_b = vol_{b1}, vaz_b < vaz_{b1} \end{aligned} \tag{89}$$

$$\begin{aligned} ib_{b1,n1,n2,d1} \geq ib_{b,n,n1,d} + vol_b/vaz_b - vol_{b1}/vaz_{b1} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b1 = b+1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2) \in N\ (n \neq n1 \neq n2), \\ n = no_b = 2, d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), \\ \text{para } p_b = p_{b1} = 9, vol_b = vol_{b1}, vaz_b < vaz_{b1} \end{aligned} \tag{90}$$

Conforme detalhado na seção 3.3, alguns dutos presentes no cenário em análise podem ter seu sentido de bombeio revertido (ex.: dutos 5, 7 e 15). Rotas de fluxo adicionais foram criadas para orientar o envio e recebimento das bateladas auxiliares de reversão a partir de uma mesma área. Por exemplo, uma batelada auxiliar com sentido N9 $\rightarrow$ N2 é bombeada para o duto 15, deslocando todo o volume deste duto em direção à área N2. Na operação de reversão, bateladas com sentido N2 $\rightarrow$ N9 permitem que a batelada auxiliar retorne à área N9. As restrições 91 a 97 gerenciam as operações de reversão que ocorrem nos dutos $d \in D_{REV}$.

$$\begin{aligned} ib_{b1,n2,n,d} \geq fb_{b,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n = n1 \neq n2), d \in D_{REV} \end{aligned} \tag{91}$$

$$\begin{aligned} ir_{b,n,n1,d} \geq ib_{b1,n2,n,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n = n1 \neq n2), d \in D_{REV} \end{aligned} \tag{92}$$

$$\begin{aligned} fr_{b,n,n1,d} \geq ir_{b,n,n1,d} + vol_b/vaz_{b1} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), d \in D_{REV} \end{aligned} \tag{93}$$

$$fr_{b,n,n1,d} \geq ir_{b,n,n1,d} + vol_{b1}/vaz_{b1} + (vol_d - vol_b)/vaz_{b2} \\ b \text{ e } b1 \text{ e } b2 \in B\ (b < b1 < b2), n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), d \in D_{REV} \tag{94}$$

$$ib_{b1,n,n2,d} \geq fb_{b,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), d \in D_{REV} \tag{95}$$

$$ir_{b,n,n2,d} \geq fr_{b1,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), d \in D_{REV} \tag{96}$$

$$fb_{b,n,n1,d1} \geq fr_{b,n2,n3,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b < b1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \text{ e } n3 \in N\ (n \neq n1 \neq n2 \neq n3), \\ d \in D_{REV}, d1 \in D\ (d \neq d1) \tag{97}$$

4.3 CONCLUSÃO

Desta forma, foi elaborado um novo modelo de temporização para realizar o escalonamento de atividades em uma rede de dutos através das expressões 3 a 97, segundo uma abordagem de decomposição do problema. A Tabela 2 descreve de forma resumida a estrutura do modelo de temporização.

Tabela 2 – Estrutura do modelo de temporização

Elemento	Equações
Função objetivo	(3)
Precedências	(4) a (8)
Parada	(9) a (11)
Violações	(12) a (15)
Temporização	(16) a (40)
Horossazonal	(41) a (49)
Troca de turno	(50) a (77)
Alinhamentos locais	(78) a (84)
Operação pulmão	(85) a (90)
Operação de reversão	(91) a (97)

O modelo desenvolvido utiliza basicamente variáveis contínuas e binárias, interligadas através de restrições lineares, estruturado como um problema de programação linear inteira mista (MILP) com domínio de tempo contínuo. Os critérios e hipóteses de modelagem contemplam as condições operacionais propostas no Capítulo 3 e detalhadas na seção 4.1.

As considerações de volume e vazão envolvendo até quatro bateladas simultâneas em um mesmo trecho de duto, bem como a hipótese da vazão de bombeio ser considerada constante de acordo com o produto e rota de fluxo adotada, abrangem de forma satisfatória os casos de estudo abordados neste trabalho. Deve-se ressaltar a importância destas premissas na tem-

porização das movimentações, observando que em relação a uma área de destino, o tempo de recebimento de uma batelada dependerá, além de sua vazão, das vazões dos produtos que a empurram ao longo dos trechos percorridos na rede. Uma abordagem simplificada desta hipótese será usada no modelo de ordenação desenvolvido no Capítulo 6, considerando o movimento das bateladas sujeitas à uma vazão média ao longo de suas rotas.

A formulação inicialmente desenvolvida faz parte de uma estrutura computacional para auxílio à tomada de decisões durante a operação da rede de dutos. Pode-se notar que, com exceção das restrições de horossazonalidade e troca de turno (equações 41 a 77), as restrições em sua maioria não utilizam variáveis de decisão binárias que impactam significativamente no tempo de resolução do modelo, como será evidenciado no capítulo seguinte através dos resultados obtidos com a implementação do modelo matemático proposto.

5 RESULTADOS DO MODELO DE ESCALONAMENTO

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões da aplicação do modelo descrito no capítulo anterior. O objetivo principal é evidenciar a aplicabilidade das soluções geradas, os pontos fortes e as limitações encontradas na abordagem. Para avaliar o modelo proposto, as seções seguintes trazem resultados para cenários distintos gerados com base no sistema de planejamento da PETROBRAS. Com dados referentes às movimentações globais de produtos entre áreas, estoques iniciais em dutos e tanques, produção e consumo, a arquitetura proposta na seção 3.4 (Figura 6) foi utilizada para produzir cenários que evidenciam os principais aspectos do problema de programação de uma malha dutoviária. O modelo foi implementado e as instâncias foram resolvidas no *solver* comercial ILOG OPL Studio 3.6.1 (ILOG, 2002b), cujos recursos permitem facilmente gerar estruturas esparsas que orientam a criação otimizada de restrições, a verificação e a validação do modelo. Nos testes realizados foi utilizado o algoritmo CPLEX MIP 8.1 para a resolução dos modelos. As opções de parâmetros correspondem à configuração padrão da ferramenta, sendo que a plataforma computacional utilizada nas soluções é composta por um Processador Intel-Core2Duo 2.13GHz com 2GB de memória RAM.

5.1 EXEMPLO ILUSTRATIVO

Os dados utilizados como entrada do modelo são fornecidos pelo módulo de Alocação de Recursos na forma de uma carteira ordenada de bateladas. A Tabela 3 apresenta uma programação para a rede de dutos que cumpre a demanda exigida dentro do horizonte de uma semana, após a aplicação dos módulos de Alocação de Recursos e Sequenciamento.

Nesta tabela, para cada batelada de um produto, uma rota específica entre a origem e o destino é definida com base nas rotas de fluxo (rfx_b) cadastradas. Por exemplo, a batelada 1, constituída pelo produto p_1=6, é bombeada da área no_1=7 e deve ser recebida na área nd_1=4 através da rota de fluxo rfx_1=23. O volume vol_1=15000 m^3 é bombeado à vazão vaz_1=450 m^3/h, sendo que as janelas de tempo de envio na origem (ted_1, tec_1) e recebimento no destino (trd_1, trc_1) devem ser respeitadas. Os valores atribuídos às janelas de tempo (0 a 500) foram declarados para que não influenciassem o tempo de início de bombeio das bateladas, permitindo a realização das operações o mais cedo possível.

Tabela 3 – Carteira de bateladas - cenário ilustrativo

b	no_b	nd_b	p_b	vol_b (m^3)	rfx_b	vaz_b (m^3/h)	ted_b (h)	tec_b (h)	trd_b (h)	trc_b (h)
1	7	4	6	15000	23	450	0	500	0	500
2	3	1	9	17000	37	850	0	500	0	500
3	3	9	4	25000	20	1000	0	500	0	500
4	2	2	6	21500	32	500	0	500	0	500
5	3	8	2	27000	18	1000	0	500	0	500
6	9	1	7	42500	28	850	0	500	0	500
7	9	9	10	21500	36	850	0	500	0	500
8	3	5	1	13000	19	650	0	500	0	500
9	3	5	1	13000	19	650	0	500	0	500
10	3	5	1	13000	19	650	0	500	0	500
11	2	5	6	15000	12	500	0	500	0	500
12	1	2	8	15000	1	500	0	500	0	500

Nesta programação em específico, 10 bateladas são movimentadas para cumprir a demanda requerida, além das bateladas adicionais do processo de reversão (bateladas 4 e 7 da carteira). As rotas de fluxo das bateladas de reversão possuem a área de origem coincidente com a área de destino, pois devem retornar após o processo de deslocamento do volume presente no duto. As bateladas são distribuídas nos trechos de dutos adjacentes às áreas de origem, criando uma sequência relativa de bombeio, conforme apresenta a Figura 11.

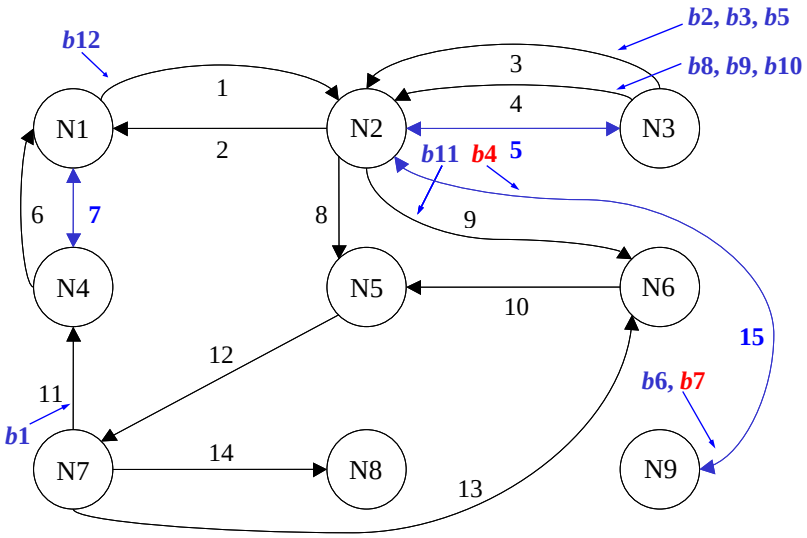

Figura 11 – Distribuição das bateladas na rede - cenário ilustrativo

As bateladas bombeadas na área N3 devem seguir a sequência estabelecida pela carteira, respeitando a seguinte ordem: as bateladas 2, 3 e 5 através do duto 3 e as bateladas 8, 9 e 10 através do duto 4. Bateladas em rotas de fluxo distintas são bombeadas simultaneamente, como é o caso da batelada 1. Bateladas cujas rotas compartilham o mesmo trecho de duto devem obedecer à hierarquia imposta pelo sequenciamento da carteira. Devido a esta restrição, a batelada 4 é bombeada somente após a passagem da batelada 3 pela área intermediária N2.

Outro caso semelhante ocorre com a batelada 11, devendo ser enviada obrigatoriamente após a passagem da batelada 10 através da área N2. A Figura 12 ilustra na forma de uma carta de Gantt a temporização obtida pelo modelo para esta instância de teste. Deve-se ressaltar que os tempos representados se referem ao início e final de bombeio em cada trecho de duto (no segmento inicial do duto). A carta de Gantt apresenta algumas informações a respeito de cada batelada sequenciada, assim como sua movimentação em relação à topologia da rede.

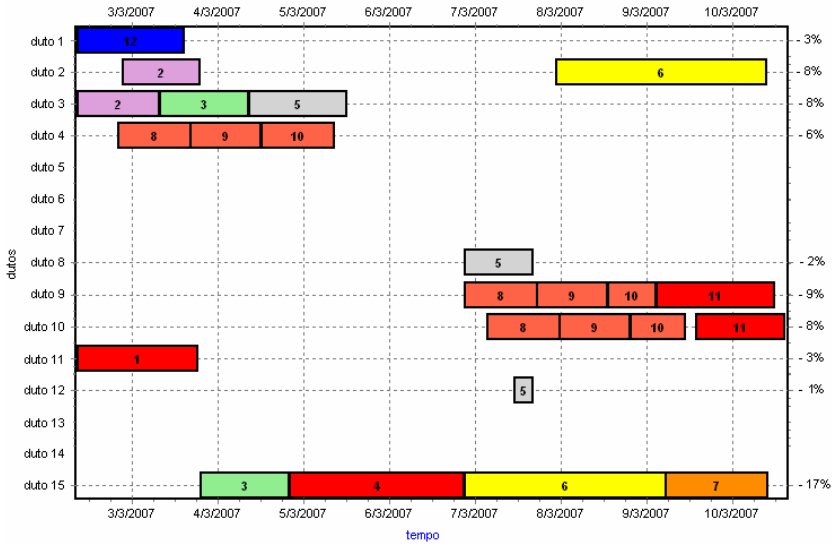

Figura 12 – Carta de Gantt - cenário ilustrativo

Por exemplo, a partir da Figura 12 o volume da batelada 5, com origem na área N3, está presente nos trechos de dutos 3, 8 e 12. Como não existe nenhuma batelada que desloque a batelada 5, por ser a última na ordem de envio através do duto 3, a quantidade de produto presente no trecho de duto 12 é apenas parte do volume de 27000 m^3. Pode-se observar que o tamanho da batelada 5 não é suficiente para alcançar o destino de recebimento N8, sendo que outras bateladas são necessárias para empurrá-la até a área final. As bateladas auxiliares 4 e 7 fazem a operação de reversão do duto 15. Após a passagem da batelada 3 pela área N2, a batelada 4 desloca todo o volume do duto (21500 m^3), permitindo que a batelada 3 seja recebida na área N9. Em seguida, a batelada 6 é bombeada da área N9, fazendo com que a batelada 4 retorne à área N2. Da mesma forma, a batelada 6 é empurrada pela batelada de reversão 7 até a área intermediária N2. Apesar das bateladas de reversão 4 e 7 apresentarem o mesmo volume (21500 m^3), os tempos de bombeio são distintos devido à diferença de vazão entre elas (500 m^3/h contra 850 m^3/h). Outras informações podem ser obtidas da Figura 12 como, por exemplo, a taxa de ocupação dos dutos em porcentagem (à direita). Para esta programação, a taxa de ocupação apresenta-se bastante baixa, já que é considerado como referência um horizonte de tempo de 30 dias (720 horas), apesar de toda a demanda ter sido bombeada em aproximadamente 10 dias. Para um determinado duto, a taxa de ocupação é dada pela relação

$tx_{ocup} = \frac{bomb_{total}[h]}{720} \cdot 100\%$, onde $bomb_{total}$ é a soma dos tempos de bombeio em horas de todas as bateladas envolvidas neste duto em específico. Para um período de 10 dias, considerando as restrições de horossazonal e troca de turno, o tempo de execução da instância foi inferior a 1 s (0,98 s), produzindo um total de 9499 restrições e 4039 variáveis (destas, 3840 variáveis são binárias).

5.2 CENÁRIOS PRÁTICOS

Conforme discussão realizada no capítulo 3, a programação diária das atividades da malha dutoviária é orientada pelo cumprimento de demandas mensais (ou bimensais) de fornecimento, definidas por um sistema de planejamento. As cotas mensais são então divididas em volumes menores (bateladas) que devem ser bombeados ao longo do horizonte de programação, tipicamente de alguns dias. A concepção de modelagem utilizada fornece uma estimativa de solução do sistema real para um horizonte de aproximadamente 30 dias. Como forma de visualizar o potencial do modelo matemático proposto, os cenários escolhidos tentam representar o maior número de aspectos práticos encontrados em situações reais da programação da rede de dutos em estudo. Neste sentido, foram realizados estudos para sete cenários reais, numerados de C1 a C7, com diferentes quantidades de bateladas. Em todos os casos foram consideradas as taxas de produção e consumo das áreas envolvidas, o estado inicial dos dutos e os níveis de inventário das tancagens agregadas. A lista de bateladas de cada programação, a exemplo do cenário ilustrativo, é uma das entradas para o modelo matemático de temporização. Além disso, pode-se determinar o número de dias em que a tarifação horossazonal e os períodos de troca de turno deverão ser considerados, impactando no tempo total de execução do modelo.

A rotina de gerar novas programações com auxílio do modelo matemático de temporização pode ser simplificada num primeiro momento, permitindo avaliar a viabilidade de implementação da solução obtida. Devido ao grande número de incertezas inerentes ao problema, durante a etapa inicial de programação pode-se priorizar as informações referentes ao atendimento das operações típicas relacionadas aos produtos críticos, evitando-se o rigor de considerar as restrições de horossazonalidade e troca de turno que consomem um tempo computacional relativamente alto. Desta forma, a geração dos resultados seguiu três configurações de diferentes complexidades em função dos parâmetros de horossazonalidade e troca de turno, concentrando o período de penalização em 10 dias (Caso A), 20 dias (Caso B) e 30 dias (Caso C).

As Tabelas 4, 5 e 6 mostram a evolução do modelo e os resultados computacionais obtidos na resolução dos cenários C1 a C7 para os três casos de penalização. Para cada uma das soluções obtidas, as tabelas informam o número total de bateladas (considerando variáveis contínuas e binárias), o número total de variáveis, o número de variáveis binárias, o número de

restrições, o número de iterações realizadas pelo método Simplex até a obtenção da solução, seu valor (Função Objetivo) e o tempo computacional exigido. Além disso, outros detalhes dos cenários são informados, tais como o número de bateladas de inicialização que já se encontram no interior dos trechos de dutos no início do horizonte de programação, o número de operações de pulmão e reversão e o horizonte total de programação dado em horas por $\max(fb_{b,n,n1,d})$, ou seja, equivalente ao maior tempo final de bombeio existente na solução. Vale lembrar que cada operação pulmão é formada por um par de bateladas, sendo que a batelada adicional criada já está considerada no número total de bateladas, como será visto adiante durante o detalhamento dos resultados gráficos.

Tabela 4 – Resultados computacionais - modelo de escalonamento (Caso A)

Cenários	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**C6**	**C7**
Nº de Bateladas	74	92	98	98	104	107	112
Nº Total de Variáveis	24666	31962	34251	34137	36363	36891	40247
Nº de Variáveis Binárias	23361	30411	32652	32538	34632	35166	38520
Nº de Restrições	58088	75141	80481	80374	85531	86718	95953
Nº de Iterações	3993	4456	4702	5194	4638	4520	5280
Função Objetivo ($\times 10^6$)	23,80	1,64	5,10	17,6	11,79	18,74	10,89
Tempo Computacional (s)	7,56	11,30	12,44	13,83	17,17	16,80	22,83
Bateladas de Inicialização	22	25	24	29	22	24	23
Nº Pulmão	0	3	5	3	6	6	13
Nº Reversão	3	2	2	2	5	5	8
Horizonte (h)	731	847	845	738	783	817	698

Tabela 5 – Resultados computacionais - modelo de escalonamento (Caso B)

Cenários	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**C6**	**C7**
Nº de Bateladas	74	92	98	98	104	107	112
Nº Total de Variáveis	48027	62373	66615	66849	70707	72057	78542
Nº de Variáveis Binárias	46722	60822	65016	65250	68976	70332	76815
Nº de Restrições	113171	146814	156573	157630	166243	169416	186358
Nº de Iterações	12886	12713	13155	15666	12703	12506	15134
Função Objetivo ($\times 10^6$)	25,30	1,70	5,10	18,09	11,86	18,78	12,04
Tempo Computacional (s)	30,28	27,83	34,97	52,95	31,91	29,59	51,41
Bateladas de Inicialização	22	25	24	29	22	24	23
Nº Pulmão	0	3	5	3	6	6	13
Nº Reversão	3	2	2	2	5	5	8
Horizonte (h)	731	847	845	738	783	817	710

Tabela 6 – Resultados computacionais - modelo de escalonamento (Caso C)

Cenários	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Nº de Bateladas	74	92	98	98	104	107	112
Nº Total de Variáveis	71511	92937	99267	99213	105339	107361	116837
Nº de Variáveis Binárias	70206	91386	97668	97614	103608	105636	115110
Nº de Restrições	168623	218946	233529	233842	247819	252528	276763
Nº de Iterações	23823	22704	23635	27057	23757	22678	28702
Função Objetivo ($\times 10^6$)	25,31	1,70	5,15	18,12	11,86	19,27	12,71
Tempo Computacional (s)	102,09	80,99	106,48	130,47	88,38	66,22	163,03
Bateladas de Inicialização	22	25	24	29	22	24	23
Nº Pulmão	0	3	5	3	6	6	13
Nº Reversão	3	2	2	2	5	5	8
Horizonte (h)	734	847	845	745	783	817	723

O arranjo das constantes de ponderação utilizadas na função objetivo foi escolhido no sentido de evitar as violações das janelas de tempo na origem e no destino em proporções iguais ($kto = 10000$ e $ktd = 10000$). O início e fim das operações de bombeio e recebimento e os tempos de parada foram ponderados com prioridade baixa ($ktb = 1$ e $ktp = 1$), fazendo com que o horizonte de cada programação fosse direcionado para atender os níveis de produção e demanda. As variáveis relacionadas à troca de turno foram ponderadas de forma a serem preteridas em relação às janelas de tempo ($ktt = 5000$), evitando situações operacionais críticas em função de atividades de bombeio e recebimento que não podem ser adiadas. Apesar da grande variabilidade nos valores da função objetivo observada entre os diferentes cenários, este é um indicativo importante de cada solução. Valores elevados indicam que ocorrem violações significativas das janelas de tempo, como será observado adiante nas informações relacionadas à análise qualitativa das soluções geradas.

Em uma primeira avaliação, pode-se notar que os resultados apresentam um crescimento do tempo de solução do modelo em função do número de bateladas e do período considerado para penalização de horossazonalidade e troca de turno. Vale ressaltar que em alguns casos, como nos cenários C3 e C4, o número de bateladas da carteira é o mesmo (98 bateladas cada), porém a configuração da programação em função dos volumes, vazões, rotas alocadas e ordenação de bombeios impacta consideravelmente no número de variáveis e restrições geradas, bem como no tempo total de resolução do modelo. Apesar da discrepância entre os cenários C1 a C7, pode-se afirmar que o crescimento do número de variáveis e restrições é proporcional ao número de bateladas e ao tamanho das rotas de fluxo (nº de áreas intermediárias) alocadas nas movimentações, como foi descrito na seção 8 que detalha a geração das variáveis contínuas e binárias em função dos trechos de dutos percorridos pelas bateladas.

Outra característica interessante reside no tamanho do horizonte de programação em função do número de bateladas de cada carteira. No caso do cenário C7, com o maior número de bateladas (112 bateladas), o período de programação apresentado foi o menor em todos os casos

de teste, demonstrando que o número de movimentações não é a única característica determinante do horizonte de programação. De modo geral, o horizonte de programação é função dos volumes movimentados e das vazões envolvidas, bem como dependente da interação das bateladas na rede, do paralelismo existente nas diferentes áreas e principalmente influenciado pelo tempo de alocação imposto através das janelas de tempo. Considerando os diferentes períodos de horossazonalidade e troca de turno, não foi observada mudança relevante no tamanho do horizonte de bombeio. Mesmo para o Caso C (30 dias de penalização), o aumento do horizonte de programação não foi significativo para a maior parte dos cenários.

Devido à similaridade entre as operações existentes nos diferentes cenários, apenas a solução do cenário C2 será detalhada, evidenciando a metodologia de solução empregada. Apresentando grande parte das particularidades da prática operacional da rede em estudo, o cenário C2 recebeu da etapa de Alocação de Recursos uma lista de 92 bateladas, incluindo operações de reversão, pulmão e 25 bateladas de inicialização. As Figuras 13 e 14 apresentam respectivamente os tempos de bombeio e recebimento da programação gerada para o cenário prático C2 considerando 30 dias para as restrições de horossazonalidade e troca de turno (Caso C). As operações de bombeio e recebimento se distribuem ao longo do horizonte de tempo, respeitando as restrições operacionais impostas pelo modelo, sendo que a ordem de prioridade das bateladas na carteira e as janelas de tempo calculadas têm influência na ordem de alocação dos trechos de dutos e no tempo de execução das operações. Os espaços observados entre os bombeios de cada batelada evidenciam a tentativa de obedecer os limites das janelas de tempo e os alinhamentos em cada área intermediária.

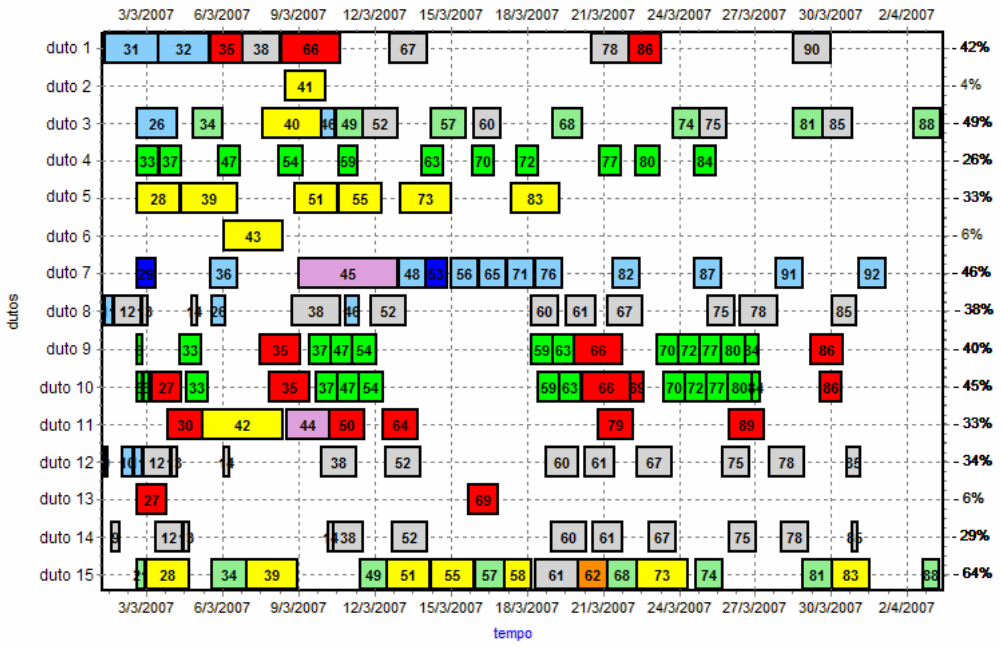

Figura 13 – Tempos de bombeio - cenário C2

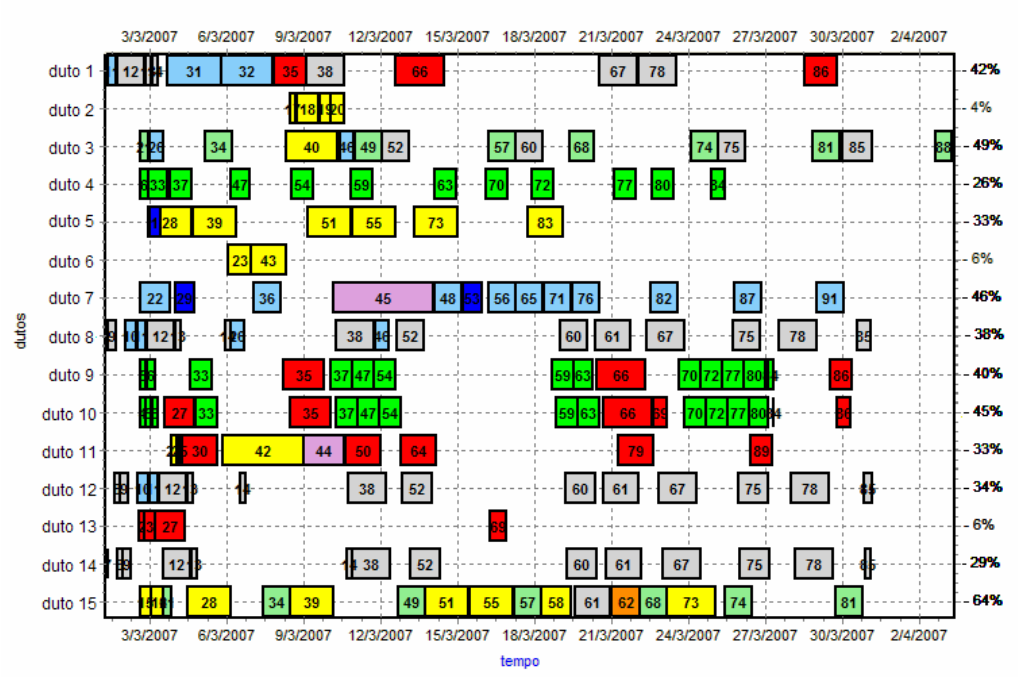

Figura 14 – Tempos de recebimento - cenário C2

A seguir serão detalhados os principais aspectos relacionados às operações típicas e restrições que devem ser obedecidas na geração das soluções da rede em estudo. Em particular, a representação gráfica dos resultados será apresentada em estudo, tendo por base o cenário C2, Caso C (30 dias de horossazonalidade e troca de turno).

Restrições Locais

As restrições locais, também chamadas de restrições de alinhamento, possuem uma grande influência no tempo total de programação. O impedimento da simultaneidade de muitas operações de bombeio e recebimento proporcionam atrasos impactantes na rede, difíceis de serem gerenciados. Durante a fase de elaboração das carteiras de movimentos, os especialistas lançam mão de um sistema de simulação que interativamente aponta as operações que conflitam em função das restrições locais, mas que torna-se improdutivo quando grandes horizontes de tempo são considerados.

A Figura 15 mostra o controle das operações de bombeio a partir da área N1 em que não é possível bombear duas bateladas do produto $p_b = 3$ através dos dutos 1 e 7 simultaneamente, devido ao número limitado de bombas designadas ao grupo deste produto. Para cada família de produtos, um conjunto de bombas é dedicado em circustância das diferentes propriedades envolvidas, principalmente viscosidade e densidade distintas. As equações 83 e 84 do modelo gerenciam esta condição. Assim, conforme a Figura 15, a batelada 36 no duto 7, inicia seu bombeio apenas após o bombeio da batelada 32 pelo duto 1.

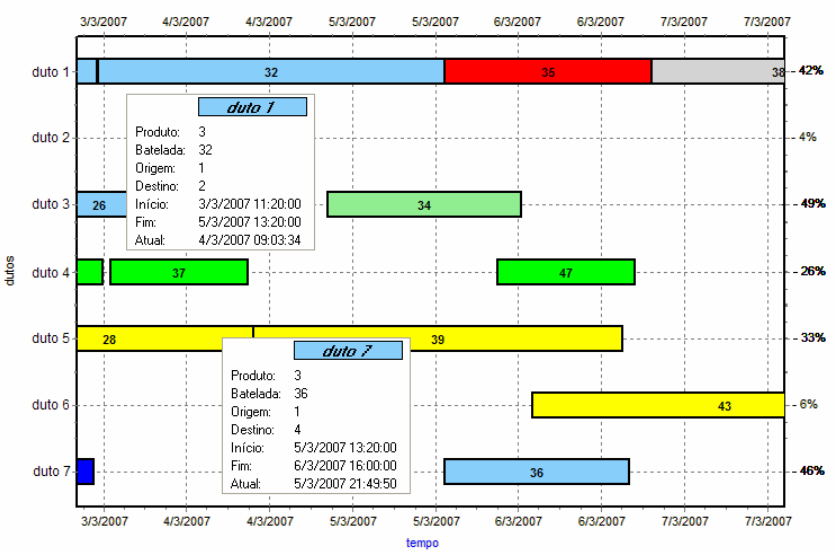

Figura 15 – Restrição local - área N1

A Figura 16 destaca a atuação da restrição dada pela equação 82 do modelo matemático. A área N7 permite apenas um bombeio, devendo ser evitado o envio simultâneo de produtos para dois trechos de duto por condições limitadas de alinhamento impostas pelas conexões internas da área operacional. A batelada 30 inicia seu bombeio no duto 11 às 20:34 do dia 03/03/2007, somente após o término do bombeio da batelada 27 no duto 13. Vale lembrar que nem todas as restrições modeladas são ativadas em uma mesma programação, fato que depende muito das movimentações agendadas para cada cenário.

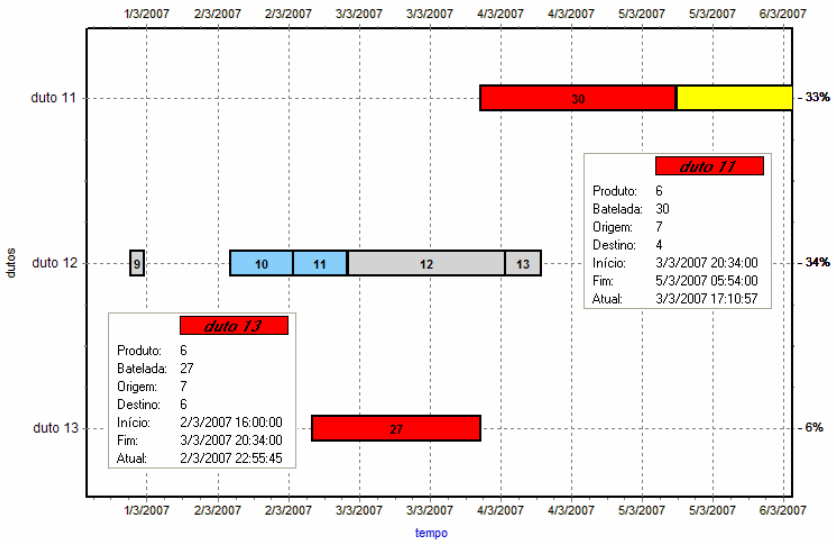

Figura 16 – Restrição local - área N7

Operação Pulmão

Devido à limitação de vazão na linha envolvendo a rota N7 → N1, o alinhamento da movimentação neste caso não é permitido, devendo ser realizada uma operação pulmão em N4. Esta área deve possuir tancagem suficiente para armazenar o produto resultante da diferença de vazões entre os pares de bateladas da operação pulmão. Como destacado anteriormente, a batelada que sofre a operação pulmão é replicada na carteira de bateladas e deve ser considerada no número total de bateladas da programação. Isto é devido à rota inicial ser quebrada em dois ou mais percursos complementares em função das diferentes vazões associadas.

Os pares de bateladas (42, 43), (44, 45) correspondem a situações onde ocorre operação pulmão na área N4 (rota de fluxo N7 → N1). A vazão dos pares de bateladas possuem valores à jusante e montante diferentes. Há duas situações abordadas referente à condição de pulmão:

1. A vazão de uma batelada *b* é menor que a vazão da batelada imediatamente posterior na carteira;

2. A vazão de uma batelada *b* é maior (ou igual) à vazão da batelada imediatamente posterior na carteira.

A Figura 17 destaca os dois casos abordados para a condição de pulmão. No primeiro caso, a batelada 42 (que vai de N7 para N4 através do duto 11) possui vazão menor que a batelada 43 (que vai de N4 para N1 pelo duto 6). Assim, o final do bombeio nas duas áreas (N7 e N4) se igualam. No segundo caso, a batelada 44 (que vai de N7 para N4 pelo duto 11) possui vazão maior em relação à batelada 45 (que vai de N4 para N1 pelo duto 7). Deste modo, o início de bombeio da batelada 45 na área N4 será igual ao início de recebimento da batelada 44 nesta mesma área.

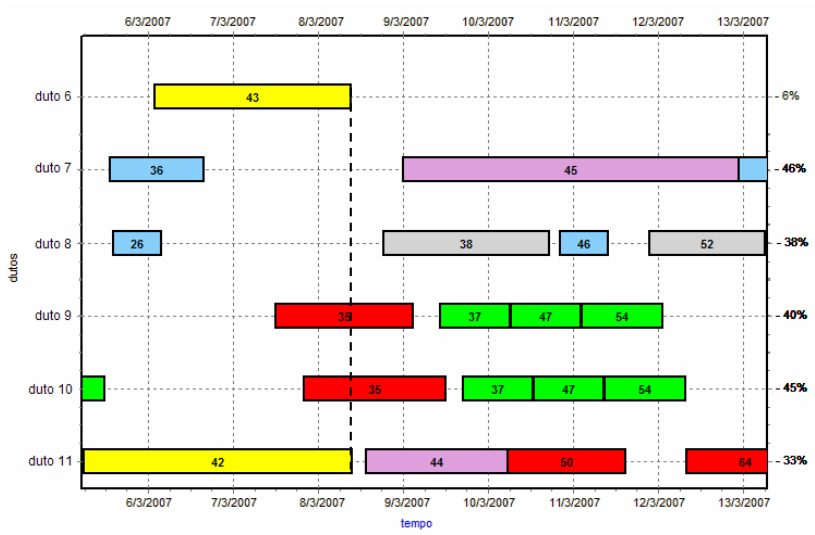

Figura 17 – Operação pulmão

Nos exemplos anteriores, as rotas foram particionadas em dois trechos apenas, mas é possível que uma batelada sofra mais de uma operação pulmão ao longo de sua rota de fluxo dependendo das diferentes vazões associadas.

Operação de Reversão

As bateladas 58 e 62 apresentadas na carteira são bateladas auxiliares para as movimentações de reversão. A Figura 18 destaca os dois casos de reversão no sentido do duto 15. A batelada 58 (origem N2) está situada entre as bateladas 57 (sentido N3 → N9) e 61 (sentido N9 → N8). A batelada 62 (origem N9) está situada entre as bateladas 61 (sentido N9 → N8) e 68 (sentido N3 → N9). Sem a existência das batelas de reversão, os produtos bombeados (bateladas 57 e 61) retornariam às suas áreas de origem antes mesmo de alcançarem o destino final. Neste caso em particular, os produtos utilizados no processo de reversão auxiliam o recebimento das bateladas 57 e 61, independente de restrições de demanda. A escolha dos produtos utilizados nas operações de reversão segue uma avaliação de estoque disponível ainda na etapa de Alocação de Recursos. Com a estimativa dos inventários finais, os produtos que possuem maior nível de disponibilidade são alocados para auxiliarem na entrega de bateladas agendadas e nas operações de reversão de dutos.

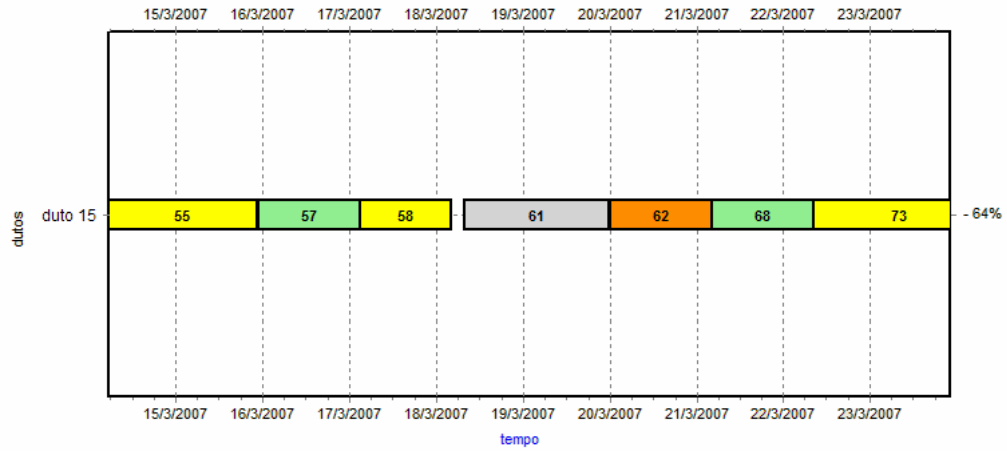

Figura 18 – Operação de reversão

Restrição horossazonal

Para os casos de parada de bombeio nos horários de pico de consumo de energia, o bloco temporal irá aumentar em 3 horas se ocorrer 1 período horossazonal durante o bombeio, 6 horas se houver 2 períodos horossazonais durante o bombeio e assim por diante. A Figura 19 destaca um caso de parada por horossazonalidade. Observando as bateladas 74 e 81 com origem em N3 (área que sofre parada de bombeio durante os horários de pico) o primeiro dia da programação ocorre em uma sexta-feira, dia 23/03/2007. Cada batelada apresentada possui

o volume de 25000 m^3 e vazão na origem de 1000 m^3/h (tempo de bombeio resultante igual a 25 horas).

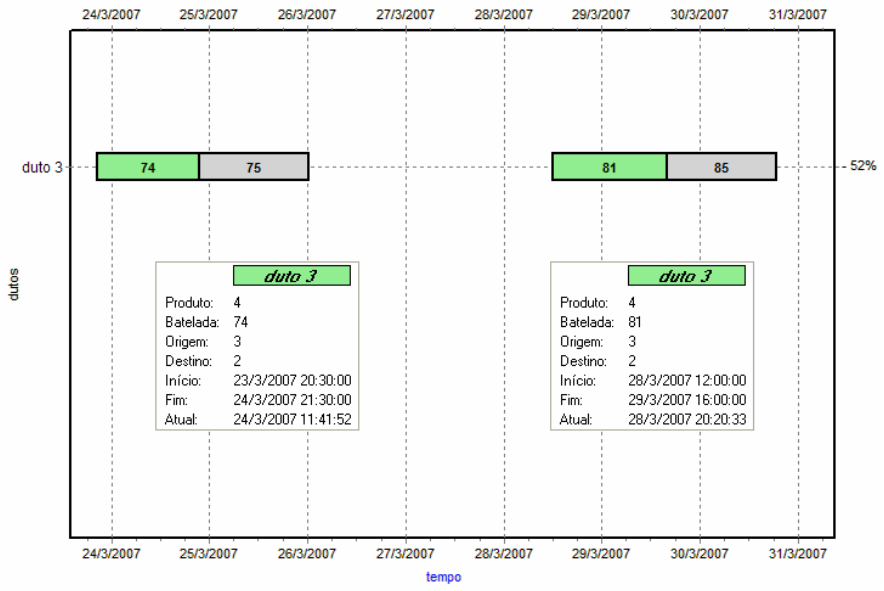

Figura 19 – Restrição horossazonal

A batelada 74 não sofre parada por horossazonalidade, pois seu início de bombeio ocorre após às 20:30 h (dia 23/03/2007, sexta-feira)[1] e se completa no sábado, às 21:30 h. Por outro lado, a batelada 81 que inicia seu bombeio às 12:00 h do dia 28/03/2007 (quarta-feira) é interrompido às 17:30 h deste mesmo dia. Até o momento da parada, o volume bombeado é de apenas 5500 m^3 (5,5 horas à vazão de 1000 m^3/h). Após às 20:30 h, o bombeio recomeça e termina às 16:00 h do dia seguinte, completando a operação de envio no intervalo de 28 horas. Estas informações são destacadas nos quadros incluídos no Gantt da Figura 19.

Restrição de troca de turno

A Figura 20 evidencia a atuação da restrição de troca de turno na área N1 nos instantes de início e fim de bombeio. O percurso das bateladas em evidência passa por apenas um trecho de duto, não sofrendo influência significativa de outras partes da rede, exceto pela atuação da restrição local na área N1. Desta forma, pode-se observar que o arranjo dos bombeios das bateladas 71 e 76 atendeu o período de troca de turno que inicia às 07:00 e termina às 08:00. Caso semelhante se observa na batelada 87 que inicia seu bombeio no limite do intervalo de troca de turno, às 15:00. A Figura 21 mostra o final de recebimento da batelada 76 no limite

[1]Na região sudeste, onde a rede em estudo é operada, o período restritivo de tarifação horossazonal é das 17:30 h às 20:30 h dos dias úteis da semana (fora do horário de verão).

de término do período de troca de turno na área N4, compreendido das 15:00 às 16:00 do dia 20/03/2007 [2].

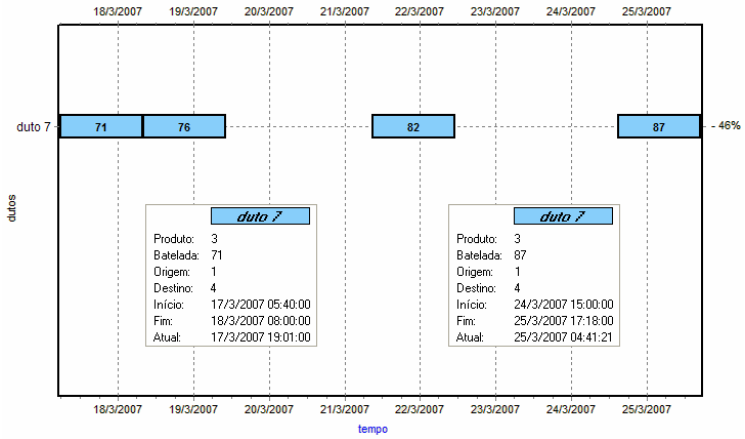

Figura 20 – Restrição de troca de turno - bombeio

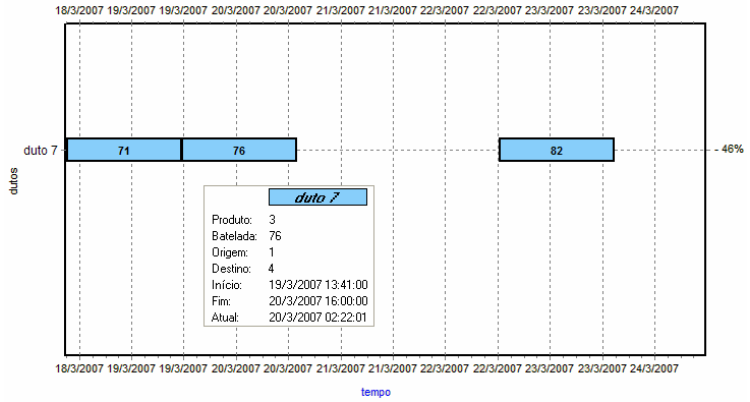

Figura 21 – Restrição de troca de turno - recebimento

5.3 INFORMAÇÕES ADICIONAIS

Através das Figuras 13 e 14 outras informações podem ser analisadas. Por exemplo, para o duto 15 observa-se uma taxa de utilização de 64%, ou seja, este duto encontra-se ocupado durante 64% do horizonte de tempo considerado, representando um potencial gargalo para o sistema. Medidas antecipativas podem ser tomadas antes mesmo de implementar uma nova programação, sugerindo rotas alternativas para os produtos e negociações de entrega junto às refinarias. Por outro lado, dutos com pouca utilização, como é o caso do duto 2 (4% de ocupação), podem ter sua capacidade de transporte melhor aproveitada.

Como destacado na seção 4.1, o modelo deve fornecer as violações das janelas de tempo impostas ao bombeio e recebimento de bateladas, permitindo uma avaliação dos estoques

[2] Tanto nas refinarias quanto nos terminais, a troca de turno ocorre nos seguintes períodos: das 07:00 h às 08:00 , das 15:00 h às 16:00 e das 23:00 h às 00:00.

agregados nas áreas operacionais da rede. A Tabela 7 fornece as violações calculadas pelo modelo matemático para o cenário C2 (Caso C).

Tabela 7 – Violações das janelas de tempo - cenário C2 (Caso C)

b	no	nd	ao_b (h)	do_b (h)	ad_b (h)	dd_b (h)
26	3	5	0	0	0	34
31	1	2	30	0	0	0
40	3	2	16	0	0	0
46	3	5	0	0	0	9
55	3	9	0	0	34	0
60	3	8	0	0	0	19

Para a batelada 26 ocorre um atraso do recebimento igual a 34 h, significando a queda do nível de produto abaixo do estoque mínimo na área de demanda 5. A batelada 31 aponta um adiantamento no bombeio de produto em 30 h na área 1, ou seja, é requisitado seu envio antes mesmo de estar disponível em estoque. Neste caso é possível a quebra do volume da batelada na origem, suprindo antecipadamente a necessidade de bombeio. Para a batelada 55 ocorre o adiantamento na entrega do produto no destino em 34 h, infringindo a capacidade máxima de armazenamento da área 9. Violações pequenas podem sugerir negociações de ajustes entre as áreas de envio e recebimento. Entretanto, atrasos grandes na entrega de produtos podem apontar a falta de capacidade de produção das refinarias envolvidas. Uma solução possível nestes casos é requisitar a chegada de navios na área 9, atendendo a demanda necessária durante uma determinada janela de tempo.

Além do problema de alocação de produtos que pode contribuir para um número elevado de violações das janelas de tempo, pode-se apontar outros fatores que geram gargalos em função do compartilhamento de trechos de dutos. Dentre estes, pode-se relacionar o tamanho das bateladas envolvidas e a ordem de prioridade de cada uma delas na carteira de movimentação. A heurística do módulo de Alocação de Recursos durante a geração das movimentações é adotar sempre o maior volume de batelada possível em função dos tanques disponíveis na origem e no destino, tamanhos dos dutos e volume das rotas de fluxo. Desta maneira, bateladas que possuem volumes elevados provocam atrasos significativos na rede, desde que os critérios da modelagem adotada não permitem a quebra dos volumes em partes menores. Na prática operacional, os especialistas muitas vezes são obrigados a dividir os volumes ou mesmo quebrar as bateladas em áreas intermediárias para garantir a entrega dos produtos na agenda programada, mas esta prática é indesejável e muitas vezes causa aumento dos custos por perdas através da degradação destes derivados. Neste sentido, como resultado das simulações realizadas, as Tabelas 8, 9 e 10 apresentam o número de bateladas que sofreram violações seguido do total de horas violadas (valores arredondados), detectadas nos cenários simulados para os três casos de penalização.

Tabela 8 – Total de Violações (Caso A)

Cenários		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Origem	**Adianta (nº/h)**	1/111	2/46	3/130	12/586	1/47	1/7	3/496
	Atrasa (nº/h)	3/47	0/0	0/0	1/9	8/406	13/763	3/87
Destino	**Adianta (nº/h)**	1/15	1/34	4/235	0/0	0/0	0/0	0/0
	Atrasa (nº/h)	22/2184	3/56	4/114	20/1145	12/696	19/1068	15/478
Violação Total		27/2357	6/136	11/479	33/1740	21/1149	33/1838	21/1061

Tabela 9 – Total de Violações (Caso B)

Cenários		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Origem	**Adianta (nº/h)**	1/96	2/46	3/130	11/564	1/47	1/7	3/477
	Atrasa (nº/h)	2/46	0/0	0/0	1/9	8/406	13/763	4/122
Destino	**Adianta (nº/h)**	1/15	1/34	4/235	0/0	0/0	0/0	0/0
	Atrasa (nº/h)	22/2349	3/62	4/114	20/1210	12/702	19/1068	18/573
Violação Total		26/2506	6/142	11/479	32/1783	21/1155	33/1838	25/1172

Tabela 10 – Total de Violações (Caso C)

Cenários		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Origem	**Adianta (nº/h)**	1/96	2/46	3/119	11/566	1/47	0/0	3/477
	Atrasa (nº/h)	2/46	0/0	1/11	1/9	8/406	13/769	4/134
Destino	**Adianta (nº/h)**	1/15	1/34	3/203	0/0	0/0	0/0	0/0
	Atrasa (nº/h)	22/2350	3/62	4/150	21/1212	12/702	20/1117	19/625
Violação Total		26/2507	6/142	11/483	33/1787	21/1155	33/1886	26/1236

Para todos os cenários e difentes casos de penalização, o número de bateladas que sofrem violações estão agrupadas em origem de envio e destino de recebimento, sendo que podem adiantar ou atrasar em relação às suas respectivas janelas de tempo. Por exemplo, para o cenário C2 da Tabela 8 (Caso A), duas bateladas adiantam o horário de envio e juntas somam 46 horas de violação (2/46), nenhuma batelada sofre atraso na origem (0/0), uma batelada adianta seu recebimento no destino (1/34) e três bateladas atrasam seu recebimento somando 56 horas de violação (3/56). No total, das 92 bateladas existentes na carteira de programação, 6 bateladas infringiram suas janelas de tempo, totalizando 136 horas de violação (6/136). Dentre as instâncias simuladas, o cenário C1 nos três casos de penalização foi o que apresentou maior violação das janelas de tempo impostas. Como mencionado na apresentação dos resultados computacionais, pode-se observar uma relação direta entre a função objetivo e o montante de violações dado em horas. Comparando-se os três casos de horossazonalidade e troca de turno, é notado um acréscimo no total de violações. Os piores casos estão relacionados aos cenário C1 e C7, com um aumento de 150 h e 175 h, respectivamente, quando comparados os Casos A e C (Tabelas 8 e 10). Este aumento da violação pode ser explicado pelo cumprimento das restrições que penalizam o início e o término das operações de envio e recebimento, ocasionando a propagação de eventos de forma generalizada através da rede.

Pode-se observar a existência de uma relação de compromisso entre o atendimento de todas as restrições impostas pelo problema e o respeito às janelas de tempo que representam os estoques agregados. Dado que as restrições operacionais, tal como restrições locais, horossazonalidade e troca de turno devem sempre ser atendidas, a factibilidade da solução é obtida pelo ajuste das variáveis de folga representadas pelos atrasos e adiantamentos no envio e recebimento

de produtos. Desde que a sequência de bombeio é sugerida pela carteira de bateladas, muitas vezes um escalonamento é sensivelmente melhorado quando novas sequências são implementadas, como será visto no Capítulo 6. Sendo uma questão inerente ao problema, diferentes carteiras de bateladas podem gerar múltiplas soluções e atender a determinados critérios que auxiliam o programador a direcionar suas atividades ao longo do horizonte de tempo. Por outro lado, alterações na sequência de bombeio a partir da origem podem forçar um aumento do horizonte de programação devido às restrições de bombeio e recebimento simultâneos existentes nas áreas operacionais.

As Figuras 22 e 23 ilustram dois sequenciamentos diferentes para uma carteira de bateladas em que a restrição local de bombeio simultâneo da área 2 impacta no tempo total de programação. Na carteira da Figura 22, a batelada 33 trafega pelos dutos 13 e 10 nos dias 03/07/2007 e 04/07/2007. Já na carteira da Figura 23, esta batelada foi reordenada manualmente e ocupa a posição 71. Com isto, ela só foi bombeada depois do dia 06/07/2009.

Figura 22 – Gantt - programação inicial

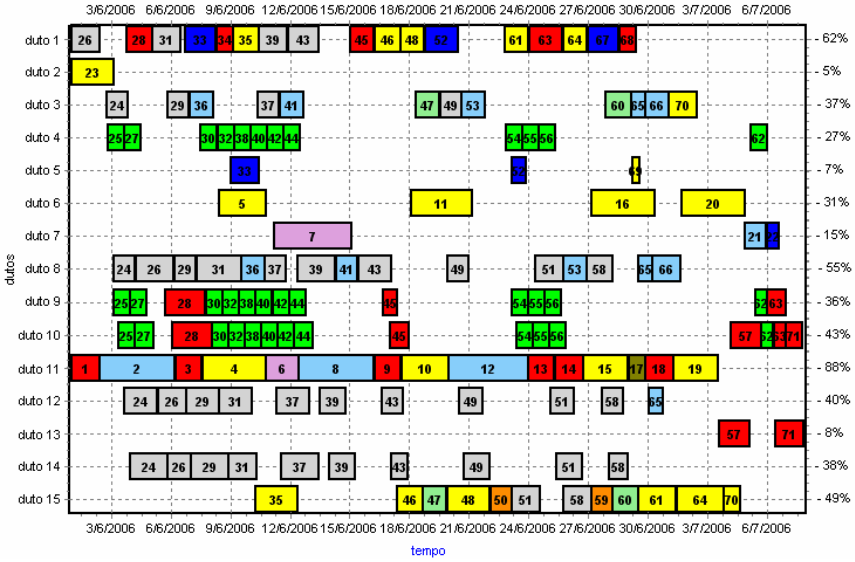

Figura 23 – Gantt - batelada 33 no final da carteira

Esse adiamento do bombeio para o final da carteira de bateladas ocasionou uma mudança significativa na configuração da programação a partir dos dois Gantts analisados, principalmente nos dutos 4, 9 e 10. Neste exemplo ilustrativo, em decorrência da ordem de bombeio imposta pela lista de bateladas, gargalos na rede provocam o atraso de várias bateladas da carteira, impactando no aumento do horizonte de programação. Dada a importância que a ordenação de bateladas possui na caracterização da solução final, o próximo capítulo apresenta uma nova metodologia de ordenação de bateladas que não utiliza heurísticas.

5.4 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste capítulo de resultados foi verificar o modelo de temporização através de cenários práticos, identificando o efeito correto das restrições e demonstrando o elevado grau de complexidade da tarefa de programação de uma rede de dutos, a qual consiste em considerar um grande volume de informações de ordem técnica e comercial. Como descrita anteriormente, a estrutura de otimização permite ao programador visualizar o escalonamento gerado com detalhes de vários dias adiante, prevendo o impacto das restrições impostas pela topologia da planta, problemas de operação de bombeio, falta de produtos em áreas específicas, o que auxilia o processo de decisão operacional durante a prática de programação.

A possibilidade de gerar um escalonamento de maior longo prazo permite destacar os seguintes resultados alcançados até o momento:

- Verificar a taxa de utilização dos dutos ao longo do mês;
- Identificar dutos gargalos no sistema;
- Identificar limitações de tancagem;

- A abordagem temporal contínua permite visualizar detalhes do escalonamento gerado (detalhes de horas);
- A programação pode ser gerada para priorizar o atendimento ao cliente ou inventários das áreas operacionais;
- O conceito de janelas de tempo permite um diagnóstico que pode ser utilizado na negociação entre a programação da produção das refinarias e o escalonamento dos dutos;
- A programação gerada tende a minimizar o número de paradas do sistema;
- O modelo de temporização permite avaliar novos modos de operação da rede e sugerir modificações de longo prazo.

Os cenários simulados neste capítulo foram definidos a partir de um sistema de planejamento mensal, representando situações reais da malha dutoviária em análise. O modelo foi capaz de tratar horizontes de até 30 dias com respeito a uma série de restrições operacionais, horossazonalidade e troca de turno. Foi possível visualizar a programação gerada com detalhes de maior longo prazo, identificando situações críticas e obtendo informações de diagnóstico da rede como gargalos, taxas de utilização/ocupação dos dutos, antecipando decisões relacionadas à falta de produtos em clientes e excedentes de estoque junto às refinarias.

No entanto, existem limitações da abordagem proposta resultantes da subdivisão hierárquica do problema de escalonamento, principalmente na etapa responsável pela ordenação dos bombeios das bateladas nas origens e passagem em áreas intermediárias. Visto que a ordenação de bateladas utilizada inicialmente faz uso de uma heurística construtiva de ordenação a partir do índice calculado pela equação 1 apresentada na seção 3.4 para determinar a prioridade de envio de produtos, este procedimento não possui meios de considerar os efeitos da rede *a priori*, motivando a reformulação desta abordagem através do uso de técnicas de programação matemática, conforme será apresentado no próximo capítulo.

6 MODELO DE ORDENAÇÃO DE BATELADAS

Neste capítulo, é proposta a formalização dos critérios de sequenciamento durante a fase de ordenação da lista de bateladas. Uma vez que a alocação de recursos e ordenação de bateladas tem forte impacto na solução final e métodos heurísticos podem levar a soluções muito particulares, é apresentada a reformulação do problema de ordenação com o emprego de estruturas de alto nível presentes em técnicas de programação lógica por restrições (CLP - *Constraint Logic Programming*). O modelo a ser desenvolvido tem como objetivo principal 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. Estimando o efeito da rede na propagação das bateladas, obtêm-se um ganho significativo na qualidade da solução quando comparada à heurística construtiva que pode falhar em alguns casos particulares.

6.1 INTRODUÇÃO

Os resultados encontrados para o modelo de escalonamento demonstraram que a sequência de bateladas utilizada na carteira de programação impacta de forma significativa no escalonamento obtido. Foi notado que muitas vezes um escalonamento é sensivelmente melhorado quando novas sequências de bombeio são implementadas (ver Figuras 22 e 23). Isto se deve principalmente à estrutura de modelagem baseada na hierarquia dos movimentos agendados em relação às origens de bombeio, resultado da ordenação inicial proposta pelo módulo de Alocação de Recursos. Retirando-se do modelo de escalonamento o processo de ordenação de bateladas, permitiu-se uma redução significativa de restrições e variáveis de decisão, mas em contrapartida criou-se uma dependência em relação à sequência gerada. O principal impacto observado refere-se à infração dos tempos de bombeio na origem (janela de tempo referente à oferta de produto) e dos tempos de recebimento no destino (janela de tempo referente à demanda de produto) relacionada aos gargalos dinâmicos causados pela ordenação e pelo tamanho das bateladas. A seguir será apresentada a reformulação desta abordagem utilizando-se técnicas de CLP.

Apesar dos resultados expressivos fornecidos pela heurística construtiva, pode-se observar a inexistência de uma relação entre as janelas de tempo calculadas na origem e no destino

que considere o efeito prévio da topologia da malha de dutos sobre o tempo de deslocamento da batelada ao longo de sua rota de fluxo. A hipótese inicial considera que a rota alocada permite um tempo de deslocamento ótimo, o que não é verdadeiro devido ao compartilhamento dos dutos e atrasos pertinentes à prioridade de bombeio já definida. Por exemplo, partindo-se da hipótese que o tempo de início de bombeio ($ib_{b,n,n1,d}$) de uma dada batelada deva ocorrer no intervalo da janela de tempo do terminal de oferta, sua propagação ao longo de cada área da rota de fluxo é influenciada pela dinâmica de envio de produtos nas demais áreas de origem. A Figura 24 ilustra de forma simplificada a propagação das bateladas 1 e 2 em função da ordenação obtida utilizando-se a heurística construtiva.

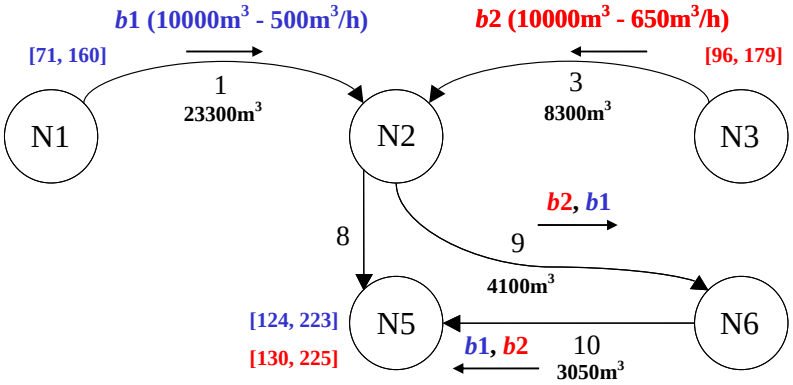

Figura 24 – Influência da ordenação nos tempos de propagação

Para os valores de TED, TEC, TRD e TRC, fornecidos pelo módulo de Alocação de Recursos (batelada 1: $ted_1 = 71$, $tec_1 = 160$, $trd_1 = 124$, $trc_1 = 223$ e batelada 2: $ted_2 = 96$, $tec_2 = 179$, $trd_2 = 130$, $trc_2 = 225$), obtemos $C_1 \approx 292$ e $C_2 \approx 328$, apontando uma prioridade da batelada 1 sobre a batelada 2. Considerando o caso extremo em que o início de bombeio da batelada 1 pela rota de fluxo N1-N2-N6-N5 ocorre dentro do limite superior da janela de envio ($ib_{1,1,2,1} = 160$ h), para o volume total da rota (30450 m^3 à vazão média de 500 m^3/h), o início de recebimento da batelada 1 ocorrerá em $ir_{1,6,5,10} \approx 220$ h. Por outro lado, o tempo mínimo para que a batelada 1 complete sua passagem através da área N2 é de aproximadamente 66 h (soma do volume da batelada 1 de 10000 m^3 e do duto 1 de 23300 m^3 à vazão média de 500 m^3/h). Desta maneira, o início de alinhamento da batelada 2 através da área N2 poderá ocorrer apenas no instante 226 h (160 h + 66 h). Para que a batelada 2 alcance seu destino de recebimento, os volumes dos dutos 9 e 10 (4100 m^3 e 3050 m^3, respectivamente) devem ser percorridos à vazão média de 650 m^3/h, consumindo um total de 11 h. Na melhor hipótese, o tempo de início de recebimento da batelada 2 na área N5 será $ir_{2,6,5,10} = 237$ h, com 12 h de atraso em relação ao limite superior da sua janela de recebimento $trc_2 = 225$ h. Para a situação contrária, em que as prioridades das bateladas fossem invertidas, o recebimento da batelada 2 ocorreria em $ir_{2,6,5,10} \approx 203$ h (rota de 15450 m^3 à vazão média de 650 m^3/h), considerando o caso crítico

de início de bombeio no limite superior da janela de tempo na origem ($ib_{2,3,2,3} = 179$ h). Após a passagem da batelada 2 pela área N2, a batelada 1 completaria seu percurso em $ir_{1,6,5,10} \approx 221$ h, satisfazendo as janelas de tempo e os limites de tancagem associados. Este exemplo tomou como consideração a existência de produtos suficientes que garantissem o recebimento das bateladas em seus destinos finais. A premissa de adotar uma vazão média no deslocamento da batelada ao longo de sua rota de fluxo constitui uma boa aproximação em função de dados históricos fornecidos pelo sistema de programação utilizado pelos especialistas.

Neste exemplo específico, o deslocamento das bateladas envolvidas sofreu apenas alguns fatores de atraso. Situações mais complexas ocorrem quando o tempo de deslocamento depende de várias outras restrições operacionais, tais como alinhamentos proibidos, bombeios simultâneos, operações pulmão e reversão, sendo que as diversas janelas de tempo e o tamanho de cada batelada devem ser ponderadas. Com base nas informações geradas pelo módulo de Alocação de Recursos, um modelo matemático é desenvolvido utilizando técnicas de programação lógica por restrições (CLP - *Constraint Logic Programming*) que considere a influência da rede na obtenção de uma ordenação de bateladas. O objetivo do modelo proposto é minimizar os tempos de violação das operações de bombeio e recebimento de produtos originados pelos gargalos dinâmicos da rede.

6.2 CONSIDERAÇÕES DA MODELAGEM

Em função do sequenciamento fornecido pelo módulo de Alocação de Recursos, onde para cada batelada $b \in B$ é associada uma rota de fluxo rfx_b cadastrada, é possível enumerar previamente os conflitos relacionados ao compartilhamento de cada um dos trechos de duto da rede. Os pontos críticos e gargalos da solução muitas vezes são estabelecidos junto às áreas intermediárias, já que o modelo de escalonamento respeita a integridade dos volumes durante as operações de passagem (ver exemplo na seção anterior). A Figura 25 apresenta uma situação típica em que as bateladas 2 e 3 compartilham os trechos de duto 8, 12 e 14. De acordo com a ordenação estabelecida pela lista de bateladas, o alinhamento da batelada 3 ocorre somente após o volume total da batelada 2 passar através da área N2.

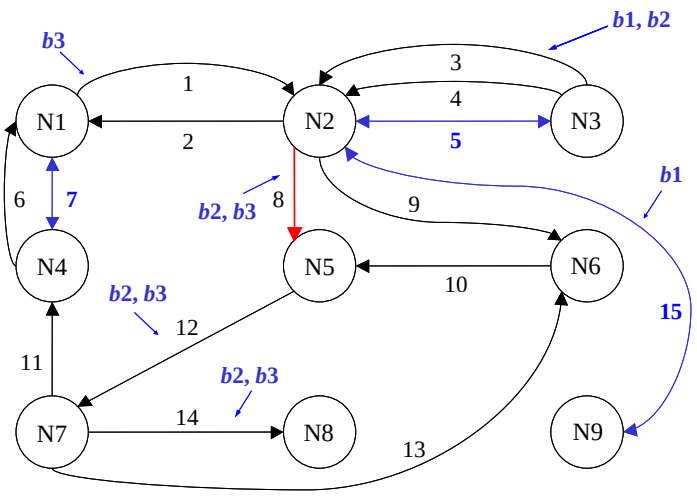

Figura 25 – Efeito da ordenação de bateladas na rede

Desta forma, o tempo de percurso da batelada 3 é influenciado pelo atraso originado pela alocação do duto 3 pela batelada 1 (passagem em direção a N9) e pela utilização do duto 8 durante a passagem da batelada 2. Pode-se notar também que a ordenação para o primeiro trecho de conflito (duto 8) determina a sequência de movimentação das bateladas 2 e 3 nos trechos seguintes (propagação da ordem nos dutos 12 e 14). Em função das vazões médias a que estão sujeitos os produtos na rede (vazões típicas relacionadas às rotas de fluxo), a proposta do modelo de ordenação é estimar o tempo de propagação das bateladas na rede resolvendo os conflitos principais de compartilhamento de dutos.

Outra premissa de modelagem está relacionada à escolha de ordenamentos entre pares de bateladas de operações que concorrem no tempo por um mesmo recurso. A complexidade computacional relacionada a esta busca pode ser minimizada, por exemplo, conhecendo-se os casos em que a ordenação é pré-fixada em função da ocorrência das atividades de bombeio nas áreas de origem. Em seu trabalho, Rodrigues (2000) aborda estratégias de decomposição de problemas de escalonamento em plantas multipropósito utilizando janelas de tempo. Algumas das técnicas utilizadas consideram a precedência obrigatória entre bateladas da mesma operação e entre pares de bateladas de operações distintas, em função da disposição de suas janelas de tempo.

O primeiro caso refere-se à geração de bateladas de um mesmo produto em uma área de origem produtora, devendo ser executada diversas vezes para atender a uma demanda pré-estabelecida na rede. Em relação à um dado produto e origem, as bateladas de uma operação de envio normalmente compartilham o mesmo conjunto de tanques e são escoadas através de um mesmo trecho de duto, gerando uma condição de precedência obrigatória. Nesta situação, o cálculo das janelas de tempo entre as bateladas é interdependente. Para ilustrar este conceito, considere as bateladas do mesmo produto cujas janelas de tempo na origem são mostradas na

Figura 26. A janela da batelada 1 possui os limites $ted_1 = 0$ (tempo de envio disponível) e $tec_1 = 50$ (tempo de envio crítico), sendo que a janela da batelada 2 é formada pelos extremos $ted_2 = 20$ (tempo de envio disponível) e $tec_2 = 70$ (tempo de envio crítico).

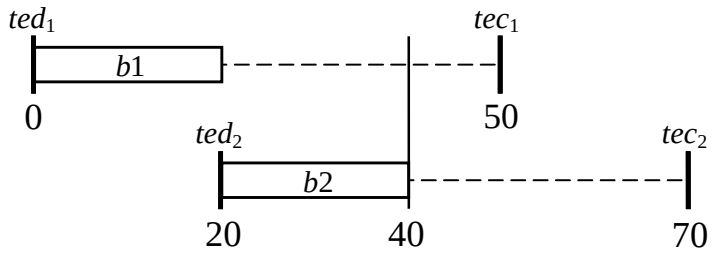

Figura 26 – Precedência entre bateladas do mesmo produto na mesma origem

O tempo de duração do bombeio das bateladas 1 e 2 é o mesmo ($vol_b/vaz_b = 20$ h). Avaliando apenas os limites das janelas de tempo [1], o início de bombeio da batelada 1 após o término de envio da batelada 2 é possível. Por outro lado, a retirada de um mesmo produto deve respeitar o tempo de geração dos volumes, satisfazendo o balanço de massa através de uma ordenação coerente em função da taxa de produção. As relações de precedência por balanço de massa são fixadas devido ao fato de que não é possível começar o bombeio de um produto sem que este esteja disponível.

Caso os produtos das bateladas 1 e 2 fossem distintos (sem dependência mútua entre as janelas), seria perfeitamente possível alocar a batelada 2 antes da batelada 1. A Figura 27 mostra esta situação de ordenação entre as batelas 1 e 2 caso fossem formadas por produtos diferentes. Desta maneira, o bombeio da batelada 1 poderia ser realizado entre os tempos 40 h e 50 h, respeitando sua janela de tempo na origem.

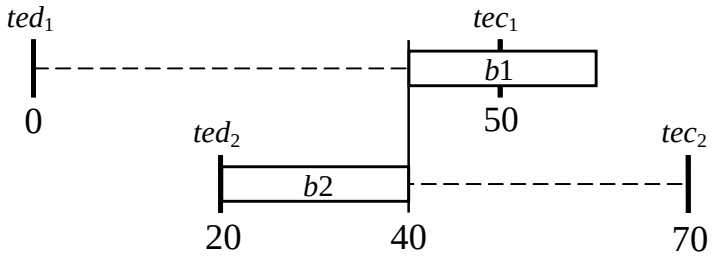

Figura 27 – Possível ordenação entre bateladas de produtos distintos

Outra situação de precedência obrigatória se observa entre pares de bateladas de produtos distintos e área de origem em comum. Mesmo com uma dinâmica de produção diferente e tancagem dedicada, originando janelas de tempo sem dependência alguma, o trecho de duto

[1] A janela de tempo na origem é satisfeita quando se verifica a condição $ted_b \leq ib_{b,n,n1,d} \leq tec_b$ (ver seção 4.2.4).

inicial da rota de fluxo pode ser compartilhado por ambas as bateladas (por exemplo, bateladas 1 e 2 da Figura 25). Considerando um outro exemplo, segundo a Figura 28, no qual o tempo de bombeio da batelada 1 é de 20 h e o da batelada 2 leva 50 h. Comparando-se o tempo de envio crítico da batelada 1 ($tec_1 = 45$) e o tempo de envio disponível da batelada 2 ($ted_2 = 20$) com a duração dos bombeios, facilmente se observa a precedência obrigatória entre as bateladas 1 e 2, pois se a batelada 1 começar após a batelada 2, seu bombeio iniciará após 45 h, violando sua janela de tempo.

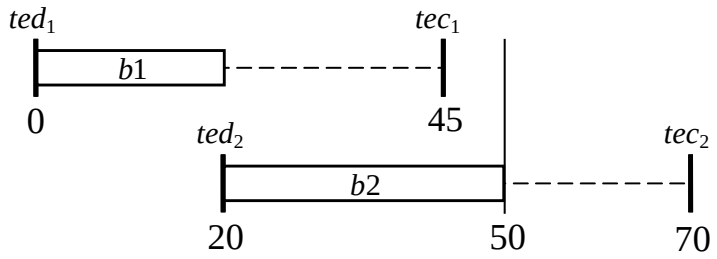

Figura 28 – Precedência entre bateladas de diferentes produtos

Caso se queira bombear a batelada 1 após o término de bombeio da batelada 2, não haverá possibilidade de atender seu tempo de envio crítico ($tec_1 = 45$), ocorrendo uma violação da capacidade de estoque do produto referente à batelada 1. Enquanto é perfeitamente factível bombear a batelada 1 antes da batelada 2 em respeito às suas respectivas janelas de tempo, não é possível executar a ação contrária. Considerando-se um par de bateladas $b1$ e $b2$ e a condição $tec_{b1} < ted_{b2} + vol_{b2}/vaz_{b2}$, $b1$ deve obrigatoriamente preceder $b2$. Caso contrário, as bateladas $b1$ e $b2$ podem sofrer mudança na ordem de bombeio. Outras abordagens de programação da produção que fazem uso de janelas de tempo são exploradas nos trabalhos de Pessoa (2003b) e Borjas (2005). Os critérios de modelagem descritos nesta seção serão utilizados com o objetivo de orientar o modelo de ordenação a encontrar soluções com baixo custo computacional.

A seguir são listadas as principais hipóteses a serem observadas na modelagem do problema de ordenação de bateladas:

1. Em relação a uma dada origem, bateladas de um mesmo produto devem ser bombeadas de acordo com uma sequência de envios pré-definida, respeitando a ordem de geração das janelas de tempo relacionadas à tancagem agregada (precedência por balanço de massa);

2. Em relação a uma dada origem e duto de bombeio, pode-se gerar uma precedência obrigatória entre pares de bateladas de produtos distintos, provocada pela disposição de suas janelas de tempo;

3. Diferentemente do modelo de escalonamento, a ordem de passagem nas áreas intermediárias e a sequência de bombeio na origem para produtos distintos podem ser alteradas

em relação à hierarquia previamente estabelecida pela carteira de bateladas. O objetivo do modelo de ordenação é propor uma melhor ordem global de bateladas que minimize a violação das janelas de tempo na origem e no destino;

4. A vazão a que uma batelada estará sujeita ao longo de sua rota será a vazão média associada ao conceito de rota de fluxo preferencial;

5. Em relação ao cumprimento das janelas de tempo de bombeio e recebimento, o mesmo nível de prioridade é admitido para todas as bateladas movimentadas, porém, diferentes níveis de preferência podem ser associados a produtos específicos;

6. As bateladas de inicialização presentes na rede no início do horizonte de programação não serão consideradas para critério de ordenação;

7. Restrições de troca de turno e de horossazonalidade serão desprezadas, mantendo-se os efeitos das restrições locais, operação pulmão e reversão;

8. A rotina de evitar a geração de interface entre bateladas não compatíveis (região de contaminação) será delegada a um nível operacional, priorizando-se o atendimento das janelas de tempo junto às áreas de origem e destino.

Grande parte das estruturas de variáveis e de parâmetros utilizadas no Capítulo 4 permanecem válidas, o que facilita a adequação dos conceitos de modelagem em redes de dutos desenvolvidos neste capítulo. A implementação do modelo de ordenação é relativamente simples devido principalmente à simplificação das restrições operacionais relacionadas à composição de vazões e paradas de bombeio. As diferenças encontradas na notação do modelo a ser desenvolvido e as particularidades de sua implementação serão descritas na sequência.

6.3 MODELO DE ORDENAÇÃO

Este modelo foi motivado pela constatação de que poderiam ser obtidas melhorias na ordenação proposta pelo módulo de sequenciamento. O modelo matemático proposto deverá obter a ordem global de bombeio das bateladas agendadas de forma a minimizar a violação das janelas de tempo nas origens de envio e nas áreas de recebimento de produtos.

As funcionalidades da Programação Lógica por Restrições (CLP) e sua característica de natureza declarativa permitem o uso intuitivo de expressões de alto nível tais como implicações ($\rightarrow$), equivalências ($\leftrightarrow$) e relações lógicas usuais ($\wedge$ e $\vee$). Desta forma, relações entre tarefas de bombeio e recebimento podem ser facilmente declaradas e propagadas de uma forma generalizada na rede de dutos em estudo. Na implementação de modelos através de

técnicas em CLP, a plataforma de desenvolvimento define o nível de primitivas que são disponibilizadas pela linguagem. O ambiente OPL CP (*Constraint Programming*) existente no pacote comercial ILOG OPL Studio 3.6.1 através dos algoritmos ILOG Solver 5.3 e ILOG Scheduler 5.3, disponibiliza restrições pré-definidas de alto nível orientadas para o domínio da aplicação. Em particular, o componente ILOG Scheduler 5.3 se destaca por implementar conceitos comumente utilizados na modelagem de problemas de escalonamento, tais como atividade (`activity`), precedência de operações (`precede`), alocação de recursos unários e recursos discretos (`require`), definidas sobre todo o intervalo de tempo do horizonte de programação (ILOG, 2002b). A principal vantagem destes recursos é fazer uso de restrições de simples compreensão e utilização. Esta abordagem, de utilização mais natural, limita a diversidade das aplicações e intensifica a importância do processo de decisão, no qual se define o conjunto de restrições a serem utilizadas na representação do problema.

Na descrição do modelo, a seguinte notação é utilizada:

6.3.1 Notação

Conjuntos

$B_{b,b1,d}$ conjunto dos pares de bateladas b e $b1 \in B$ que compartilham o duto $d \in D$ ao longo de suas rotas de fluxo;

$BP_{b,b1,d}$ conjunto dos pares de bateladas b e $b1 \in B$ que compartilham o duto $d \in D$ e que possuem precedência obrigatória em relação à origem de bombeio, relacionada às restrições de balanço de massa ou provocada pela disposição de suas janelas de tempo;

$BO_{b,b1,d}$ conjunto dos pares de bateladas b e $b1 \in B$ que compartilham o duto $d \in D$ e que não possuem uma precedência obrigatória relativa, podendo sofrer mudança de ordenação ao longo da rede, tanto nas áreas de origem quanto em áreas intermediárias, sendo $BO_{b,b1,d} = B_{b,b1,d} \cap BP_{b,b1,d}$.

Variáveis

$opb.\texttt{start}_{b,n,n1,d}$ tempo de início da atividade de envio da batelada b, da área n para a área $n1$, através do duto d (h);

$opb.\texttt{end}_{b,n,n1,d}$ tempo de término da atividade de envio da batelada b, da área n para a área $n1$, através do duto d (h);

$opr.\texttt{start}_{b,n,n1,d}$ tempo de início da atividade de recebimento da batelada b, da área n para a área $n1$, através do duto d (h);

$opr.\texttt{end}_{b,n,n1,d}$ tempo de término da atividade de recebimento da batelada b, da área n para a área $n1$, através do duto d (h);

$pd_{b,b1,d}$ variável binária indicando que b precede $b1$ no primeiro trecho de conflito $d = dc_{b,b1}$ ($pd_{b,b1,d} = 1$), caso contrário $b1$ precede b ($pd_{b,b1,d} = 0$);

ord_b variável inteira representando a ordem global da batelada b na lista de bateladas da carteira de programação.

Parâmetros

$kp_{b,b1}$ número de dutos compartilhados entre as bateladas b e $b1$;

$dc_{b,b1}$ primeiro duto de conflito comum às bateladas b e $b1$, sendo $dc_{b,b1} \in D$;

rb_n parâmetro que indica o número de bombas disponíveis na área $n \in N$ para serem alocadas durante as atividades de bombeio.

As operações de bombeio e recebimento das bateladas foram redefinidas em função do conceito de atividade (`activity`) (ILOG, 2002b). Uma atividade é declarada como um objeto que possui três itens: tempo inicial, tempo final e duração. Deste modo, cada atividade de bombeio terá um tempo de início $opb.\texttt{start}_{b,n,n1,d}$ e fim $opb.\texttt{end}_{b,n,n1,d}$. Já as variáveis $opr.\texttt{start}_{b,n,n1,d}$ e $opr.\texttt{end}_{b,n,n1,d}$ são associadas ao início e término das atividades de recebimento. A duração das atividades de bombeio e recebimento serão definidas através de restrições no interior do modelo matemático, basicamente relacionada ao fator vol_b/vaz_b de uma batelada b.

A idéia principal da formulação é detectar os dutos de conflito existentes entre pares de bateladas e resolver a ordenação apenas para estes trechos. O número de dutos compartilhados entre duas bateladas é dado pelo fator $kp_{b,b1}$ em função das rotas pré-estabelecidas pelo módulo de Alocação de Recursos. Para os pares de bateladas que apresentarem um fator $kp_{b,b1} \geq 2$ (dois dutos ou mais compartilhados na rede), ao primeiro duto de conflito ($d = dc_{b,b1}$) é associado a variável binária de decisão $pd_{b,b1,d}$. A variável $pd_{b,b1,d}$ será utilizada para determinar a precedência da alocação de dutos em áreas intermediárias da rede. Como forma de reduzir a

dificuldade computacional, esta consideração é verificada apenas para os pares de bateladas que não estejam dentro do conjunto de precedência obrigatória em relação à origem de bombeio, ou seja, para b e $b1 \in BO_{b,b1,d} = B_{b,b1,d} \cap BP_{b,b1,d}$. O número de conflitos é diretamente proporcional ao número de restrições de precedência a serem geradas. Se b precede $b1$ no primeiro trecho de conflito $d = dc_{b,b1}$, a variável $pd_{b,b1,d}$ assume valor verdadeiro ($pd_{b,b1,d} = 1$), caso contrário, $b1$ precede b e $pd_{b,b1,d}$ assume valor falso ($pd_{b,b1,d} = 0$), representando uma mudança de ordem em relação à sequência previamente estabelecida pela heurística construtiva. Detectando-se a precedência no primeiro trecho de conflito, esta ordem é então propagada para os demais dutos compartilhados por b e $b1$ ao longo de suas rotas. Para o caso em que apenas um trecho de conflito $kp_{b,b1} = 1$ é verificado, a variável $pd_{b,b1,d}$ não é gerada por motivos de redundância de informação, já que a precedência, neste caso, é definida pela própria restrição de alocação de dutos. Com a definição dos tempos de alocação das atividades de bombeio em cada trecho de duto, o próximo passo é recuperar a precedência global das bateladas envolvidas para a construção de uma nova carteira de bateladas. Em um dado trecho de duto $d \in D$, se for verificado que o início de alocação de uma batelada b é menor que o início de alocação de uma batelada $b1$, a relação $ord_b < ord_{b1}$ deve ser verificada, recuperando através das variáveis ord_b e ord_{b1} uma prioridade relativa entre as bateladas b e $b1$. Vale ressaltar que a formulação em CP permite o uso apenas de variáveis inteiras, aproximação adequada ao propósito do modelo a ser desenvolvido. A seguir serão descritas a função objetivo e as restrições que compõe o modelo de ordenação. Vale ressaltar que a formulação apresentada a seguir é uma evolução do trabalho apresentado em Felizari et al. (2009), com novas restrições que tratam as decisões de ordenação em trechos de conflito, tratamento das operações de reversão e pulmão.

6.3.2 Função Objetivo

A função objetivo (FO), descrita pela equação 98, consiste na minimização do adiantamento e atraso de envio de produtos nas origens ($ao_{b,n}, do_{b,n}$), adiantamento e atraso da entrega de produtos nos destinos, como critério de ordenação das bateladas ao longo da rede de dutos. Num caso inicial, todas as bateladas possuem os mesmos fatores de ponderação kto e ktd, sendo que prioridades distintas podem ser atribuídas em relação a diferentes produtos ou grupo de produtos.

$$\begin{aligned} \text{minimizar} \quad & \\ & \sum_{\substack{b \in B, \\ n = no_b}} (ao_{b,n} + do_{b,n}) \cdot kto \\ + & \sum_{\substack{b \in B, \\ n = nd_b}} (ad_{b,n} + dd_{b,n}) \cdot ktd \end{aligned} \tag{98}$$

6.3.3 Restrições

O modelo de ordenação é sujeito a uma série de restrições, expressas por equações ou inequações, numeradas de 99 até 123. A restrição 99 estabelece o tempo de início e fim das atividades de bombeio $opb_{b,n,n1,d}$ em relação às áreas operacionais ao longo de toda a rota de fluxo.

$$\begin{aligned} opb.\texttt{end}_{b,n,n1,d} = opb.\texttt{start}_{b,n,n1,d} + vol_b/vaz_b \\ b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), d \in D \end{aligned} \tag{99}$$

A restrição 100 calcula o início de recebimento de uma batelada b na área $n1$ em função do seu início de bombeio na área n e do volume do duto d (vol_d) percorrido à vazão vaz_b. Desta forma, o tempo de propagação da batelada na rede será no mínimo equivalente ao volume total dos dutos da rota de fluxo percorridos à vazão de bombeio na origem.

$$\begin{aligned} opr.\texttt{start}_{b,n,n1,d} = opb.\texttt{start}_{b,n,n1,d} + vol_d/vaz_b \\ b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), d \in D \end{aligned} \tag{100}$$

A restrição 101 relaciona os tempos de início e fim das atividades de recebimento. Uma batelada b será considerada recebida, após seu volume (vol_b) passar completamente pela área $n1$ de recebimento. Em relação às áreas intermediárias, a operação de recebimento é equivalente à operação de passagem.

$$\begin{aligned} opr.\texttt{end}_{b,n,n1,d} = opr.\texttt{start}_{b,n,n1,d} + vol_b/vaz_b \\ b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), d \in D \end{aligned} \tag{101}$$

Em uma dada área intermediária $n1$, o início de bombeio será igual ao início de recebimento, caracterizando uma situação de alinhamento da batelada entre os trechos de duto d e $d1$ (restrição 102).

$$\begin{aligned} opb.\texttt{start}_{b,n1,n2,d1} = opr.\texttt{start}_{b,n,n1,d} \\ b \in B, n, n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1) \end{aligned} \tag{102}$$

Em relação ao início de bombeio das bateladas em uma determinada área de origem ($opb.\texttt{start}_{b,n,n1,d}$), os tempos de envio disponível (ted_b) e envio crítico (tec_b) de uma batelada b devem ser respeitados, mas são passíveis de violação sob penalização na função objetivo (restrições 103 e 104).

$$\begin{aligned} opb.\texttt{start}_{b,n,n1,d} &\geq ted_b - ao_{b,n} \\ b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D \end{aligned} \tag{103}$$

$$\begin{aligned} opb.\texttt{start}_{b,n,n1,d} &\leq tec_b + do_{b,n} \\ b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b, d \in D \end{aligned} \tag{104}$$

Da mesma forma, em relação ao início de recebimento das bateladas na área de destino ($opr.\texttt{start}_{b,n,n1,d}$), os tempos de recebimento disponível (trd_b) e recebimento crítico (trc_b) de uma batelada b devem ser respeitados, mas são passíveis de violação sob penalização na função objetivo (restrições 105 e 106).

$$\begin{aligned} opr.\texttt{start}_{b,n,n1,d} &\geq trd_b - ad_{b,n1} \\ b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), n1 = nd_b, d \in D \end{aligned} \tag{105}$$

$$\begin{aligned} opr.\texttt{start}_{b,n,n1,d} &\leq trc_b + dd_{b,n1} \\ b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), n1 = nd_b, d \in D \end{aligned} \tag{106}$$

Para o primeiro duto de conflito $d = dc_{b,b1}$, a restrição 107 define a precedência de alocação entre as bateladas b e $b1$. A operação lógica *OR* ($\vee$) permite ao modelo selecionar uma entre as duas configurações possíveis (b precede $b1$ ou $b1$ precede b). Para cada uma das situações, a variável binária $pd_{b,b1,d}$ é designada em combinação com a operação lógica *AND* ($\wedge$).

$$\begin{aligned} &(opb_{b,n,n1,d}\ \texttt{precedes}\ opb_{b1,n2,n3,d} \wedge pd_{b,b1,d} = 1) \vee \\ &(opb_{b1,n2,n3,d}\ \texttt{precedes}\ opb_{b,n,n1,d} \wedge pd_{b,b1,d} = 0) \\ &b \text{ e } b1 \in (BO_{b,b1,d})\ (b \neq b1), n, n1, n2 \text{ e } n3\ \in N\ (n \neq n1 \neq n2 \neq n3), \\ &d\ \in D\ (d = dc_{b,b1}) \end{aligned} \tag{107}$$

A variável binária $pd_{b,b1,d}$ representa a ordem de alocação relativa entre as bateladas b e $b1$ no primeiro trecho de conflito $dc_{b,b1}$, devendo esta escolha ser propagada por toda a rede. Para $pd_{b,b1,d} = 1$, b deve obrigatoriamente preceder $b1$ nos demais dutos compartilhados, caso contrário ($pd_{b,b1,d} = 0$), $b1$ precede b em todos os trechos seguintes (restrições 108 e 109).

$$\begin{aligned} &pd_{b,b1,d} = 1\ \rightarrow opb_{b,n,n1,d1}\ \texttt{precedes}\ opb_{b1,n,n1,d1} \\ &b \text{ e } b1 \in (BO_{b,b1,d})\ (b \neq b1), n \text{ e } n1\ \in N\ (n \neq n1), \\ &d \text{ e } d1\ \in D\ (d \neq d1), (d = dc_{b,b1}) \end{aligned} \tag{108}$$

$$\begin{aligned} pd_{b,b1,d} = 0 \ \rightarrow opb_{b1,n,n1,d1} \ \texttt{precedes} \ opb_{b,n,n1,d1} \\ b \text{ e } b1 \in (BO_{b,b1,d}) \ (b \neq b1), n \text{ e } n1 \ \in N \ (n \neq n1), \\ d \text{ e } d1 \ \in D \ (d \neq d1), (d = dc_{b,b1}) \end{aligned} \tag{109}$$

Considerando um par de bateladas b e $b1$ relacionadas a um mesmo produto e origem, a ordem de geração e envio das bateladas devem ser respeitadas, consistindo numa precedência obrigatória de balanço de massa (hipótese 1 de modelagem). Do mesmo modo, em relação a uma dada origem e duto de bombeio, uma precedência obrigatória entre pares de bateladas de produtos distintos é verificada em função da disposição de suas janelas de tempo (hipótese 2 de modelagem). A restrição 110 é gerada apenas para os pares de bateladas que possuam um precedência obrigatória (b e $b1 \in BP_{b,b1,d}$).

$$\begin{aligned} op_{b,n,n1,d} \ \texttt{precedes} \ op_{b1,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in BP_{b,b1,d} \ (b \neq b1), n \text{ e } n1 \in N \ (n \neq n1), d \in D \end{aligned} \tag{110}$$

A restrição 111 garante a precedência entre operações de bateladas distintas em uma área intermediária $n1$. Caso o bombeio da batelada b no duto d ocorra antes da batelada $b1$, o início da passagem da batelada $b1$ em direção à área $n3$ pelo duto $d2$ ($opb_{b1,n1,n3,d2}$) deve ocorrer após o término de passagem na batelada b em direção à área $n2$ pelo duto $d1$ ($opb_{b,n1,n2,d1}$).

$$\begin{aligned} opb_{b,n,n1,d} \ \texttt{precedes} \ opb_{b1,n,n1,d} \ \leftrightarrow \ opb_{b,n1,n2,d1} \ \texttt{precedes} \ opb_{b1,n1,n3,d2} \\ b \text{ e } b1 \in B \ (b \neq b1), n, n1, n2 \text{ e } n3 \in N \ (n \neq n1 \neq n2 \neq n3), \\ d \text{ e } d1 \text{ e } d2 \in D \ (d \neq d1 \neq d2) \end{aligned} \tag{111}$$

A restrição 112 evita a sobreposição das bateladas b e $b1$ que disputam a alocação do duto d ao longo da rota de fluxo.

$$\begin{aligned} (opb_{b,n,n1,d} \ \texttt{precedes} \ opb_{b1,n2,n3,d}) \ \vee \ (opb_{b1,n2,n3,d} \ \texttt{precedes} \ opb_{b,n,n1,d}) \\ b \text{ e } b1 \in B \ (b \neq b1), n, n1, n2 \text{ e } n3 \ \in N \ (n \neq n1 \neq n2 \neq n3), d \ \in D \end{aligned} \tag{112}$$

As equações 113 a 116 modelam os casos de restrições locais de envio simultâneo de bateladas nas áreas operacionais que possuem limitações de recursos de bombeio. O gerenciamento de recursos compartilhados é uma das principais funcionalidades suportadas pelo ILOG Scheduler 5.3. Em particular, as atividades podem requerer recursos unários que modelam a existência de um único elemento (por exemplo um trecho de duto da rede) ou recursos discretos, representando um conjunto de elementos com a mesma função (conjunto de bombas).

A partir da área de origem N2, duas bateladas b e $b1$ podem ser bombeadas simultaneamente, sendo 1 bombeio através do duto 5 e outro através de um dos dutos com sentido de

envio (2,8,9 ou 15). A precedência de alocação das bombas é realizada através da declaração `requires(1)`, onde (1) indica o número de recursos a serem alocados, neste caso, uma unidade de bomba. O parâmetro rb_n indica o número de bombas disponíveis na área n para serem alocadas (restrição 113).

$$\begin{aligned} opb_{b1,n,n1,d}\ \texttt{requires}(1)\ rb_n \\ b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b = 2, \\ d \in D\ (d = 2 \vee d = 8 \vee d = 9 \vee d = 15) \end{aligned} \tag{113}$$

A restrição 114 controla as operações de bombeio a partir da área de origem N4. Neste caso, apenas 1 bombeio pode ocorrer através de um dos dutos com sentido de envio (6 ou 7).

$$\begin{aligned} opb_{b1,n,n1,d}\ \texttt{requires}(1)\ rb_n \\ b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b = 4, \\ d \in D\ (d = 6 \vee d = 7) \end{aligned} \tag{114}$$

A restrição 115 garante a ocorrência de apenas um bombeio a partir da área N7, ou seja, não é permitido o bombeio simultaneo através de dois trechos de duto (duto 11, 13 ou 14).

$$\begin{aligned} opb_{b1,n,n1,d}\ \texttt{requires}(1)\ rb_n \\ b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b = 7, \\ d \in D\ (d = 11 \vee d = 13 \vee d = 14) \end{aligned} \tag{115}$$

A restrição 116 controla as operações de bombeio na área N1. Considerando o produto $p_b = 3$, não é possível bombear simultaneamente para os trechos de duto 1 e 7 devido a restrições de alinhamento.

$$\begin{aligned} opb_{b1,n,n1,d}\ \texttt{requires}(1)\ rb_n \\ b \in B, n \text{ e } n1 \in N\ (n \neq n1), n = no_b = 1, \\ d \in D\ (d = 1 \vee d = 7), \text{ para } p_b = 3 \end{aligned} \tag{116}$$

Para a condição em que a vazão de recebimento (vaz_b) é maior ou igual a vazão de envio (vaz_{b1}), a restrição 117 controla a operação pulmão na área N2 para o produto $p_b = p_{b1} = 7$. Vale notar que o balanço de massa deve ser respeitado, ou seja, o volume recebido (vol_b) é igual ao volume enviado (vol_{b1}).

$$\begin{aligned} opb.\texttt{start}_{b1,n1,n2,d1} \geq opr.\texttt{start}_{b,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b1 = b+1), n \text{ e } n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), \\ n = no_b = 2, d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), \\ \text{para } p_b = p_{b1} = 7, vol_b = vol_{b1}, vaz_b \geq vaz_{b1} \end{aligned} \tag{117}$$

Da mesma forma, para a condição em que a vazão de recebimento (vaz_b) é maior ou igual a vazão de envio (vaz_{b1}), as restrições 118 e 119 controlam a operação pulmão na área N4 para os produtos $p_b = p_{b1} = 7$ e $p_b = p_{b1} = 9$, respectivamente.

$$\begin{aligned} opb.\texttt{start}_{b1,n1,n2,d1} \geq opr.\texttt{start}_{b,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b1 = b+1), n, n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), \\ n = no_b = 4, d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), \\ \text{para } (p_b = p_{b1} = 7), vol_b = vol_{b1}, vaz_b \geq vaz_{b1} \end{aligned} \tag{118}$$

$$\begin{aligned} opb.\texttt{start}_{b1,n1,n2,d1} \geq opr.\texttt{start}_{b,n,n1,d} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b1 = b+1), n, n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), \\ n = no_b = 4, d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), \\ \text{para } (p_b = p_{b1} = 9), vol_b = vol_{b1}, vaz_b \geq vaz_{b1} \end{aligned} \tag{119}$$

Caracterizando um segundo caso, para a condição em que a vazão de recebimento (vaz_b) é menor que a vazão de envio (vaz_{b1}), a restrição 120 controla a operação pulmão na área N2 para o produto $p_b = p_{b1} = 7$.

$$\begin{aligned} opb.\texttt{start}_{b1,n1,n2,d1} \geq opr.\texttt{start}_{b,n,n1,d} + vol_b/vaz_b - vol_{b1}/vaz_{b1} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b1 = b+1), n, n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), \\ n = no_b = 2, d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), \\ \text{para } p_b = p_{b1} = 7, vol_b = vol_{b1}, vaz_b < vaz_{b1} \end{aligned} \tag{120}$$

Finalmente, para a condição em que a vazão de recebimento (vaz_b) é menor que a vazão de envio (vaz_{b1}), as restrições 121 e 122 controlam a operação pulmão na área N4 para os produtos $p_b = p_{b1} = 7$ e $p_b = p_{b1} = 9$, respectivamente.

$$\begin{aligned} opb.\texttt{start}_{b1,n1,n2,d1} \geq opr.\texttt{start}_{b,n,n1,d} + vol_b/vaz_b - vol_{b1}/vaz_{b1} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b1 = b+1), n, n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), \\ n = no_b = 4, d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), \\ \text{para } (p_b = p_{b1} = 7), vol_b = vol_{b1}, vaz_b \geq vaz_{b1} \end{aligned} \tag{121}$$

$$\begin{aligned} opb.\texttt{start}_{b1,n1,n2,d1} \geq opr.\texttt{start}_{b,n,n1,d} + vol_b/vaz_b - vol_{b1}/vaz_{b1} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b1 = b+1), n, n1 \text{ e } n2 \in N\ (n \neq n1 \neq n2), \\ n = no_b = 4, d \text{ e } d1 \in D\ (d \neq d1), \\ \text{para } (p_b = p_{b1} = 9), vol_b = vol_{b1}, vaz_b \geq vaz_{b1} \end{aligned} \tag{122}$$

A geração de uma nova ordem de bombeio nas áreas de origem impede de utilizar as bateladas designadas *a priori* para as reversões dos dutos. A abordagem no modelo de ordenação para os dutos onde ocorre esse tipo de operação é considerar o atraso referente à operação de reversão, computado pelo deslocamento de todo o volume do duto através das

bateladas auxiliares. Desta forma, a restrição 123 detecta a inversão das origens de bombeio ($opb_{b,n,n1,d}$ `precedes` $opb_{b1,n2,n3,d}$) e atrasa o início da reversão de sentido ($opb.\texttt{start}_{b,n,n1,d}$) em função do término de bombeio da última batelada em sentido normal e do tempo de deslocamento do duto à vazão da batelada $b1$ ($opb.\texttt{end}_{b1,n2,n3,d} + vol_d/vaz_{b1}$). Adotar a vazão da batelada auxiliar como sendo igual a vazão do produto que está sendo empurrado é coerente em função da origem dos movimentos ser a mesma ($n2$).

O objetivo é considerar o espaço de tempo destinado às bateladas auxiliares de reversão e seu efeito na ordenação das bateladas.

$$\begin{aligned} op_{b,n,n1,d}\ \texttt{precedes}\ op_{b1,n2,n3,d} \rightarrow \\ opb.\texttt{start}_{b,n,n1,d} \geq (opb.\texttt{end}_{b1,n2,n3,d} + vol_d/vaz_{b1}) \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b \neq b1), n, n1, n2 \text{ e } n3 \in N\ (n \neq n2, n1 \neq n3), \\ d \in D_{REV} \end{aligned} \tag{123}$$

A restrição 124 define a ordenação relativa entre as bateladas de acordo com a sequência de alocação dos dutos em toda a rede. Em um dado trecho de duto $d \in D$, se for verificado que o início de alocação da batelada b é menor que o início de alocação da batelada $b1$ ($op_{b,n,n1,d}$ `precedes` $op_{b1,n2,n3,d}$), a relação $ord_b < ord_{b1}$ deve ser verificada. Desta forma, associando o tempo de passagem das bateladas em cada trecho de duto, a ordem global das bateladas na carteira de programação é recuperada através da variável ord_b que assume apenas valores inteiros.

$$\begin{aligned} op_{b,n,n1,d}\ \texttt{precedes}\ op_{b1,n2,n3,d} \rightarrow ord_b < ord_{b1} \\ b \text{ e } b1 \in B\ (b \neq b1), n, n1, n2 \text{ e } n3 \in N\ (n \neq n1 \neq n2 \neq n3), d \in D \end{aligned} \tag{124}$$

A forma de representação da ordem global está relacionada ao início de bombeio das bateladas em cada trecho de duto, devendo ser propagada por toda a rede e envolver uma verificação de ordem entre todas as bateladas envolvidas na programação. Esta ordem deve então ser respeitada posteriormente pelo modelo de temporização, criando uma hierarquia para as operações de bombeio nas áreas de origem e nas operações de passagem em áreas intermediárias.

6.4 CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou um novo modelo de ordenação da lista de bateladas utilizada na etapa de temporização através do uso de técnicas de programação matemática em CLP (Constraint Logic Programming).

A Tabela 11 apresenta um resumo dos conjuntos de restrições e suas respectivas funcionalidades no modelo matemático.

Tabela 11 – Estrutura do modelo de ordenação

Elemento	Equações
Função objetivo	(98)
Propagação	(99) a (102)
Violações	(103) a (106)
Precedência	(107) a (111)
Alocação de dutos	(112)
Alinhamentos locais	(113) a (116)
Operação pulmão	(117) a (122)
Operação de reversão	(123)
Ordenação	(124)

O modelo foi elaborado visando aproveitar os recursos do ambiente de desenvolvimento OPL CP (*Constraint Programming*) existente no pacote comercial ILOG OPL Studio 3.6.1. Foram utilizadas funcionalidades dos algoritmos ILOG Solver 5.3 e ILOG Scheduler 5.3. De forma simplificada, as restrições 99 a 102 estimam a propagação dos produtos em função dos volumes dos dutos que compõe a rota de fluxo, o volume das bateladas e suas vazões médias de deslocamento. Esta aproximação se mostrou coerente em função de dados históricos fornecidos pelo sistema de programação da PETROBRAS, embora não estejam sendo consideradas situações como composição de vazões e paradas de bombeio. As equações 103 a 106 são similares àquelas utilizadas no modelo de escalonamento, sendo que as variáveis de violação devem ser minimizadas na função objetivo (equação 98). As restrições de precedência, dadas pelas equações 107 a 111, foram definidas para reduzir o número de variáveis binárias e restrições geradas (através das precedências obrigatórias) e para propagar a mudança de ordem das bateladas através da rede de dutos, resolvendo apenas os trechos de conflito. A restrição 112 evita que ocorram sobreposições de bateladas durante a alocação dos trechos de dutos. De forma semelhante ao modelo de escalonamento, as equações 113 a 116 modelam as restrições locais através da funcionalidade `requires` oferecida pelo ILOG Scheduler 5.3. As equações 117 a 122 modelam as restrições de pulmão, mantendo a ordem correta entre as bateladas que fazem esta operação na rede. A operação de reversão foi implementada através da equação 123, de forma bastante simplificada em relação ao modelo de escalonamento, pois apenas o efeito do atraso desta operação deve ser considerado durante a fase de ordenamento das bateladas. Por fim, a restrição 124 efetivamente determina a ordem global das bateladas na carteira com base na ocorrência relativa das movimentações em cada trecho de duto. O efeito esperado é obter um reordenamento da programação inicial, onde as prioridades são redefinidas para um melhor atendimento das janelas de tempo fornecidas pelo módulo de Alocação de Recursos. Uma discussão complementar dos detalhes de implementação é apresentada no Capítulo 7, o qual aborda os resultados gerados com a solução do modelo de ordenação desenvolvido.

7 RESULTADOS DO MODELO DE ORDENAÇÃO

Neste capítulo são discutidos os resultados da aplicação do modelo de ordenação no reordenamento da programação da rede de dutos em estudo. O objetivo principal é comparar o efeito de diferentes sequências de bombeio no resultado final da programação de movimentações de produtos, principalmente em relação à redução das violações das janelas de tempo que traduzem o atendimento das tancagens agregadas. A metodologia foi aplicada aos mesmos cenários descritos no Capítulo 5, permitindo uma comparação entre as duas abordagens de ordenação de bateladas: a heurística construtiva e o modelo desenvolvido com técnicas de CLP. A execução dos modelos segue a ordem de criação das instâncias, como será descrito adiante. O modelo de ordenação foi implementado e todas as instâncias foram resolvidas no *solver* comercial no ambiente OPL CP (*Constraint Programming*) existente no pacote comercial ILOG OPL Studio 3.6.1 através dos algoritmos ILOG Solver 5.3 e ILOG Scheduler 5.3. Os resultados do modelo de ordenação foram usados como entrada para o modelo de temporização, de forma similar ao procedimento descrito no Capítulo 5. As opções de parâmetros de resolução nas duas situações correspondem à configuração padrão da ferramenta, sendo que para uniformizar os resultados, a plataforma computacional utilizada foi a mesma dos resultados obtidos anteriormente, ou seja, composta por um Processador Intel-Core2Duo 2.13GHz com 2GB de memória RAM.

7.1 GERAÇÃO DAS INSTÂNCIAS ORDENADAS

A geração das instâncias ordenadas utiliza a mesma lista de bateladas fornecida pelo módulo de Alocação de Recursos, sendo que o seguintes passos devem ser executados antes da resolução do modelo de ordenação:

- Retirar da lista de movimentações as bateladas de inicialização, considerando esta ordem como definida *a priori*. Vale ressaltar que este procedimento é igualmente adotado pela heurística construtiva;

- Retirar da lista de movimentações as bateladas referentes às operações de reversão. Desta forma, o tempo considerado nas reversões podem ser computado corretamente através da

restrição 122, deixando a cargo do modelo determinar nos dutos que revertem o instante apropriado para tal operação;

- Identificar os pares das operações pulmão para que durante o processo de ordenação as referências utilizadas pelas restrições de temporização não sejam afetadas. Em particular, as bateladas que formam a operação pulmão devem estar agrupadas tanto na lista de bateladas original quanto na carteira ordenada;

- Após a geração da nova lista de bateladas já com as sequências de bombeio redefinidas, o passo seguinte é verificar todas as situações em que ocorrem reversões dos dutos e inserir as bateladas auxiliares que complementam estas operações. Neste caso, os pontos de reversão podem ser distintos daqueles observados na carteira original, modificando o número de bateladas inicialmente existente;

- Por último, a inserção das bateladas de inicialização complementam a carteira com a nova ordenação, possibilitando a geração da programação através do modelo de escalonamento.

A resolução do modelo de ordenação antecede a execução do modelo de temporização. Os passos anteriores relacionados à inserção das bateladas de inicialização/reversão e identificação das bateladas pulmão foram executados através da ferramenta OPLScript do ambiente ILOG OPL 3.6.1 (ILOG, 2002b), consumindo tempo computacional não significativo. Os tempos computacionais que serão apresentados na sequência se referem apenas à execução dos modelos matemáticos, sendo que o tempo total de obtenção de uma solução completa deve considerar os tempos de resolução dos modelos de ordenação e temporização.

Os resultados obtidos durante a fase de ordenação dos cenários C1 a C7 através do modelo CLP estão apresentados na Tabela 12. Para cada uma das soluções obtidas, a tabela informa o número de bateladas avaliadas na ordenação, o número total de variáveis, o número de variáveis $pd_{b,b1,d}$ que representam os conflitos de ordenação (ver definição na seção 6.3), o número de restrições, o valor da solução encontrada (Função Objetivo) e o tempo computacional. Em relação ao critério de otimização adotado no modelo de ordenação, os pesos podem ser definidos de forma a penalizar a solução em relação à satisfação das janelas de tempo na origem e no destino, bem como ponderar alguns produtos críticos de forma a atender situações especiais de programação. De forma simplificada, optou-se por penalizar em proporções iguais as violações das janelas de tempo na origem e no destino ($kto = 1$ e $ktd = 1$), coerentemente com os parâmetros adotados no modelo de escalonamento.

Tabela 12 – Resultados computacionais - modelo de ordenação

Cenários	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Nº de Bateladas	49	65	72	67	77	78	81
Nº Total de Variáveis	2308	2712	3071	2792	3305	3300	2996
Nº de Variáveis $pd_{b,b1,d}$	35	43	72	45	73	67	64
Nº de Restrições	2335	2866	3486	3040	4307	4192	3474
Função Objetivo	964	69	700	343	471	485	0
Tempo Computacional (s)	9,14	14,27	16,51	19,45	20,95	24,09	20,14

Segundo a Tabela 12, em geral o tempo computacional aumenta com o aumento no número de bateladas. De forma similar ao que ocorre no modelo de escalonamento, a quantidade de restrições e variáveis geradas é proporcional ao número de bateladas e rotas alocadas, sofrendo influência ainda do número de precedências obrigatórias e das restrições relacionadas aos trechos de conflito. O número de variáveis $pd_{b,b1,d}$ indica as possíveis mudanças de ordem em relação à sequência previamente estabelecida pela heurística construtiva, porém nem todas as combinações sofrem alterações. Como descrito na seção 6.3, quanto maior o número de precedências obrigatórias, menor será o número de conflitos a serem resolvidos através da variável $pd_{b,b1,d}$. A exemplo dos resultados obtidos na etapa de escalonamento, a função objetivo é um indicativo do número de violações que ainda podem ocorrer, representando também a dificuldade de alocar todas as bateladas em suas respectivas janelas de tempo segundo os critérios de ordenação adotados. Assim, por exemplo, no cenário C7 da Tabela 12, o valor zero da função objetivo indica que todas as janelas de tempo foram satisfeitas. Vale lembrar que a propagação das bateladas no modelo de ordenação é uma simplificação da dinâmica representada no modelo de temporização, tanto em relação à composição de vazões quanto às paradas de bombeio.

7.2 TEMPORIZAÇÃO DAS INSTÂNCIAS ORDENADAS

Após a obtenção de cada uma das carteira ordenadas, o modelo de escalonamento foi resolvido para as três situações de penalização por horossazonalidade e troca de turno. As Tabelas 13, 14 e 15 apresentam os resultados para os diferentes casos considerados.

Tabela 13 – Resultados computacionais após ordenação (Caso A)

Cenários	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Nº de Bateladas	75	92	98	98	105	108	111
Nº Total de Variáveis	25057	31962	34251	34137	36757	37282	39853
Nº de Variáveis Binárias	23742	30411	32652	32538	35016	35547	38136
Nº de Restrições	58968	75130	80488	80336	86539	87710	94883
Nº de Iterações	4304	4557	4454	5739	4880	4815	5201
Função Objetivo ($\times 10^6$)	10,49	2,08	2,31	6,78	8,63	11,75	4,67
Tempo Computacional (s)	8,06	12,11	13,25	15,41	18,82	16,86	20,69
Bateladas de Inicialização	22	25	24	29	22	24	23
Nº Pulmão	0	3	5	3	6	6	13
Nº Reversão	4	2	2	2	6	6	7
Horizonte (h)	731	847	845	738	805	866	692

Tabela 14 – Resultados computacionais após ordenação (Caso B)

Cenários	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Nº de Bateladas	75	92	98	98	105	108	111
Nº Total de Variáveis	48799	62373	66615	66675	71479	72829	77767
Nº de Variáveis Binárias	47484	60822	65016	65076	69738	71094	76050
Nº de Restrições	114954	146803	156580	157070	168145	171311	184385
Nº de Iterações	11180	13094	12547	20702	13225	12662	15749
Função Objetivo ($\times 10^6$)	10,54	2,17	2,34	6,96	8,69	11,76	4,84
Tempo Computacional (s)	19,30	30,95	31,83	99,63	35,38	29,36	54,45
Bateladas de Inicialização	22	25	24	29	22	24	23
Nº Pulmão	0	3	5	3	6	6	13
Nº Reversão	4	2	2	2	6	6	7
Horizonte (h)	731	847	845	738	805	866	692

Tabela 15 – Resultados computacionais após ordenação (Caso C)

Cenários	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Nº de Bateladas	75	92	98	98	105	108	111
Nº Total de Variáveis	72667	92937	99267	99387	106495	108517	115681
Nº de Variáveis Binárias	71352	91386	97668	97788	104754	106782	113964
Nº de Restrições	171318	218935	233536	234326	250633	255335	273887
Nº de Iterações	19270	23466	22681	31643	24442	22895	28991
Função Objetivo ($\times 10^6$)	10,54	2,19	2,34	6,96	8,75	11,83	4,84
Tempo Computacional (s)	50,59	93,61	90,14	207,27	106,84	81,41	165,16
Bateladas de Inicialização	22	25	24	29	22	24	23
Nº Pulmão	0	3	5	3	6	6	13
Nº Reversão	4	2	2	2	6	6	7
Horizonte (h)	734	847	845	741	806	866	692

De forma geral, o número de variáveis e restrições geradas na solução do modelo de escalonamento após a ordenação das carteiras de bateladas apresenta grande similaridade com os resultados obtidos no Capítulo 5. Isto se deve principalmente a pouca alteração ocorrida no número de bateladas de cada cenário, relacionada exclusivamente às bateladas de reversão que são dependentes da ordenação obtida nos dutos sujeitos a este tipo de operação (alternância de bombeios em sentidos diferentes). Os cenários C1, C5 e C6 tiveram o acréscimo de uma batelada de reversão cada, enquanto o cenário C7 passou de 8 para 7 bateladas de reversão. O modelo de ordenação, nestes casos, determinou dinâmicas distintas de bombeio que resultaram em números diferentes de reversões dos dutos na fase de temporização. Como será mostrado adiante, nem sempre o aumento de reversões está relacionado ao aumento dos atrasos na rede. As operações de reversão, quando utilizadas de forma adequada, permitem um melhor atendimento das janelas de tempo associadas, auxiliando a entrega de outras bateladas.

Como análise comparativa, os principais resultados computacionais das soluções obtidas com a heurística construtiva (Tabelas 4, 5 e 6) e após a ordenação das carteiras de bateladas (Tabelas 13, 14 e 15) estão resumidos na Tabela 16. Nesta tabela, estão relacionadas a função objetivo, o tempo computacional de resolução do modelo de escalonamento e o horizonte de programação para os três casos de penalização por horossazonalidade e troca de turno.

Tabela 16 – Modelo de Escalonamento - solução inicial e ordenada

Cenários		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Caso A	**Função Obj. ($\times 10^6$) (inicial)**	23,80	1,64	5,10	17,6	11,79	18,74	10,89
	Função Obj. ($\times 10^6$) (ordenada)	10,49	2,08	2,31	6,78	8,63	11,75	4,67
	Tempo Comp. (s) (inicial)	7,56	11,30	12,44	13,83	17,17	16,80	22,83
	Tempo Comp. (s) (ordenada)	8,06	12,11	13,25	15,41	18,82	16,86	20,69
	Horizonte (h) (inicial)	731	847	845	738	783	817	698
	Horizonte (h) (ordenada)	731	847	845	738	805	866	692
Caso B	**Função Obj. ($\times 10^6$) (inicial)**	25,30	1,70	5,10	18,09	11,86	18,78	12,04
	Função Obj. ($\times 10^6$) (ordenada)	10,54	2,17	2,34	6,96	8,69	11,76	4,84
	Tempo Comp. (s) (inicial)	30,28	27,83	34,97	52,95	31,91	29,59	51,41
	Tempo Comp. (s) (ordenada)	19,30	30,95	31,83	99,63	35,38	29,36	54,45
	Horizonte (h) (inicial)	731	847	845	738	783	817	710
	Horizonte (h) (ordenada)	731	847	845	738	805	866	692
Caso C	**Função Obj. ($\times 10^6$) (inicial)**	25,31	1,70	5,15	18,12	11,86	19,27	12,71
	Função Obj. ($\times 10^6$) (ordenada)	10,54	2,19	2,34	6,96	8,75	11,83	4,84
	Tempo Comp. (s) (inicial)	102,09	80,99	106,48	130,47	88,38	66,22	163,03
	Tempo Comp. (s) (ordenada)	50,59	93,61	90,14	207,27	106,84	81,41	165,16
	Horizonte (h) (inicial)	734	847	845	745	783	817	723
	Horizonte (h) (ordenada)	734	847	845	741	806	866	692

Dentre os itens relacionados na Tabela 16, com exceção do cenário C2, pode-se notar uma melhora significativa da função objetivo da maior parte dos cenários simulados. O fator principal a ser considerado para o entendimento desta questão está relacionado à redução do número de violações das janelas de tempo, como será destacado na seção 7.3. Lembrando que a ponderação utilizada no modelo de temporização foi escolhida no sentido de evitar ao máximo as violações das janelas de tempo ($kto = 10000$ e $ktd = 10000$), reduções do número de bateladas que infringem as restrições das janelas provocam mudanças relavantes na função objetivo.

Em relação ao tempo de execução do modelo de escalonamento, não se verifica diferença significativa no Caso A para as soluções inicial e ordenada. A partir do aumento do número de penalizações por horossazonalidade e troca de turno (Casos B e C), a mudança de ordem das bateladas passa a ter influência no tempo computacional de solução. Isto é devido à dificuldade imposta por todas as restrições operacionais a serem ativadas, podendo ser acentuada ou reduzida em função da prioridade das bateladas na carteira, traduzida pela ordem de bombeio. Apesar da diferença observada, os tempos computacionais obtidos possuem a mesma ordem de grandeza.

De forma similar, a mudança de ordem das bateladas pode afetar o horizonte total de programação de forma relevante, como observado nos cenários C6 (aumento de 49 h) e cenário C7 (redução de 31 h). Em particular, o tempo total de programação pode ser influenciado pelo número de bateladas de reversão. Dependendo do volume do duto a ser deslocado, esta operação pode consumir até vários dias de bombeio. Esta última relação pode ser observada com maior efeito nos cenários C6 e C7. Pode-se concluir também que nem sempre é possível realizar toda

a movimentação necessária no horizonte de 30 dias, sendo que tal aspecto é dependente de uma série de fatores tais como vazões de bombeio, paradas por penalização e, como constatado, pela ordem de envio dos produtos.

7.3 VIOLAÇÕES DAS JANELAS DE TEMPO

Dentre os principais resultados obtidos através das simulações realizadas nas carteiras ordenadas, pode-se destacar a mudança ocorrida no número de violações das janelas de tempo que se reflete no valor da função objetivo (ver comparativo na Tabela 16). As Tabelas 17, 18 e 19 mostram os valores em número/horas das violações detectadas nos cenários ordenados para os três casos de horossazonalidade e troca de turno.

Tabela 17 – Violações após ordenação (Caso A)

Cenários		**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**C6**	**C7**
Origem	**Adianta (nº/h)**	5/273	4/146	1/5	12/319	2/24	0/0	0/0
	Atrasa (nº/h)	2/56	0/0	0/0	1/8	9/273	12/530	1/66
Destino	**Adianta (nº/h)**	0/0	0/0	3/193	0/0	0/0	1/32	0/0
	Atrasa (nº/h)	12/700	1/34	1/1	9/327	11/534	15/578	9/376
Violação Total		19/1029	5/180	5/199	22/654	22/831	28/1140	11/442

Tabela 18 – Violações após ordenação (Caso B)

Cenários		**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**C6**	**C7**
Origem	**Adianta (nº/h)**	6/256	5/150	1/7	12/319	2/24	0/0	0/0
	Atrasa (nº/h)	2/57	1/4	0/0	1/8	9/274	12/530	1/66
Destino	**Adianta (nº/h)**	0/0	0/0	3/193	0/0	0/0	1/32	0/0
	Atrasa (nº/h)	12/720	1/34	1/1	10/344	11/535	15/578	9/388
Violação Total		20/1033	7/188	5/201	23/671	22/833	28/1140	11/454

Tabela 19 – Violações após ordenação (Caso C)

Cenários		**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**C6**	**C7**
Origem	**Adianta (nº/h)**	6/261	5/155	1/7	12/319	2/24	0/0	0/0
	Atrasa (nº/h)	2/57	1/2	0/0	1/8	10/275	12/530	1/66
Destino	**Adianta (nº/h)**	0/0	0/0	3/193	0/0	0/0	1/32	0/0
	Atrasa (nº/h)	12/716	2/35	1/1	10/345	12/541	16/583	9/388
Violação Total		20/1034	8/192	5/201	23/672	24/840	29/1145	11/454

Com os resultados obtidos após a reordenação das programações e em posse dos valores de violação da solução inicial apresentados na seção 5.3 (tabelas 8, 9 e 10), a Tabela 20 mostra o comparativo entre as duas abordagens de ordenação de bateladas: a heurística construtiva (inicial) e o modelo desenvolvido com técnicas de CLP (ordenada).

Tabela 20 – Comparativo de violações - solução inicial e ordenada

Cenários		**C1**	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**C6**	**C7**
Caso A	**Violação Total (inicial)**	27/2357	6/136	11/479	33/1740	21/1149	33/1838	21/1061
	Violação Total (ordenada)	19/1029	5/180	5/199	22/654	22/831	28/1140	11/442
Caso B	**Violação Total (inicial)**	26/2506	6/142	11/479	32/1783	21/1155	33/1838	25/1172
	Violação Total (ordenada)	20/1033	7/188	5/201	23/671	22/833	28/1140	11/454
Caso C	**Violação Total (inicial)**	26/2507	6/142	11/483	33/1787	21/1155	33/1886	26/1236
	Violação Total (ordenada)	20/1034	8/192	5/201	23/672	24/840	29/1145	11/454

Analisando a Tabela 20 pode-se observar que o número/horas das violações sofreu redução significativa em maior parte dos cenários analisados. A exceção ocorreu no cenário C2 que apresentou um aumento médio das bateladas que violaram as janelas de tempo nos três casos de penalização (principalmente adiantamento de bombeio na origem). A causa relacionada com este resultado reside nos critérios adotados no modelo de ordenação, que simplifica a dinâmica da rede em relação à composição de vazões e principalmente em relação às paradas de bombeio. Em função da mudança das ordens de envio dos produtos, dutos longos podem sofrer interrupções significativas e impedir que algumas bateladas cumpram as restrições impostas pelas janelas de tempo. Mesmo que o modelo de ordenação apresente valores baixos de violação, indicando que as bateladas podem respeitar as janelas de tempo, as restrições do modelo de temporização podem provocar efeitos indesejados. Como a função objetivo do modelo de temporização pondera igualmente as variáveis de relaxação tanto na origem quanto no destino, o adiantamento do bombeio de algumas bateladas impede que violações maiores ocorram durante a entrega de outras bateladas no destino. Ou seja, bateladas podem ser adiantadas na origem de bombeio para empurrar bateladas até o destino, minimizando a violação total. O contrário também pode ocorrer, onde pequenas violações nas área de destino compensam violações maiores nas áreas de origem.

Como mencionado no Capítulo 5, os critérios adotados no modelo de temporização não permitem a mudança dos volumes durante a movimentação dos produtos, embora, na prática operacional, os especialistas muitas vezes são obrigados a dividir os volumes ou mesmo quebrar as bateladas em áreas intermediárias para garantir a entrega dos produtos no tempo programado.

7.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo, foram apresentados os resultados obtidos com o modelo de ordenação da lista de bateladas. O principal critério adotado para avaliar o ganho obtido foi comparar as soluções inicial e ordenada em função das violações das janelas de tempo, relacionando estes valores à redução da função objetivo do modelo de temporização. Tomando como premissa o fato das janelas de tempo refletirem os níveis de estoque a serem respeitados, a menor violação global destas janelas implica numa melhor manutenção dos estoques, efeito obtido na maior parte dos cenários apresentados.

Quanto ao custo computacional relacionado, existe é claro um preço a ser pago se comparado à heurística construtiva, principalmente quando o número de bateladas a serem avaliadas na ordenação aumenta (ver resultados computacionais da Tabela 12). Além disso, cada carteira de programação deve ser gerada de forma coerente antes de ser ordenada e passar por uma adequação após a ordenação, onde se inclui as bateladas de reversão e inicialização (passos destacados na seção 7.1). Sendo assim, o processo é significativamente mais complexo que a heurística construtiva. Porém, pode ser adequadamente gerenciado usando-se o banco de dados da arquitetura proposta.

8 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O presente trabalho teve como principal proposta aplicar técnicas de programação matemática ao problema de escalonamento de operações em uma rede de dutos da PETROBRAS. O crescimento da produção de petróleo, derivados e gás natural traz como consequência o aumento da necessidade de escoamento da produção e de distribuição de combustíveis, tornando o transporte dutoviávio um modal estratégico para a indústria petrolífera. Sendo um problema de grande porte, responsável pela interligação entre as diversas regiões produtoras e consumidoras do país, o transporte por redes de dutos possui um conjunto considerável de boas práticas de operação que envolve desde a eficiência das operações de movimentação até aspectos de segurança das refinarias e dos consumidores.

A necessidade de estruturas de otimização que possam auxiliar no procedimento de tomada de decisão operacional e o contexto do transporte dutoviário de derivados de petróleo foram os elementos motivadores desta pesquisa. Existem poucas ferramentas comerciais de auxílio à programação de redes de dutos, mas que não atendem completamente às necessidades da malha em estudo neste trabalho. Além disso, os trabalhos existentes na literatura são recentes e revelam uma área ainda pouco estudada. Em grande parte das publicações encontradas, os cenários abordados possuem somente alguns trechos de dutos e um reduzido número de refinarias e terminais.

O problema do transporte de produtos através de uma rede de dutos foi detalhadamente descrito no Capítulo 3 a partir do conhecimento heurístico dos especialistas envolvidos. Particularidades das operações da rede de claros (derivados leves de petróleo de alto valor agregado) do estado de São Paulo foram abordadas, requisito fundamental para o entendimento das restrições que norteiam os modelos desenvolvidos neste trabalho.

Um dos problemas que acompanham o desenvolvimento de modelos de programação matemática, em especial modelos MILP, é sua natureza combinatória de difícil resolução, tornando a complexidade computacional um fator relevante (GAREY; JOHNSON, 1979). Visando contornar essa realidade, no Capítulo 3 foi proposta a subdivisão do problema com base nos três elementos-chave do escalonamento de operações (REKLAITIS, 1992). Concebeu-se uma arquitetura que integra as respostas dos módulos de Alocação de Recursos e Sequenciamento ao modelo MILP de temporização. De forma simplificada, o módulo de Alocação de Recursos

determina os recursos a serem utilizados (estoques, áreas e trechos de dutos) e o módulo de Sequenciamento ordena as atividades de bombeio através de heurísticas, sendo que o modelo MILP é responsável pela temporização de uso dos recursos pelas atividades.

O Capítulo 4 apresentou a formulação do modelo de temporização baseado em técnicas de programação linear inteira mista (MILP) com domínio de tempo contínuo. Foram implementadas um grande número de restrições operacionais relevantes para uma correta representação do problema, tais como composição de vazões ao longo das rotas de fluxo, alinhamentos locais, penalização por horossazonal e troca de turno, operações de reversão e pulmão. No modelo de temporização, o critério de otimização considerou prioritariamente a minimização do horizonte de programação e das violações das janelas de tempo relacionadas ao atendimento dos estoques agregados, além de minimizar as paradas de bombeio e o número das ocorrências de bombeio e recebimento durante os períodos de troca de turno. É importante ressaltar que a principal limitação do modelo de temporização é considerar o compartilhamento simultâneo de um trecho de duto por no máximo 4 bateladas. Devido ao tamanho típico das bateladas normalmente movimentadas, o compartilhamento simultâneo de um trecho de duto por no máximo 4 bateladas é uma premissa operacional válida para os cenários reais apresentados.

O Capítulo 5 mostra os resultados computacionais para 7 cenários fornecidos pela PETROBRAS, sendo que a concepção de modelagem utilizada permitiu uma solução do problema para um horizonte de aproximadamente 30 dias. Os resultados obtidos permitiram avaliar a taxa de ocupação dos dutos ao longo do horizonte de programação, identificando folgas e gargalos no sistema. Por meio das janelas de tempo geradas e das violações obtidas na etapa de temporização, medidas antecipativas podem ser tomadas para que não ocorra falta de produto nos clientes e excesso de estoque nas áreas de produção. O estudo realizado com cenários reais atentou para a necessidade de melhorias no atendimento das janelas de tempo da alocação, demonstrando que a sequência de bateladas utilizada na carteira de programação impacta de forma significativa no escalonamento obtido. O principal impacto observado refere-se à infração dos tempos de bombeio na origem (janela de tempo referente à oferta de produto) e dos tempos de recebimento no destino (janela de tempo referente à demanda de produto). Notou-se que a programação muitas vezes é melhorada quando novas sequências de bombeio são implementadas, minimizando os pontos de gargalo na rede e as violações provocadas por atrasos e adiantamentos das bateladas em áreas de origem e recebimento. Isto se deve principalmente à estrutura de modelagem baseada na hierarquia dos movimentos agendados em relação às origens de bombeio, resultado da ordenação inicial proposta pelo módulo de Alocação de Recursos. Retirando-se do modelo de temporização o processo de ordenação de bateladas, permitiu-se uma redução significativa de restrições e variáveis de decisão. Em contrapartida, criou-se uma dependência em relação à sequência gerada *a priori* pela heurística construtiva.

Mantendo ainda a proposta inicial de divisão do problema, o Capítulo 6 apresentou a reformulação do problema de ordenação com o emprego de estruturas de alto nível presentes em técnicas de programação lógica por restrições (CLP - *Constraint Logic Programming*). O modelo desenvolvido teve como objetivo 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 nas áreas operacionais. Uma das principais premissas assumida no modelo de ordenação foi considerar a vazão média de bombeio como sendo constante em toda a rota de fluxo das bateladas, simplificando o equacionamento final. As restrições mais significativas, tais como alinhamentos proibidos, operações de pulmão e reversão complementaram os aspectos temporais da solução, trazendo informações adicionais para definir melhores ordens de bombeio.

Os resultados do modelo de ordenação foram apresentados no Capítulo 7 para os mesmos cenários simulados no Capítulo 5. Durante o processo de ordenação, as bateladas de inicialização e de reversão são retiradas da carteira de movimentação, sendo que apenas os produtos programados da carteira original servem de entrada para o modelo. Vale ressaltar que as ordens obrigatórias entre bateladas em função das janelas de tempo são mantidas por questões de coerência do balanço de massa (bateladas de mesmo produto) e para evitar violações na origem entre produtos distintos. As bateladas de reversão e inicialização são adicionadas à lista reordenada de bateladas a ser utilizada pelo modelo de temporização MILP. A principal forma de avaliação das melhorias obtidas foi comparar as soluções inicial e ordenada em função das violações das janelas de tempo, relacionando estes valores à redução da função objetivo do modelo de temporização. Os resultados obtidos foram melhores para a maior parte dos cenários avaliados, obtendo-se reduções significativas das violações detectadas no Capítulo 5 que utilizava uma abordagem de ordenação baseada em heurística construtiva.

De forma geral, os resultados obtidos mostraram que a formalização do conhecimento especialista e a subdivisão do problema foram procedimentos indispensáveis para a obtenção de respostas em tempos computacionais não elevados, propiciando alternativas de solução para um sistema real de grande porte. A metodologia de modelagem mostrou-se promissora para a representação da diversidade de características encontradas nos cenários abordados da rede de dutos da PETROBRAS, escopo deste trabalho.

8.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Dentre as principais contribuições do trabalho, podem ser destacadas:

1. Descrição do problema de programação da malha de dutos destinada ao transporte de derivados leves da PETROBRAS localizada no estado de São Paulo. Identificação, extração, organização e sistematização do conhecimento especialista, envolvendo as principais

variáveis, parâmetros e restrições relevantes do problema, com a finalidade de melhor aplicar as técnicas de otimização na solução proposta;

2. Proposta de uma arquitetura de solução inspirada na decomposição do problema considerando três elementos-chaves do escalonamento (*scheduling*): a determinação dos recursos a serem utilizados (*assignment*), o sequenciamento de atividades (*sequencing*) e a temporização (*timing*) do uso dos recursos pelas atividades (REKLAITIS, 1992). Esta abordagem foi fundamental no desenvolvimento de uma ferramenta para auxílio à programação de redes de dutos com horizontes de até 30 dias. Os tempos computacionais obtidos foram condizentes com a prática operacional, o que motiva a aplicação da abordagem em problemas maiores;

3. Obtenção de um modelo de temporização utilizando programação linear inteira mista (MILP) com representação de tempo contínuo para a representação do escalonamento das operações de movimentação da malha dutoviária em estudo. Foram criadas estruturas de variáveis de bombeio e recebimento, juntamente com conjuntos de restrições que melhor representassem as condições operacionais da rede em tempo computacional adequado. Com base no conhecimento especialista investigado, grande parte dos requisitos necessários foram implementados, tais como restrições de alinhamento, horossazonalidade, troca de turno, operações de reversão e pulmão. Cabe ressaltar que tais restrições são extremamente complexas de serem consideradas em uma solução manual com horizontes maiores que alguns dias, sinalizando a importância de uma ferramenta de auxílio à tomada de decisões;

4. Estudo de cenários práticos de programação fornecidos pela PETROBRAS, onde novas sugestões de solução foram apontadas com minimização de operações de bombeio, maximização do tamanho de bateladas e estimativa da taxa de ocupação dos dutos em função do planejamento imposto. Foram realizados testes importantes em carteiras envolvendo mais de 100 bateladas e 10 diferentes produtos, sendo que os resultados (fortemente orientados à aplicação) sofreram avaliações periódicas dos especialistas envolvidos;

5. Desenvolvimento de um modelo de ordenação de bateladas utilizando-se técnicas em CLP (*Constraint Logic Programming*) para sugestão de novas sequências de bombeio destinadas à melhoria da solução fornecida pelo modelo de temporização. Foram utilizadas estruturas de modelagem que permitiram explorar conceitos comumente utilizados em problemas de escalonamento, tais como atividade, precedência de operações e alocação de recursos. A principal vantagem foi fazer uso de restrições de simples compreensão e utilização, facilitando o processo de construção das restrições impostas pelo problema.

O modelo de ordenação permitiu uma redução significativa no número de violações das janelas de tempo que refletem os níveis de estoque a serem respeitados.

8.2 PROPOSTAS PARA PESQUISAS FUTURAS

Abaixo são destacados alguns pontos a serem considerados para a continuidade do presente trabalho:

1. O modelo de temporização como formulado no Capítulo 5 apresenta uma abordagem simplificada da composição de volumes e vazões. A característica principal foi considerar a combinação simultânea de no máximo 4 bateladas em um mesmo trecho de duto. Com uma possível ampliação da rede e a mudança dos volumes típicos das bateladas em relação aos volumes dos dutos, uma generalização desta hipótese deve ser considerada. Atualmente está sendo desenvolvido um módulo de simulação que calcula os volumes e as vazões necessárias para o bombeio e recebimento das bateladas em cada área operacional da rede. As composições de volumes, associadas às diferentes vazões por trecho de duto e produto, produzem informações das possíveis paradas que podem ser usadas para calcular com maior exatidão os tempos envolvidos nas movimentações. Além disso, o processo de simulação poderá calcular os tempos mínimos das movimentações, sendo que possíveis inconsistências de ordenação e gargalos poderão ser detectados antes mesmo da temporização, realizando-se um primeira tentativa de realimentação automática do sistema. Para tanto, um algoritmo em C++ que utiliza estruturas do banco de dados está sendo testado, mas pacotes de simulação de uso geral como por exemplo ARENA e EXTEND podem ser investigados;

2. A abordagem principal do módulo de Alocação de Recursos utiliza uma heurística construtiva para determinar os volumes movimentados na rede em função das taxas de produção e consumo de cada produto envolvido na programação. As áreas de envio e recebimento são definidas em função da criticidade dos estoques, da lista de rotas típicas e de outras heurísticas que simplificam o processo de balanço de massa da rede. Pretende-se desenvolver um modelo de alocação de recursos utilizando-se programação matemática que escolha o melhor par origem/destino e a melhor rota a ser utilizada na movimentação. Para direcionar este processo, aspectos operacionais e econômicos podem ser utilizados. Estoques mínimos e máximos, distribuição da taxa de utilização dos dutos, minimização das reversões entre áreas adjacentes e o custo de rotas são exemplos de critérios que podem ser explorados. Considerando que cada trecho de duto possui uma taxa para movimentar diferentes produtos, a escolha de rotas que minimizem o custo total das movimentações é bastante relevante;

3. A estrutura de otimização desenvolvida buscou atenter os critérios operacionais da rede de dutos considerando medidas indiretas de estoques em função das janelas de tempo (maneira encontrada para relacionar os níveis de planejamento e escalonamento). Apesar da abordagem através de janelas de tempo serem adequadas para obtenção de respostas em tempo computacional relativamente baixo, a análise de inventários ainda deve ser melhor estudada, seja através de sua implementação no modelo matemático de temporização (possivelmente, com a elevação do tempo computacional), ou através do módulo de simulação que indique previamente as violações de tancagem;

4. Além do controle das violações das janelas de tempo, outras medidas foram utilizadas para avaliar a solução como um todo, tais como horizonte de programação e a taxa de ocupação dos dutos. Pretende-se incorporar novos índices de desempenho que permitam avaliar diferentes modos de operação da rede, sugerindo mudanças nas situações que hoje são consideradas típicas. Dentre as que podem causar mais impacto, pode-se destacar a escolha de rotas mais adequadas, o tamanho das bateladas (tamanho ótimo do lote), sugestão de vazões mínimas e máximas que minimizem os gargalos da rede, redução do número de operações de reversão, escolha do melhor momento em que as operações pulmão devem ocorrer (atualmente definido *a priori* no módulo de alocação) e utilização de tancagem intermediária.

REFERÊNCIAS

ALLE, A. **Técnicas de programação mista-inteira aplicadas ao *scheduling* de plantas químicas contínuas**. 2003. 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

ANEEL. [S.l.]: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST (informação on-line disponível em http://www.aneel.gov.br). Página visitada em 01/07/2009., 2009.

BENDERS, J. F. Partitioning procedures for solving mixed integer variables programming problems. **Numerische Mathematik**, v. 4, p. 238–252, 1962.

BODINGTON, C. E. **Planning, Scheduling and Control Integration in the Process Industries**. New York, USA: McGraw-Hill, 1995.

BONACIN, M. V. et al. Seqüenciamento de operações numa rede dutoviária para transporte de derivados de petróleo. **Anais do IV Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Natal: Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás**, v. 1, p. 1–8, 2007.

BORJAS, A. L. N. **Implementação e análise de uma abordagem de busca orientada por restrições através de heurísticas baseadas na folga para plantas multipropósito operando em batelada**. 2005. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

BOSCHETTO, S. N. et al. An integrated framework for operational scheduling of a real-world pipeline network. In: IN PROCEEDINGS OF 18TH EUROPEAN SYMPOSIUM ON COMPUTER AIDED PROCESS ENGINEERING. Lyon. Computer Aided Chemical Engineering - ESCAPE 18. Amsterdan: Elsevier, vol. 25, 2008. p. 259–264.

CAFARO, D. C.; CERDÁ, J. Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete MILP formulation. **Computers & Chemical Engineering**, v. 28, p. 2053–2068, 2004.

CAFARO, D. C.; CERDÁ, J. Efficient tool for the scheduling of multiproduct pipelines and terminal operations. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 47(24), p. 9941–9956, 2008.

CAFARO, D. C.; CERDÁ, J. Optimal scheduling of refined products pipelines with multiple sources. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 48, p. 6675–6689, 2009.

CAMPONOGARA, E. M. ***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.

CIRÉ, A. A. **Modelos computacionais para o escalonamento de tarefas em redes de dutos**. 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Instituto de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

FELIZARI, L. C. **Otimização *fuzzy* aplicada a problemas da produção de derivados em refinarias de petróleo**. 2004. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

FELIZARI, L. C. et al. Programação das atividades de transporte de derivados de petróleo em complexos dutoviários. In: ANAIS DO IV CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRóLEO E GáS. Campinas, Brasil, 2007.

FELIZARI, L. C. et al. Sequencing batches in a real-world pipeline network using constraint programming. **In Press: 10th International Symposium on Process Systems Engineering - PSE2009 (Computer Aided Chemical Engineering)**, v. 27: Part A, p. 303–308, 2009.

FRAGNIERE, E.; GONDZIO, J. **Handbook of Applied Optimization**. New York, USA: Oxford University Press, 2002.

GAMS. [S.l.]: http://www.gams.com. Página visitada em 23/10/2009., 2009.

GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. **Computers and Intractability - A Guide to the Theory of NP-Completeness**. New Jersey, USA: Freeman and Company, New York, Bell Laboratories, Murray Hill, 1979.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização Combinatória e Programação Linear - Modelos e Algoritmos**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2000.

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.

GÖTHE-LUNDGREN, M.; LUNDGREN, J. T.; PERSSON, J. A. An optimization model for refinery production scheduling. **International Journal of Production Economics**, v. 78(3), p. 255–270, 2002.

GROSSMANN, I. E.; HEEVER, S. A. van der; HARJUNKOSKI, I. **Discrete optimization methods and their role in the integration of planning and scheduling**. [S.l.], 2001.

GROSSMANN, I. E. et al. Mixed-integer optimization techniques for the design and scheduling of batch processes. In: IN PROCEEDINGS OF THE NATO ADVANCED STUDY INSTITUTE ON BATCH PROCESSING SYSTEMS. Antalya, Turkey, 1992.

IERAPETRITOU, M. G.; FLOUDAS, C. A. Effective continuous-time formulation for short term scheduling: I. multipurpose batch process. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 37, p. 4341–4359, 1998.

ILOG. **ILOG OPL Studio 3.6.1: Language Manual**. France: ILOG Corporation, 2002a.

ILOG. **ILOG OPL Studio 3.6.1: User's Manual**. France: ILOG Corporation, 2002b.

JIA, Z.; IERAPETRITOU, M. Efficient short-term scheduling of refinery operations based on a continuous time formulation. **Computers & Chemical Engineering**, v. 28, p. 1001–1019, 2004.

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.

KENNEDY, J. L. **Oil and Gas Pipeline Fundamentals**. Tulsa, Oklahoma: PennWell Publishing Company, 2003.

KONDILI, E.; PANTELIDES, C. C.; SARGENT, R. W. H. A general algorithm for short-term scheduling of batch operations - I. MILP formulation. **Computers & Chemical Engineering**, v. 17, n. 2, p. 211–227, 1993.

LAND, A. H.; DOIG, A. G. An automatic method for solving discrete programming problems. **Econometrica**, v. 28(3), p. 497–520, 1960.

LEE, H. et al. 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.

LEE, H. C.; DAGLI, C. H. A. A parallel genetic-neuro scheduler for job-shop scheduling problems. **International Journal of Production Economics**, v. 51, p. 115–122, 1997.

LINARES, P. et al. **Modelos Matemáticos de Optimizácion**. [S.l.], outubro 2001.

LINDO. **LINGO: The Modeling Language and Optimizer - User´s Guide**. Chicago, Illinois: Lindo Systems Inc, 2002.

LIPORACE, F. S. **Planejadores para transporte em polidutos**. 2005. 120 f. Doutorado (Doutorado em Informática) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MAGALHÃES, M. V. O. **Refinery Scheduling**. London, United Kingdom: PhD thesis, Imperial College London, 2004.

MAGALHÃES, M. V. O. et al. Sipp - a solution for refinery scheduling. In: NPRA COMPUTER CONFERENCE. San Antonio, USA, 1998.

MAGATÃO, L. **Programação matemática aplicada à otimização das operações de um poliduto**. 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. 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.

MAGATÃO, L.; ARRUDA, L. V. R.; NEVES-JR., F. Um modelo híbrido (clp-milp) para scheduling de operações em poliduto. **Pesquisa Operacional**, v. 28(3), p. 511–543, 2008.

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.

MÁS, R.; PINTO, J. M. A mixed-integer optimization strategy for oil supply in distribution complexes. **Optimization and Engineering**, v. 4, p. 23–64, 2003.

MAXIMAL. [S.l.]: http://www.maximal-usa.com. Página visitada em 23/10/2009., 2009.

MÉNDEZ, C. A.; CERDÁ, J. An efficient MILP continuous-time formulation for short-term scheduling of multiproduct continuous facilities. **Computers & Chemical Engineering**, v. 26, p. 687–695, 2002.

MOCKUS, L.; REKLAITIS, G. V. Mathematical programming formulation for scheduling of batch operations based on nouniform time discretization. **Computers & Chemical Engineering**, v. 21, p. 1147–1156, 1997.

MORO, L. F. L. **Desenvolvimento de modelos para planejamento e programação de produção em refinarias de petróleo**. 2000. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MOURA, A. V. et al. Planning and scheduling the operation of a very large oil pipeline network. **Lecture Notes in Computer Science - Proceedings of the 14th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming**, v. 5202, p. 36–51, 2008.

MURATA, T. Petri nets: properties, analysis and applications. **Proceedings of the IEEE**, v. 77, n. 4, p. 541–580, 1989.

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. et al. An efficient approach to the operational scheduling of a real-world pipeline network. In: PROCEEDINGS OF 17TH EUROPEAN SYMPOSIUM ON COMPUTER AIDED PROCESS ENGINEERING. Bucareste. Computer Aided Chemical Engineering - ESCAPE 17. Amsterdan: Elsevier, 2007a. v. 1, p. 697–702.

NEVES-JR, F. et al. Programação das operações de transporte de derivados de petróleo em redes de dutos. In: RIO PIPELINE CONFERENCE & EXPOSITION 2007. Rio de Janeiro, Brasil, 2007b. v. 1, p. 1–8.

PEKNY, J. F.; REKLAITIS, G. V. Towards the convergence of theory and practice: A technology guide for scheduling/planning methodology. **American Institute of Chemical Engineering Symposium Series**, v. 94(320), p. 91–111, 1998.

PEKNY, J. F.; ZENTNER, M. G. Learning to solve process scheduling problems: The role of rigorous knowledge acquisition frameworks. In: SCHOOL OF CHEMICAL ENGINEERING, PURDUE UNIVERSITY, WEST LAFAYETTE, USA. [S.l.], 1993.

PESSOA, A. A. **Dois problemas de otimização em grafos: Transporte em redes de dutos e Busca com custos de acesso**. 2003. 119 f. Doutorado (Doutorado em Informática) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

PESSOA, M. A. O. **Heurísticas para sistemas APS utilizando janelas de processamento: Interesse, conceitos e abordagens**. 2003. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

PINTO, J. M. **Planejamento e programação de operações de produção e distribuição em refinarias de petróleo**. 2000. 160 f. Tese (Livre Docência) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

PINTO, J. M.; GROSSMANN, I. E. A continuous time mixed integer linear programming model for short term scheduling of multistage batch plants. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 34, n. 9, p. 3037–3051, 1995.

PINTO, J. M.; GROSSMANN, I. E. Assignment and sequencing models for the scheduling of process systems. **Annals of Operations Research**, v. 81, p. 433–466, 1998.

RABINOW, R. A. The liquid pipeline industry in the united states, where it's been, where it's going. In: ASSOCIATION OF OIL PIPELINES. April issue, 2004.

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. Scheduling of a multiproduct pipeline system. **Computers & Chemical Engineering**, v. 27, p. 1229–1246, 2003.

REJOWSKI, R.; PINTO, J. A novel continuous time representation for the scheduling of pipeline systems with pumping yield rate constraints. **Computers & Chemical Engineering**, v. 32, p. 1042–1066, 2008.

REKLAITIS, G. V. Overview of scheduling and planning of batch process operations. In: PROCEEDINGS OF THE NATO ADVANCED STUDY INSTITUTE ON BATCH PROCESSING SYSTEMS, ANTALYA, TURKEY. [S.l.], 1992. p. 660–705.

RELVAS, S. et al. Pipeline scheduling and inventory management of a multiproduct distribution oil system. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 45, p. 7841–7855, 2006.

RELVAS, S. et al. Reactive scheduling framework for a multiproduct pipeline with inventory management. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 46, p. 5659–5672, 2007.

RODRIGUES, L. C. A. **Planejamento e programação da produção em plantas multipropósito operando em batelada: Proposta de uma estratégia de decomposição usando janelas de tempo**. 2000. 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2000.

SCHRAGE, L. **Optimization Modeling with Lingo**. Chicago, USA: Lindo Systems Inc, 2000.

SHAH, N. Mathematical programming techniques for crude oil scheduling. **Computers & Chemical Engineering**, v. 20, p. 1227–1232, 1996.

SHAH, N. Single and multisite planning and scheduling: Current status and future challenges. **American Institute of Chemical Engineering Symposium Series**, v. 94(320), p. 75–90, 1998.

SHAH, N.; PANTELIDES, C. C.; SARGENT, R. W. H. Optimal periodic scheduling of multipurpose batch plants. **Annals of Operations Research**, v. 42, p. 193–228, 1993.

SOUZA-FILHO, E. M.; ALVES, V. R. F. M.; FERREIRA-FILHO, V. J. M. Utilização de técnicas de pesquisa operacional em problemas de distribuição dutoviária: Uma revisão. **Anais do XXXVIII SBPO**, setembro 2006.

STEBEL, S. L. **Modelagem da estocagem e distribuição de GLP de uma refinaria de petróleo**. 2001. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

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.

STEBEL, S. L. et al. Modelling the liquefied petroleum gas storage and distribution. In: ESCAPE-12. The Hague, The Netherlands, 2002.

SUBRAHMANYAM, S. et al. Issues in solving large scale planning, design and scheduling problems in batch chemical plants. **Computers & Chemical Enginnering**, v. 19(supplement), p. 577–582, 1995.

TAVARES, J. A. R. Geração de configurações de sistemas industriais com o recurso à tecnologia das restrições e computação evolucionária. In: TESE DE DOUTORADO, UNIVERSIDADE DO MINHO. Porto, Portugal, 2000.

TRANSPETRO. [S.l.]: http://www.transpetro.com.br. Página visitada em 01/07/2007., 2007.

TSANG, E. P. K. **Foundations of Constraints Satisfaction**. [S.l.]: Academic Press Limited, 1996.

WILLIAMS, H. P. **Model Building in Mathematical Programming**. Chichester, England: John Wiley & Sons, 1999.

WOLSEY, L. A. **Integer Programming**. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 1998.

WU, D.; IERAPETRITOU, M. G. Decomposition approaches for the efficient solution of short-term scheduling problems. **Computers & Chemical Enginnering**, v. 27, p. 1261–1276, 2003.

XPRESS-MP. [S.l.]: http://www.dashoptimization.com. Página visitada em 23/10/2009., 2009.

YAMAMOTO, L. **Um modelo baseado em metaheurística para o sequenciamento de bateladas em redes dutoviárias**. 2009. s.n. f. Doutorado (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.