

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

LUCAS BUENO

**OTIMIZAÇÃO DO *SCHEDULING* DO TRANSPORTE DE DERIVADOS
ESCUROS DE PETRÓLEO EM UMA MALHA DUTOVIÁRIA**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2015

LUCAS BUENO

**OTIMIZAÇÃO DO *SCHEDULING* DO TRANSPORTE DE DERIVADOS
ESCUROS DE PETRÓLEO EM UMA MALHA DUTOVIÁRIA**

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

Orientador: Prof. Flávio Neves Junior, Dr.

CURITIBA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

B928o Bueno, Lucas
2015 Otimização do scheduling do transporte de derivados escuros
de petróleo em uma malha dutoviária / Lucas Bueno.-- 2015.
95 f. : il. ; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal
do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica
e Informática Industrial, Curitiba, 2015
Bibliografia: p. 91-95

1. Petróleo - Derivados. 2. Oleodutos de petróleo - Progra-
mação linear. 3. Programação heurística. 5. Engenharia Elétrica
- Dissertações. I. Neves Junior, Flávio, orient. II. Universidade
Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação
em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD: Ed. 22 – 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Título da Dissertação Nº. 705

Otimização do Scheduling de Transporte de Derivados Escuros de Petróleo em uma Malha Dutoviária

por

Lucas Bueno

Orientador: Prof. Dr. Flávio Neves Junior

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: **Engenharia de Automação e Sistemas** do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às **9:00h** do dia **27 de Novembro de 2015**. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores doutores:

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

Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin
(UFPR)

Prof. Dr. Leandro Magatão
(UTFPR)

Visto da coordenação:

Prof. Dr. Emilio Carlos Gomes Wille
(Coordenador do CPGEI)

AGRADECIMENTOS

Ao corpo docente e administração da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pelas diversas oportunidades de desenvolvimento.

Ao Prof. Dr. Flávio Neves Junior, Prof. Dr. Leandro Magatão e Prof.^a Dr.^a Lúcia Valéria Ramos de Arruda, pelos incentivos, correções e sugestões.

Aos alunos e professores do Laboratório de Automação e Sistemas de Controle Avançado (LASCA), pelo ambiente criativo.

Aos (ex)colegas do (J)(S)Consuelo, pelas horas de trabalho, almoços e discussões intermináveis.

Aos meus familiares, por insistirem na minha educação e crescimento.

Aos membros da banca Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin, Prof. Dr. Flávio Neves Junior e Prof. Dr. Leandro Magatão, pela disposição em examinar este trabalho.

Aos amigos, colegas, amada e a todos que, diretamente ou indiretamente, fazem e fizeram parte da minha caminhada: meu muito obrigado.

RESUMO

BUENO, Lucas. **Otimização do *Scheduling* do Transporte de Derivados Escuros de Petróleo em uma Malha Dutoviária**. 95 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Apresenta-se neste trabalho uma abordagem para a otimização do *scheduling* do transporte de derivados escuros de petróleo, em uma malha dutoviária. A malha em questão possui 4 refinarias, 3 nós intermediários e um terminal marítimo. A movimentação dos derivados é influenciada por necessidades e restrições políticas e operacionais, o que torna o problema de *scheduling* complexo e motiva o desenvolvimento desta dissertação. Algumas características deste problema devem ser notadas, como a necessidade da realização de trocas de produtos nos tanques durante um horizonte de programação e da realização de misturas de dois produtos para obtenção de um terceiro. Descreve-se uma abordagem onde se contempla o tratamento de grupos de produtos com o estoque unificado. Onde também, no modelo de planejamento, o balanço de inventário é o fator determinante na otimização e se manipulam diferentes períodos devido a existência da troca de produtos nos tanques, manutenção nos tanques e períodos em que os dutos ficam sem movimentação. Onde também se trata uma lista de produtos que podem ser armazenados em cada tanque e onde são tratadas as restrições de aquecimento e misturas. Utiliza-se uma decomposição do problema e modelos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) e heurísticas para solução destes subproblemas em um tempo computacional aceitável (menos de 1 minuto). Utilizam-se dados reais de operação desta malha para validação da abordagem. Conclui-se com a análise dos resultados que a abordagem aqui descrita para resolução do problema apresentado é viável em termos computacionais e que os resultados obtidos podem auxiliar os especialistas da malha no processo de tomada de decisões.

Palavras-chave: Programação 1. Malha dutoviária 2. PLIM 3. Heurísticas 4. Derivados escuros de petróleo 5.

ABSTRACT

BUENO, Lucas. **Transport Scheduling Optimization of Heavy Oil Derivatives in a Pipeline Network**. 95 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

In this work it is presented an approach to the optimization of the scheduling of heavy oil derivatives transportation in a pipeline network. There are four refineries in this network, three intermediate nodes and one maritime terminal. The derivatives transport is influenced by practical constraints and political needs, and so the scheduling problem is complex, which encourages the development of the current work. Some characteristics of this problem should be noticed, like the necessity of products exchanges on tanks during a scheduling horizon and the necessity of products' blends. It is described an approach in which groups of products with unified inventory are treated. An approach in which, on the planning model, the main objective to optimize is the balance of the inventory and different periods are handled due the existence of products exchange on tanks, maintenance of tanks and periods in which the pipelines should not be used due heating constraints. Lists of products that can be stored in each tank are addressed, and also heating constraints and blends of products. To solve this problem in a reasonable computational time (less than 1 minute) it is utilized a decomposition approach and Mixed Integer Linear Programming (MILP) models and heuristics to solve these subproblems. It is also used real operational data of this pipeline network to validate the approach. With the analysis of the results it is concluded that the approach here described for the solution of the presented problem is viable in computational times terms and that the obtained results can assist the specialists of the network in the decision-making process.

Keywords: Scheduling 1. Pipeline network 2. MILP 3. Heuristics 4. Heavy oil derivatives 5.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Rede dutoviária.	14
FIGURA 2	– Exemplo de estouro.	16
FIGURA 3	– Cadeia de suprimentos da indústria petrolífera.	20
FIGURA 4	– Exemplos de configurações de topologias dutoviárias.	21
FIGURA 5	– Estrutura de otimização.	26
FIGURA 6	– Fluxograma da abordagem.	29
FIGURA 7	– Exemplo de troca de produto nos tanques.	31
FIGURA 8	– Metas utilizados para manter o balanço de inventário.	36
FIGURA 9	– Fluxograma da abordagem com destaque para o módulo de alocação e sequenciamento.	44
FIGURA 10	– Exemplo de janelas.	45
FIGURA 11	– Fluxograma do algoritmo para alocação e sequenciamento.	47
FIGURA 12	– Fluxograma do algoritmo para alocação e sequenciamento com destaque para tratamento de grupos de produtos.	49
FIGURA 13	– Exemplo de cálculo de janela para um movimento de mistura.	51
FIGURA 14	– Fluxograma da abordagem com destaque para o modelo PLIM de temporização e o módulo de tratamento das Restrições de Aquecimento.	53
FIGURA 15	– Influência de um bombeio.	53
FIGURA 16	– Influências que o algoritmo de pré-análise detecta.	54
FIGURA 17	– Gantt com exemplo de parada de bombeio.	56
FIGURA 18	– Exemplo de divisão volumétrica para obtenção dos tempos de residência máxima.	58
FIGURA 19	– Fluxograma da abordagem com destaque para o módulo de troca de produtos nos tanques.	60
FIGURA 20	– Exemplo de troca de produtos nos tanques possível.	61
FIGURA 21	– Exemplo de troca de produtos nos tanques realizada.	61
FIGURA 22	– Gantt de bombeio.	70
FIGURA 23	– Gantt de recebimento.	70
FIGURA 24	– Gantt com destaque para operações de mistura.	71
FIGURA 25	– Gantt com destaque para operações de degradação.	72
FIGURA 26	– Inventário de um produto.	73
FIGURA 27	– Inventário de um produto.	73
FIGURA 28	– Exemplo de inconsistência nos dados.	74
FIGURA 29	– Inventário com a correção da inconsistência nos dados.	74
FIGURA 30	– Gantt para correção da inconsistência nos dados.	75
FIGURA 31	– Gantt para a solução do cenário 1 com destaques para as misturas.	76
FIGURA 32	– Gantt com destaques para os movimentos inseridos para empurrarem os últimos movimentos programados.	76
FIGURA 33	– Inventário de um produto que recebe um tanque.	77
FIGURA 34	– Inventário de um produto que doa um tanque.	77
FIGURA 35	– Gantt para a solução do cenário 4 original.	78
FIGURA 36	– Gantt para a modificação do cenário 4.	79

FIGURA 37 – Gantt para a solução do cenário 2.	80
FIGURA 38 – Inventário de um produto que não possui tanque mas possui demanda. .	81
FIGURA 39 – Gantt para o cenário 3.	81
FIGURA 40 – Gantt para o cenário 3 com a inserção de um tanque.	81

LISTA DE SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
CLP	<i>Constraint Logic Programming</i>
IA	Inteligência Artificial
LASCA	Laboratório de Automação e Sistemas de Controle Avançado
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
PI	Programação Inteira
PL	Programação Linear
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PM	Programação Matemática
PNL	Programação Não Linear
PNLI	Programação Não Linear Inteira
PNLIM	Programação Não Linear Inteira Mista
PO	Pesquisa Operacional
TEC	Tempo de Envio Crítico
TED	Tempo de Envio Disponível
TRC	Tempo de Recebimento Crítico
TRD	Tempo de Recebimento Disponível
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	12
1.2 TRANSPORTE DE DERIVADOS ESCUROS DE PETRÓLEO EM UMA MALHA DUTOVIÁRIA	13
1.3 COMPLEXIDADE DO <i>SCHEDULING</i> DO TRANSPORTE DE DERIVADOS DE PETRÓLEO EM MALHAS DUTOVIÁRIAS	16
1.4 OBJETIVOS	16
1.4.1 Objetivo Geral	16
1.4.2 Objetivos Específicos	17
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 PETRÓLEO, PESQUISA OPERACIONAL E SUAS TÉCNICAS	18
2.2 OTIMIZAÇÃO DO <i>SCHEDULING</i> DO TRANSPORTE DUTOVIÁRIO NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA	20
2.3 ESTRUTURA DE OTIMIZAÇÃO	26
3 PLANEJAMENTO, ALOCAÇÃO E SEQUENCIAMENTO	28
3.1 PLANEJAMENTO	28
3.1.1 Descrição do problema de planejamento	29
3.1.2 Descrição do modelo PLIM de planejamento	30
3.1.2.1 Conjuntos, parâmetros e variáveis	31
3.1.2.2 Função objetivo	36
3.1.2.3 Restrições	37
3.2 ALOCAÇÃO E SEQUENCIAMENTO	43
3.2.1 Descrição do problema de alocação e sequenciamento	44
3.2.2 Descrição do algoritmo e das heurísticas	45
3.2.2.1 Grupos de produtos com estoque unificado	48
3.2.2.2 Misturas	48
3.2.2.3 Movimentos de fim do horizonte com aquecimento	50
4 TEMPORIZAÇÃO, AQUECIMENTO E TROCA DE PRODUTOS NOS TANQUES	52
4.1 TEMPORIZAÇÃO E RESTRIÇÕES DE AQUECIMENTO	52
4.1.1 Descrição do problema de temporização	52
4.1.2 Descrição do modelo PLIM de temporização	53
4.1.2.1 Pré-análise	54
4.1.2.2 Modelo PLIM de temporização	55
4.1.3 Descrição do algoritmo para consideração das restrições de aquecimento	59
4.2 TROCA DE PRODUTOS NOS TANQUES	59
4.2.1 Descrição do problema de troca de produtos nos tanques	60
4.2.2 Descrição do modelo PLIM de troca de produtos nos tanques	62
4.2.2.1 Conjuntos, parâmetros e variáveis	62

4.2.2.2 Função objetivo	63
4.2.2.3 Restrições	65
5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS	68
5.1 ESTRUTURA DE UM CENÁRIO	68
5.2 EXEMPLO DE SOLUÇÃO	69
5.2.1 Misturas e movimentos do final do horizonte de programação	76
5.2.2 Troca de produtos nos tanques	77
5.2.3 Grupos de produtos com estoque unificado	78
5.2.4 Cenário com grande volume de movimentação	80
5.2.5 Problemas nos dados de entrada	80
5.3 EXPERIMENTOS COM O MÓDULO DE PLANEJAMENTO E COM O MÓDULO DE ALOCAÇÃO E SEQUENCIAMENTO	82
5.4 EXPERIMENTOS COM O MÓDULO DE TEMPORIZAÇÃO E COM O MÓDULO DE RESTRIÇÕES DE AQUECIMENTO	83
5.5 EXPERIMENTOS COM O MÓDULO DE TROCA DE PRODUTOS NOS TAN- QUES	84
5.6 EXPERIMENTOS COM A ABORDAGEM INTEGRADA	85
6 CONCLUSÃO	87
6.1 RESULTADOS	89
6.2 TRABALHOS FUTUROS	89
REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

O início do século XX foi marcado pela intensa exploração do petróleo. Recentemente, com a diminuição das reservas disponíveis, o petróleo tem e terá menos importância como atendente das necessidades energéticas mundiais, no entanto continuará a ser o principal insumo energético e um dos principais produtos comercializados no mundo (HAMACHER; FERREIRA FILHO, 2015).

Assim como em outras indústrias, a otimização dos processos de uma companhia petrolífera é de fundamental importância para que ela se mantenha competitiva. A cadeia de suprimentos da indústria petrolífera envolve as etapas de obtenção da matéria-prima, refino e transporte entre as fábricas, centros de distribuição e clientes.

Com relação ao transporte dos derivados de petróleo no Brasil, ele é realizado pelos modais dutoviário, rodoviário, ferroviário e hidroviário. O dutoviário possui custo operacional relativamente baixo e é ambientalmente seguro (KENNEDY, 1993), no entanto, possui alto custo para expansão, que pode esbarrar em questões legais.

Dada a importância econômica da indústria petrolífera, o impacto do uso do modal dutoviário nesta indústria e sua dificuldade de expansão, é de interesse econômico e socioambiental que as atividades de programação operacional das malhas dutoviárias sejam feitas de maneira otimizada. No entanto, elas não dispõem de uma solução computacional consolidada para auxílio à tomada de decisões (BOSCHETTO, 2011).

1.1 JUSTIFICATIVA

Com o impacto do modal dutoviário na indústria petrolífera brasileira e suas dificuldades de implantação e expansão se justifica a importância econômica e socioambiental da otimização do *scheduling* do transporte de derivados em malhas dutoviárias.

Como muitas etapas do *scheduling* dutoviário são realizadas por especialistas nas companhias de petróleo, sem o auxílio de sistemas de informação que auxiliam no processo de to-

mada de decisões (BOSCHETTO, 2011), é justificado o desenvolvimento de abordagens computacionais.

Este problema também apresenta uma motivação por ser, assim como a maior parte dos problemas industriais, complexo, combinatório de larga escala e com um alto custo computacional para obtenção de uma solução ótima (MÉNDEZ et al., 2006).

Finalmente, em trabalhos recentes foram descritas estratégias de decomposição para contornar a complexidade deste problema e que obtiveram resultados em tempos computacionais aceitáveis (NEVES-JR et al., 2007), (FELIZARI, 2009), (BOSCHETTO, 2011), (POLLI, 2014), (FABRO et al., 2014), o que justifica a exploração do método aqui utilizado.

1.2 TRANSPORTE DE DERIVADOS ESCUROS DE PETRÓLEO EM UMA MALHA DUTOVIÁRIA

A malha (ou rede) abordada neste trabalho (representada na Figura 1) está localizada no Brasil, no estado de São Paulo, e é utilizada pela Petrobras para o transporte de derivados escuros de petróleo. Nesta malha existem quatro refinarias (azuis: N1, N3, N5 e N6), três nós intermediários (verdes: N2, N4 e N7), um terminal marítimo (vermelho: N8) e sete dutos distintos.

O transporte geralmente ocorre das refinarias para o terminal marítimo, passando pelos nós intermediários. Apesar de menos usual, o transporte no sentido contrário também é permitido (reversão). O transporte de uma quantidade de derivado é chamada de movimento. Um movimento possui uma rota associada e, como em dutos um volume é empurrado por outros que não possuem necessariamente igual volume, o movimento pode ser dividido em partes.

Os derivados escuros são os de maior viscosidade dentre os derivados de petróleo. Esta é uma propriedade muito importante de se considerar no *scheduling*, pois, se derivados de diferentes viscosidades forem bombeados com a mesma força, quanto maior a viscosidade, menor a velocidade com que o fluido se movimenta.

Ainda, se um volume de um derivado escuro fica muito tempo sem ser aquecido, ele resfria a ponto de solidificar e então não ser mais possível movimentá-lo. Para evitar esta situação, pode-se manter os derivados aquecidos nos tanques e nos dutos, ou enviá-los em uma alta temperatura. Como mantê-los aquecidos nos tanques e nos dutos é uma operação de alto custo, opta-se por enviá-los a uma temperatura alta e então empurrá-los antes que resfriem (ROSSATO et al., 2013). Portanto, para cada movimento associa-se um “tempo de residência máximo”, que é uma estimativa de tempo que indica quanto este movimento pode permanecer

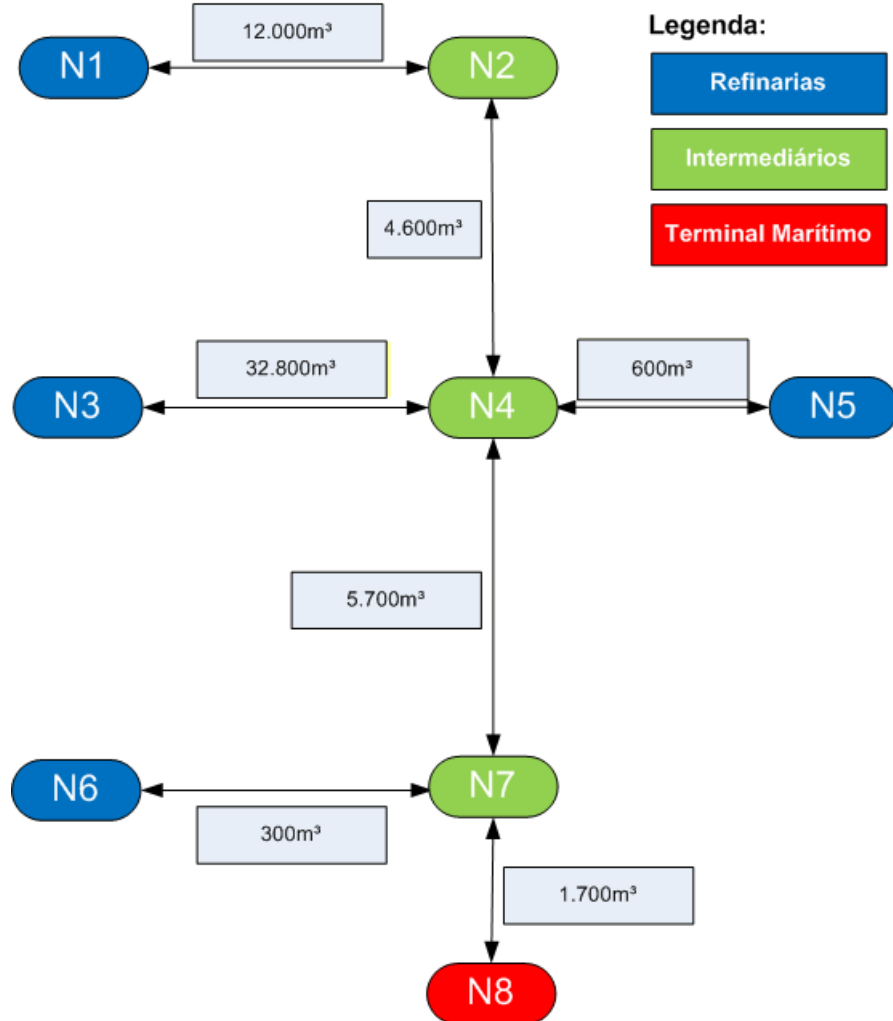


Figura 1: Rede dutoviária. Existem sete dutos distintos e o transporte geralmente ocorre das refinarias (azuis: N1, N3, N5 e N6) para o terminal marítimo (vermelho: N8), passando pelos nós intermediários (verdes: N2, N4, N7). Fonte: Bueno et al. (2015)

sem ser aquecido, assumindo que ele perde valor a uma taxa constante.

Divide-se os derivados em grupos que apresentam configurações semelhantes. Alguns grupos são tratados como se fossem um único produto, estes então são chamados de grupos unificados ou grupos com estoque unificado. Supondo que um grupo unificado possua 3 produtos, não importa se uma demanda do produto 2 é atendida com o produto 1, mas é importante indicar qual produto será movimentado para atender esta demanda.

Em certas ocasiões não é possível realizar as movimentações nesta malha de tal forma que algum volume não solidifique, insere-se nestes casos volumes de derivados para empurrar os que iriam solidificar, e que possam permanecer uma certa quantia de tempo sem serem aquecidos. Esta operação é chamada de “parada de duto”.

Os produtos nesta rede podem ser armazenados temporariamente nos nós intermediários, operação chamada de pulmão e detalhada em Boschetto (2011). Nesta rede também se pode fazer misturas de dois produtos para obtenção de um terceiro e/ou a consideração de um produto mais nobre como um produto menos nobre (operação chamada de degradação).

Um mesmo tanque pode armazenar produtos diferentes num mesmo horizonte de programação. Esta característica tem grande impacto no *scheduling*, que depende fortemente da tancagem disponível.

Ainda, como o contato entre alguns derivados de petróleo causa perdas consideráveis em suas especificações, em alguns casos é necessária a inserção de “selos” entre o transporte de dois volumes, que são quantias de outros derivados que não contaminam os dois primeiros em razões preocupantes, à utilização de selos foi detalhada em Magatão et al. (2004)

Nesta malha também existem duas restrições relativas ao horário em que as operações são realizadas:

1. Troca de turnos: Deve-se evitar que uma operação inicie nos três períodos em que os operadores realizam trocas de turnos (turnos de 8 horas de trabalho), pois o início de uma operação exige uma série de manobras e uma troca de turno dificulta a execução destas manobras (FELIZARI, 2009);
2. Horossazonalidade: Nos períodos onde o custo da energia elétrica é mais alta (devido aos contratos com empresas fornecedoras de energia elétrica), as bombas utilizadas para inserir os produtos nos dutos não devem operar com suas capacidades totais ou não devem operar (BOSCHETTO, 2011).

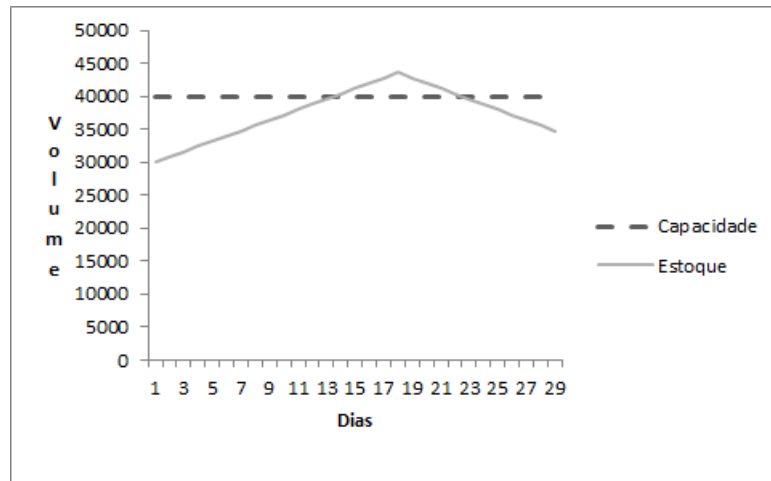


Figura 2: Exemplo de estouro. A linha pontilhada representa a capacidade de armazenamento de um produto em um nó e a linha contínua o estoque projetado deste produto neste nó.

1.3 COMPLEXIDADE DO *SCHEDULING* DO TRANSPORTE DE DERIVADOS DE PETRÓLEO EM MALHAS DUTOVIÁRIAS

O *scheduling* do transporte de derivados de petróleo em uma malha dutoviária depende da saída dos volumes seguintes, já que em um duto um volume é “empurrado” por outros.

Cada nó da malha possui curvas que definem um perfil de produção e de demanda para cada produto. O *scheduling* do transporte é feito com o objetivo de manter os estoques em cada nó em um nível desejado. A Figura 2 ilustra a ocorrência de um estouro da capacidade de armazenamento de um nó, isto é, quando não se manteve o estoque no nível desejado.

A complexidade para se realizar um *scheduling* está diretamente ligada às características das curvas de produção e demanda dos produtos nos nós, à capacidade de armazenamento disponível em cada nó, aos níveis de estoque desejados, à quantidade de produtos considerados e às restrições operacionais da rede (e.g. Restrições de aquecimento), tornando a busca pela solução ótima, seja qual for a função objetivo, uma tarefa não trivial (FELIZARI, 2009).

1.4 OBJETIVOS

Descreve-se nesta seção o objetivo geral e os objetivos específicos.

1.4.1 OBJETIVO GERAL

Propor uma abordagem combinada de PLIM e heurísticas para a otimização do *scheduling* do transporte de derivados escuros de petróleo em uma malha dutoviária.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Considerar o estoque unificado (somatório dos estoques individuais) para os produtos pertencentes a determinados grupos sem, no entanto, deixar de diferenciar os movimentos individuais dos diferentes produtos destes grupos;
2. Fazer com que a função objetivo do modelo de planejamento considere apenas o balanço de inventário;
3. No modelo de planejamento, considerar a existência de períodos devido às trocas de produtos nos tanques, manutenções de tanques, manutenções de dutos e períodos em que os dutos ficam parados sem operação;
4. No módulo de alocação, calcular os tempos dos movimentos de mistura levando em consideração heurísticas para os tempos possíveis de serem atendidos;
5. No módulo de alocação, fazer a escolha dos movimentos de fim de cenário levando em consideração as restrições de aquecimento dos derivados escuros;
6. No modelo de troca de produtos nos tanques, considerar uma lista de produtos que podem ser alocados em cada tanque.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Faz-se neste primeiro capítulo uma introdução ao tema da dissertação, a motivação e a justificativa para o seu desenvolvimento. Faz-se também uma descrição do problema, a sua complexidade, o objetivo geral desta dissertação e os seus objetivos específicos.

Apresenta-se no próximo capítulo a fundamentação teórica, como o problema de transporte de derivados de petróleo em malhas dutoviárias é resolvido atualmente no Brasil e o método utilizado para obtenção dos objetivos.

No capítulo 3 são descritos os módulos desenvolvidos para solução dos problemas de planejamento, alocação e sequenciamento. No capítulo 4, o modelo e o algoritmo utilizados para solução dos problemas de temporização e de aquecimento, respectivamente, e o modelo para solução do problema de troca de produtos nos tanques.

Detalha-se no capítulo 5 os experimentos realizados e os resultados obtidos com os mesmos. Finalmente, são abordadas no capítulo 6 conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Trata-se neste capítulo da fundamentação teórica sobre os assuntos abordados nesta dissertação, como considerações sobre a indústria petrolífera, a Pesquisa Operacional (PO) e a Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Também trata-se de trabalhos correlatos a esta dissertação e da estrutura de otimização utilizada como base no seu desenvolvimento.

2.1 PETRÓLEO, PESQUISA OPERACIONAL E SUAS TÉCNICAS

Com iniciativas para o aumento da produção, a indústria petrolífera brasileira está em expansão e com a necessidade de melhorar seus processos e otimizar o uso dos seus recursos, tornando desejável a existência de mecanismos que auxiliem estas operações (POLLI, 2014).

Com a Lei do Petróleo (lei nº 9.478 de 1997) que flexibilizou a exploração e a produção do petróleo e de seus derivados no Brasil, criou-se a necessidade de sistemas de apoio à decisão para auxiliarem as companhias petrolíferas, fornecedoras e prestadoras de serviços ligadas à cadeia de suprimento (HAMACHER; FERREIRA FILHO, 2015).

Existem duas categorias de derivados de petróleo: os derivados claros e os derivados escuros. Os derivados claros são os que possuem viscosidade mais baixa, como a gasolina, e os derivados escuros são os que possuem viscosidade mais alta, como os óleos combustíveis marítimos.

Os problemas que sistemas para auxílio à tomada de decisões na indústria petrolífera devem resolver são geralmente complexos, assim como outros problemas industriais, o que leva à necessidade da exploração de diferentes métodos e abordagens para suas resoluções.

Durante a Segunda Guerra Mundial surgiu na Inglaterra a Pesquisa Operacional (PO), que é a utilização de métodos científicos no processo de tomada de decisões. Com o avanço da capacidade de processamento e armazenamento dos computadores a PO também evoluiu, pois tornou-se possível a resolução de problemas maiores e mais complexos (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

Publicações sobre a aplicação de PO na indústria petrolífera datam de 1955 e desde então diversas técnicas já foram utilizadas para auxílio ao processo de tomada de decisões nesta indústria, como listam Hamacher e Ferreira Filho (2015):

1. Teoria da decisão;
2. Estatística;
3. Modelos de Regressão;
4. Modelos Estocásticos;
5. Simulação Monte Carlo;
6. Simulação;
7. Programação Estocástica;
8. Otimização;
9. Programação Linear Inteira Mista;
10. Programação Não Linear;
11. Linearização por Partes;
12. Programação Não Linear Inteira Mista;
13. Heurísticas;
14. Meta-heurísticas.

Utiliza-se Programação Linear Inteira Mista (PLIM) e heurísticas nesta dissertação para solução do problema de *scheduling* do transporte de derivados escuros de petróleo em uma malha dutoviária.

A Programação Linear (PL) é uma das técnicas da Programação Matemática (PM). A PM consiste de técnicas para elaboração e solução de modelos expressos matematicamente (equações, inequações e dependências lógicas) que representam estruturas reais (MAGATÃO, 2001).

A PL é fundamentada no método Simplex (apresentado por Dantzig em 1947), onde os problemas são representados por equações e inequações lineares e por um critério de escolha que deve ser otimizado (PUCCINI; PIZZOLATO, 1990).

Um modelo de PL contém apenas variáveis contínuas, caso um modelo possua apenas variáveis discretas, ele é um modelo em Programação Inteira (PI) e, caso possua variáveis discretas e contínuas, um modelo em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

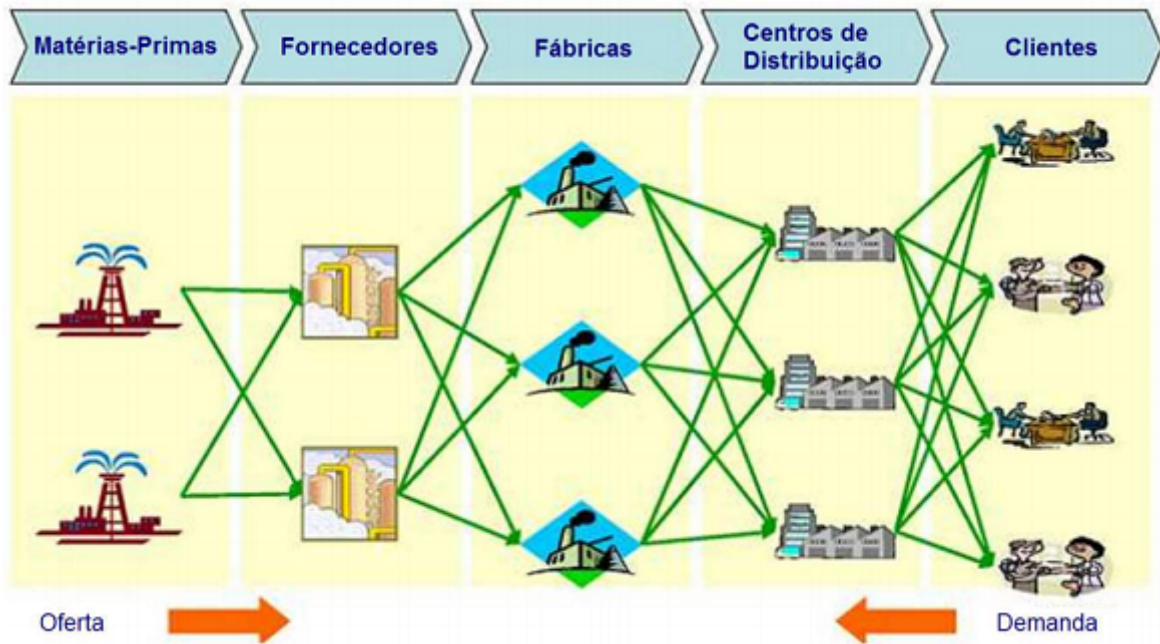


Figura 3: Cadeia de suprimentos da indústria petrolífera. Fonte: Grossmann (2005).

Por outro lado, um modelo é de Programação Não Linear (PNL) quando a sua função objetivo ou uma de suas restrições é não linear e, assim como para os modelos de PL, as mesmas características valem para um modelo de Programação Não Linear Inteira (PNLI) e Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM) (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

Outra técnica utilizada nesta dissertação, proveniente da Inteligência Artificial (IA), é a heurística, que consiste de buscas guiadas por “intuições” (BELFIORE; FÁVERO, 2013), ou seja, por guiar um procedimento de busca com conhecimentos externos ao da definição do problema.

2.2 OTIMIZAÇÃO DO *SCHEDULING* DO TRANSPORTE DUTOVIÁRIO NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA

As companhias petrolíferas precisam otimizar a sua cadeia de suprimentos com foco em redução de custos e melhora da qualidade de suas operações e produtos para permanecerem competitivas no mercado industrial (GROSSMANN, 2004).

A cadeia de suprimentos da indústria petrolífera consiste das etapas de obtenção das matérias primas, operações de refino e transporte entre as fábricas, centros de distribuição e clientes. Ilustra-se esta cadeia de suprimentos na Figura 3 (GROSSMANN, 2005).

A utilização de dutos para o transporte do petróleo e de seus derivados torna-se viável para longas distâncias pois os custos de manutenção são baixos se comparados com os custos

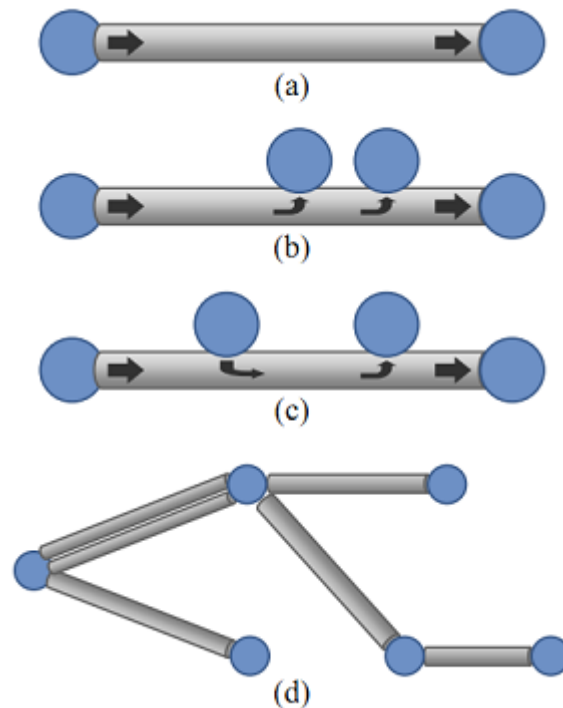


Figura 4: Exemplos de configurações de topologias dutoviárias. (a) Uma origem para um destino; (b) Uma origem para múltiplos destinos; (c) Múltiplas origens para múltiplos destinos e (d) Bidirecional. Fonte: Magatão et al. (2012).

de outros modais, apesar dos elevados custos iniciais (SASIKUMAR et al., 1997).

Publicaram-se vários trabalhos que utilizam PM para a otimização do uso de redes de dutos tendo em vista a importância deste modal na indústria petrolífera. Diferenças nestes trabalhos são relativas a maneira com a qual eles representam o tempo, pois a representação temporal em um modelo matemático é um grande desafio (MORO et al., 1998).

As abordagens de representação temporal se dividem em duas categorias: Discretas e contínuas. Nas representações discretas o tempo é dividido em intervalos fixos, enquanto nas representações contínuas o tempo é dividido em intervalos variáveis. Ainda, nas representações discretas o número de variáveis é maior, porém a diferença de integralidade tende a ser menor (mais detalhes em Magatão (2001)).

Outra questão importante para representação matemática de redes dutoviárias está relacionada com as características da rede, que podem ser de (a) uma origem para um destino, (b) uma origem para múltiplos destinos, (c) múltiplas origens para múltiplos destinos e (d) bidirecional, como ilustra-se na Figura 4.

Um dos primeiros trabalhos sobre otimização do *scheduling* do transporte dutoviário foi publicado em 1995, por Camponogara (1995), que aborda um modelo de PM para uma rede

bidirecional com múltiplos períodos mas, com dificuldades para obtenção de soluções com o modelo matemático, também cria uma abordagem heurística baseada na decomposição do problema (geração das operações, escolha das rotas e programação das operações). Para união das respostas dos problemas menores utiliza um algoritmo de cooperação *A-Team*. Esta abordagem apresenta soluções para um horizonte de 120 horas, mas com falhas no abastecimento a partir das horas 80 e 100 em diferentes cenários.

SHAH (1996) decompõe o problema de transporte entre um porto e uma refinaria em dois problemas menores (de operação da refinaria através do duto e de descarregamento dos navios no porto) e os resolve com um modelo PLIM.

Joly (1999) apresenta um modelo PLIM com representação discreta do tempo que minimiza a contaminação de produtos em uma malha com múltiplos nós e produtos, onde cada cliente é atendido por apenas um duto. Pinto et al. (2000) também minimizam a contaminação de produtos utilizando um modelo PLIM para as atividades de planejamento e *scheduling* de um duto com uma origem e um destino.

Crane et al. (1999) utilizam um Algoritmo Genético (AG) em uma rede com 8 nós e 7 dutos unidirecionais onde trafegam dois produtos. Adotam simplificações como volumes e vazões iguais entre os dutos, mas o crescimento exponencial da carga computacional do algoritmo torna a abordagem impeditiva para problemas maiores.

Partindo do trabalho de Camponogara (1995), Milidiú et al. (2001) utilizam a solução obtida pelo algoritmo *A-Team* e propõem uma meta-heurística GRASP. Também na mesma rede de Camponogara (1995), Branconi (2002) divide o problema em planejamento e escalonamento e aplica um modelo PL e outro PLIM para resolver ambos, respectivamente, com simplificações, como a desconsideração dos limites superiores de estoque.

Rejowski e Pinto (2003) apresentam uma abordagem PLIM que resolve o problema de uma refinaria ligada a 5 terminais por um único duto e por onde trafegam diversos derivados. Considera-se primeiramente na abordagem PLIM que o horizonte é dividido em partes iguais, em seguida, esta restrição é relaxada e encontram-se soluções para horizontes de 3 dias.

Rejowski e Pinto (2004) incluem restrições de corte no modelo de Rejowski e Pinto (2003) e obtém melhores resultados em termos computacionais. Depois, Rejowski e Pinto (2008) propõem uma formulação em PNLIM com uma representação contínua do tempo e obtém melhores resultados novamente.

Magatão et al. (2004) propõem uma formulação PLIM com representação discreta do tempo para um único duto que liga uma refinaria a um porto, que pode ser operado nos dois

sentidos e por onde trafegam diferentes derivados. Na formulação PLIM também se considera a contaminação entre os produtos. Em seguida, para o mesmo problema, Magatão et al. (2011) propõem uma abordagem híbrida de PLIM e *Constraint Logic Programming* (CLP) e obtém melhores resultados em termos computacionais.

Neiro e Pinto (2004) utilizam PNLIM para uma rede com múltiplos nós conectados por dutos unidirecionais e dividem o problema em 3 estruturas básicas: unidades de processamento, tanques e dutos.

Alves (2007) propõe duas versões de um AG para uma rede de dutos por onde trafegam derivados escuros, nesta abordagem o tempo é discretizado e são feitas simplificações, obtendo-se resultados para horizontes de 14 dias. Nesta mesma rede e adotando as mesmas simplificações, Pereira (2008) propõe um modelo PLIM que obtém soluções para horizontes de 7 dias.

Relvas et al. (2006) tratam o problema de uma refinaria ligada a um centro de distribuição por um único duto, por onde se transportam diversos derivados, com um modelo PLIM que representa o tempo de forma contínua. Divide-se o horizonte de programação de 30 dias em 2 períodos e se utiliza o final do primeiro período como entrada para o segundo. Como evolução, Relvas et al. (2009) utilizam uma heurística para propôr uma sequência de envio ao modelo PLIM.

Neves-Jr et al. (2007) abordam com modelos PLIM uma rede com 9 nós e 15 dutos bidirecionais, dividem o problema em 3 (alocação, sequenciamento e temporização) e obtém resultados para horizontes de 30 dias.

Moura et al. (2008) abordam uma rede com 4 nós e 5 dutos bidirecionais através de uma abordagem híbrida de heurísticas e CLP, onde as heurísticas são utilizadas para alocação das ordens de entrega e o modelo CLP para alocação temporal. Lopes et al. (2009) apresentam uma evolução do trabalho de Moura et al. (2008), a aplicam a uma rede real que transporta derivados claros e obtém resultados para horizontes de até 10 dias em menos de 10 minutos.

Felizari et al. (2009) evoluem o trabalho de Neves-Jr et al. (2007) focando nos problemas de sequenciamento e temporização através de CLP e PLIM. Boschetto (2011) também apresenta uma evolução deste trabalho, onde se utilizam heurísticas e PLIM.

Magatão et al. (2012) apresenta um modelo PLIM de planejamento e um modelo PLIM de alocação e sequenciamento como uma evolução de Boschetto (2011). O modelo de planejamento obteve resultados em poucos segundos e o custo computacional do modelo de alocação e sequenciamento foi impeditivo para cenários de uma semana.

Herrán et al. (2010) tratam de uma rede com 7 nós e 8 dutos através de uma abordagem de discretização de tempos e de segmentação dos volumes dos dutos e obtêm soluções para horizontes de cerca de 4 dias. Herrán et al. (2012) apresentam meta-heurísticas para aprimoramento da abordagem anterior.

Arruda et al. (2010) tratam do mesmo problema de Neves-Jr et al. (2007) com um algoritmo genético multi-objetivo, obtendo resultados para um pequeno horizonte de programação. Westphal et al. (2011) também propõem um algoritmo genético, mas para outra configuração de rede, e obtêm resultados com tempos computacionais inferiores aos apresentados em Arruda et al. (2010).

Cafaro e Cerdá (2012) abordam uma rede com 11 nós e 9 dutos unidirecionais com uma abordagem de decomposição do problema e utilização de dois modelos PLIM para resolvê-los. Cafaro et al. (2015) apresentam uma extensão deste.

Souza Filho et al. (2013) aprimoram a abordagem apresentada em Pereira (2008) com um pós-processamento e estruturas *cascading-knapsack* e obtêm redução no tempo computacional.

Ribas et al. (2013) tratam do mesmo problema de Boschetto (2011) e utilizam a mesma decomposição do problema para aplicar uma abordagem híbrida de meta-heurística e PLIM e obtêm resultados para um horizonte de 30 dias em cerca de 5 horas. Polli (2014) parte da decomposição apresentada por Boschetto (2011) e propõe uma nova abordagem para o módulo de sequenciamento dos movimentos. Fabro et al. (2014) também partem da decomposição apresentada em Boschetto (2011) e propõem uma abordagem para uma rede por onde trafegam derivados escuros.

Mostafei e Hadigheh (2014) apresentam uma abordagem PLIM para o *scheduling* de uma malha que conecta uma única refinaria à vários centros de distribuição. O horizonte é dividido em períodos e são obtidos resultados em cerca de 95 minutos. Mostafei et al. (2015) apresentam um modelo para o *scheduling* de uma malha dutoviária com vários produtos.

Magatão et al. (2015) apresenta uma evolução de Magatão et al. (2012) com uma nova estrutura de otimização, um novo modelo de temporização e uma abordagem de decomposição para o novo modelo de temporização.

Apresenta-se na Tabela 1 um resumo dos trabalhos listados neste capítulo, com a indicação da configuração da rede, como foi feita a representação do tempo e a(s) técnica(s) utilizada(s).

Tabela 1: Resumo dos trabalhos correlatos a presente dissertação

Autor	Dutos	Tempo	Técnica	Decompõe
Camponogara (1995)	Rede	Discreto	Heurística	Sim
SHAH (1996)	Único	Discreto	PLIM	Sim
Joly (1999)	Único	Discreto	PLIM	Não
Crane et al. (1999)	Rede	Discreto	AG	Não
Pinto et al. (2000)	Único	Discreto	PLIM e PNLIM	Não
Milidiú et al. (2001)	Rede	Discreto	Heurística	Não
Branconi (2002)	Rede	Discreto	PLIM	Sim
Rejowski e Pinto (2003)	Único	Discreto	PLIM	Não
Rejowski e Pinto (2004)	Único	Discreto	PLIM*	Não
Magatão et al. (2004)	Único	Discreto	PLIM	Sim
Neiro e Pinto (2004)	Rede	Contínuo	PNLIM	Sim
Relvas et al. (2006)	Único	Contínuo	PLIM	Sim
Alves (2007)	Rede	Discreto	AG	Não
Neves-Jr et al. (2007)	Rede	Contínuo	PLIM*	Sim
Pereira (2008)	Rede	Discreto	PLIM	Não
Moura et al. (2008)	Rede	Contínuo	CLP*	Sim
Rejowski e Pinto (2008)	Rede	Contínuo	PNLIM	Não
Lopes et al. (2009)	Rede	Contínuo	CP*	Sim
Relvas et al. (2009)	Único	Contínuo	PLIM*	Não
Felizari et al. (2009)	Rede	Contínuo	PLIM e CLP	Sim
Herrán et al. (2010)	Rede	Discreto	PLIM	Não
Arruda et al. (2010)	Rede	Discreto	AG	Sim
Boschetto (2011)	Rede	Contínuo	PLIM*	Sim
Magatão et al. (2011)	Único	Discreto	PLIM e CLP	Sim
Westphal et al. (2011)	Rede	Discreto	Micro-Genético	Sim
Cafaro e Cerdá (2012)	Rede	Contínuo	PLIM	Sim
Herrán et al. (2012)	Rede	Discreto	PLIM*	Sim
Magatão et al. (2012)	Rede	Contínuo	PLIM*	Sim
Souza Filho et al. (2013)	Rede	Discreto	PLIM*	Não
Ribas et al. (2013)	Rede	Contínuo	PLIM*	Sim
Polli (2014)	Rede	Contínuo	PLIM*	Sim
Fabro et al. (2014)	Rede	Discreto	PLIM*	Sim
Mostafei e Hadigheh (2014)	Único	Discreto	PLIM	Não
Cafaro et al. (2015)	Rede	Contínuo	PLIM	Sim
Mostafei et al. (2015)	Rede	Contínuo	PLIM	Não
Magatão et al. (2015)	Rede	Contínuo	PLIM*	Sim

*Utiliza-se em conjunto com heurísticas.

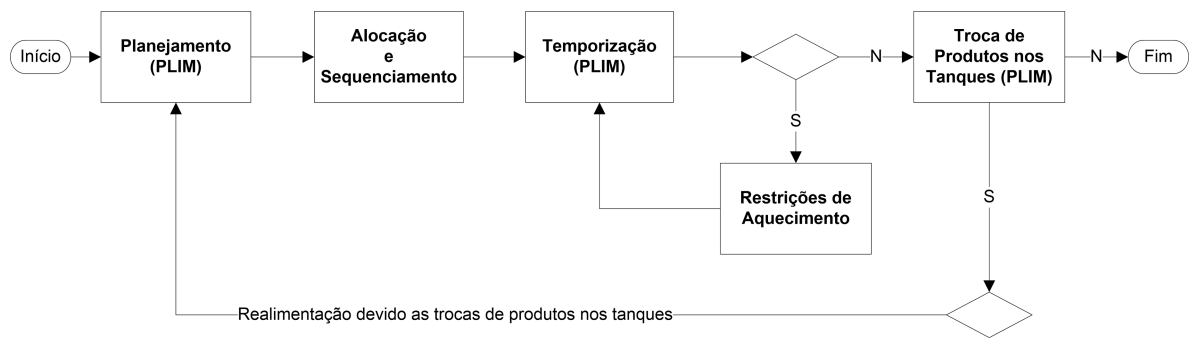


Figura 5: Estrutura de otimização do presente trabalho, que é baseada em modelos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) e heurísticas. Com ela é possível a obtenção de soluções para cenários de cerca de 720 horas em menos de 1 minuto. Cada ciclo de realimentação é executado apenas uma vez.

2.3 ESTRUTURA DE OTIMIZAÇÃO

Apresenta-se nesta seção a estrutura de otimização na qual este trabalho se baseia, apresentada em Fabro et al. (2014). O autor da presente dissertação também já publicou trabalhos sobre esta estrutura em Rossato et al. (2013), Bueno et al. (2014) e Bueno et al. (2015).

Antes de detalhar a estrutura de otimização (representada na Figura 5), é necessário definir um problema de *scheduling*: um problema de *scheduling* existe quando tarefas de um processo competem por recursos limitados em um certo período de tempo (JOLY, 1999).

Um problema de *scheduling* pode ser dividido em três componentes principais: alocação das tarefas aos recursos, sequenciamento das tarefas e temporização das tarefas nos recursos; as quais a abordagem aqui descrita é fundamentada (REKLAITIS, 1996):

A alocação é a escolha de quais recursos serão utilizados para a realização de quais tarefas, o sequenciamento é a definição da ordem em que as tarefas utilizarão os recursos e a temporização é a determinação dos tempos de início e fim da utilização de cada recurso por cada tarefa. Tendo em vista estes componentes, a abordagem aqui proposta utiliza a seguinte decomposição:

1. Planejamento: é o primeiro módulo da estrutura e onde se objetiva definir o quanto será bombeado de um nó a outro, assim como a natureza destes bombeios (se são de mistura ou degradação). Este módulo é um modelo PLIM;
2. Alocação e Sequenciamento: é o módulo onde o objetivo é dividir os volumes planejados em volumes menores e definir uma ordem na qual eles serão bombeados. Neste módulo utilizam-se heurísticas;

3. Temporização: um modelo PLIM onde objetiva-se definir os tempos de início e fim de cada atividade;
4. Restrições de Aquecimento: heurísticas aplicadas na solução depois da primeira execução da Temporização e antes da segunda execução da Temporização para tratamento das restrições de aquecimento;
5. Alocação de produtos em Tanques: um modelo PLIM onde objetiva-se a realização de trocas de produtos nos tanques para viabilizar a programação proposta até o momento de sua execução.

Como ilustrado na Figura 5, a abordagem proposta possui duas realimentações, uma devido às restrições de aquecimento e outra devido às necessidades de trocas de produtos nos tanques. Cada ciclo de realimentação é executado apenas uma vez. Optou-se por esta abordagem com realimentações pois:

1. Apesar das restrições de aquecimento implicarem grande impacto nos resultados da temporização, a consideração destas restrições no modelo PLIM implica elevado aumento da carga computacional;
2. Apesar da tancagem disponível ter grande impacto em todo *scheduling*, saber as necessidades de trocas sem a realização de um *scheduling* inicial é uma tarefa difícil. Logo, na primeira execução as restrições de tancagem têm menos impacto na função objetivo dos módulos anteriores.

Com esta abordagem não se garante a obtenção do ótimo global para o problema. No entanto se garante o ótimo para cada problema da decomposição resolvido com um modelo PLIM. Descreve-se no próximo capítulo os módulos desenvolvidos para solução dos problemas de planejamento, alocação e sequenciamento.

3 PLANEJAMENTO, ALOCAÇÃO E SEQUENCIAMENTO

Descreve-se neste capítulo os módulos de planejamento, alocação e sequenciamento para a abordagem de otimização descrita na seção 2.3.

3.1 PLANEJAMENTO

O módulo de planejamento é um modelo PLIM para definição do quanto será bombeado de um nó a outro da rede, bem como a natureza destes bombeios (se serão de mistura ou degradação).

O autor da presente dissertação já apresentou este modelo em Bueno et al. (2015), sendo este uma evolução do modelo apresentado pelo em Valério et al. (2012a) e em Fabro et al. (2014).

As principais mudanças em relação a Valério et al. (2012a) e a Fabro et al. (2014) são relacionadas à função objetivo, onde, no modelo aqui apresentado, procura-se apenas otimizar o inventário de todos os produtos em todos os nós.

Nos trabalhos anteriores se buscava minimizar o número de degradações e misturas e definir as rotas dos movimentos através de um percentual mínimo de operação de cada duto. No entanto, como é difícil dizer quando estas situações são melhores do que violações de inventário (em termos de custo), no modelo aqui apresentado os dados do cenário guiam a escolha da rota e a natureza das movimentações.

Além disso, dadas as características desta rede, as movimentações acontecem geralmente no mesmo sentido, ao contrário da rede de Claros, estudada por Boschetto et al. (2010) e que é base para os trabalhos de Valério et al. (2012a) e Fabro et al. (2014).

Além desta alteração, outras mudanças e novas restrições foram incluídas com o objetivo de tratar diferentes períodos para considerar a existência de trocas de produtos nos tanques, manutenções de dutos, manutenção de tanques e paradas de movimentação devido às restrições de aquecimento e para também considerar grupos de produtos onde o inventário dos produtos

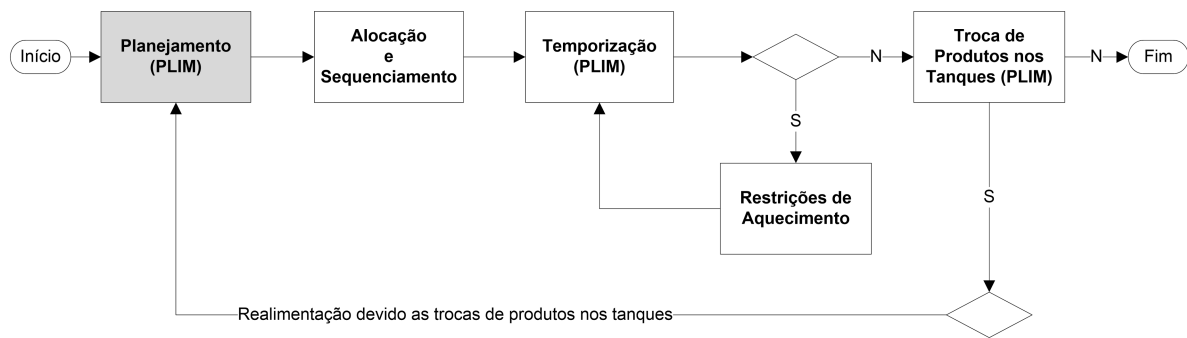


Figura 6: Fluxograma da abordagem para obtenção do *scheduling* com destaque para o modelo PLIM de planejamento, o primeiro módulo a ser executado e que tem por objetivo definir os volumes, as rotas e a natureza dos bombeios. Cada ciclo de realimentação é executado apenas uma vez.

destes grupos deve ser considerado como unificado sem, no entanto, deixar de diferenciar os movimentos como sendo dos diferentes produtos.

O modelo de planejamento é o primeiro módulo da abordagem descrita na seção 2.3 e ilustrada na Figura 6, com destaque para o módulo de planejamento.

3.1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO

Define-se o problema de planejamento como o problema de determinar o quanto será bombeado de cada produto de um nó a outro e qual será a natureza destes bombeios (se serão de mistura ou degradação).

Reklaitis (1996) enuncia um problema de alocação de recursos como a escolha de quais recursos serão utilizados para a realização de quais tarefas e, portanto, o problema de planejamento aqui enunciado também pode ser caracterizado como um problema de alocação de recursos.

No entanto, o próximo problema da abordagem de decomposição aqui descrita também consiste na escolha de volumes, porém de volumes menores, baseando-se nos volumes definidos pelo módulo de planejamento e, então, se define este segundo problema como de alocação.

Pode-se fazer a determinação do quanto será bombeado de um nó a outro tendo em consideração diversos fatores, como a distância entre os nós ou os custos operacionais das movimentações. No entanto, o balanço de inventário é essencial para esta rede e então se procura pela solução que melhor distribua o inventário em todos os nós, dadas suas previsões de demanda e produção.

Opta-se também por definir a natureza das operações com o objetivo de manter o ba-

lanço do inventário. Poder-se-ia dizer que em alguns casos o custo de realização de uma operação de mistura ou degradação é maior do que o de não manter o balanço de inventário. No entanto, como não é tarefa trivial definir o quão melhor é prejudicar o balanço comparado com a programação de um movimento de mistura ou degradação, as características de um cenário fazem com que ocorram mais ou menos misturas, injeções ou degradações.

Pode-se realizar misturas e degradações em um nó para atender as necessidades deste mesmo nó. No entanto, como o objetivo do presente trabalho é auxiliar o *scheduling* dutoviário, isto é, as operações nos dutos, estas possibilidades não são consideradas.

Um duto pode permanecer fora de operação em determinados períodos (devido às paradas de bombeio e manutenções). Também se pode realizar bombeios no sentido contrário do usual, chamadas de operações de reversão, no entanto o presente trabalho também não contempla esta característica.

3.1.2 DESCRIÇÃO DO MODELO PLIM DE PLANEJAMENTO

Descreve-se nesta subseção o modelo de planejamento, que tem como dados de entrada:

1. O horizonte de programação;
2. Uma lista de produtos;
3. Uma lista de grupos de produtos;
4. Uma lista de nós;
5. Uma lista de dutos;
6. Uma lista de nós onde podem ocorrer misturas;
7. Uma lista de configurações de misturas;
8. Uma lista de configurações de degradações;
9. Uma previsão de produção para cada produto em cada nó;
10. Uma previsão de demanda para cada produto em cada nó;
11. Uma capacidade de armazenagem para cada produto em cada nó;
12. Os períodos em que as curvas são constantes;
13. Os períodos em que os dutos devem ficar parados;
14. Os pesos para a função objetivo.

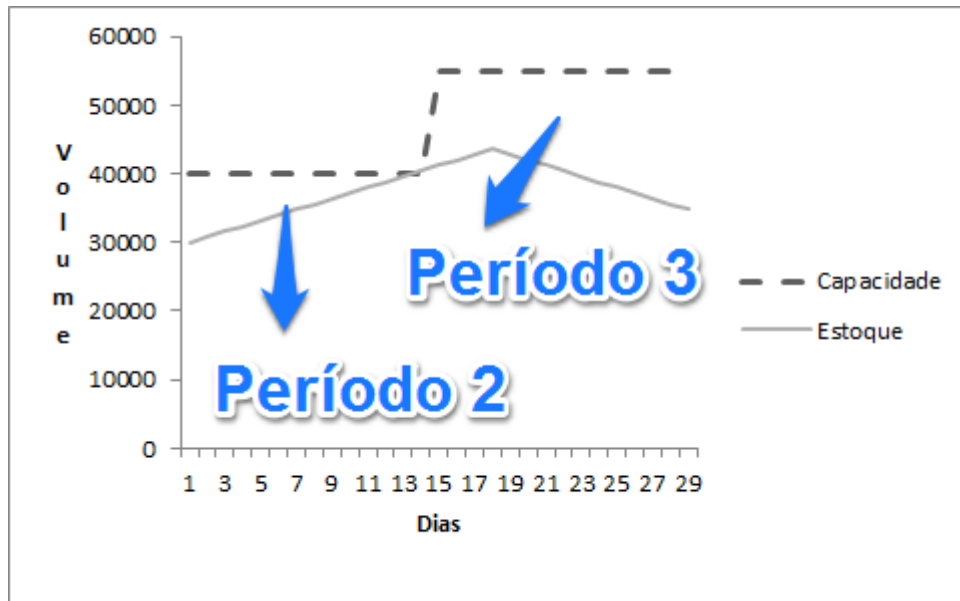


Figura 7: Exemplo de troca de produto nos tanques. Se um tanque do produto P1 em algum nó N1 é esvaziado para a chegada do produto P2 no dia 15, o modelo deve considerar para todos os nós e produtos a existência de três períodos: da hora 0 até a hora 24 (que existe para garantir que no primeiro dia ocorrerão apenas operações da programação em andamento na rede no período imediatamente anterior ao do cenário atual), da hora 25 até a hora 360 (dia 15) e da hora 361 até a hora 720.

Devido à possibilidade de trocas de produtos nos tanques e de manutenção nos tanques, as curvas que representam a capacidade de cada produto em cada nó nem sempre são constantes. Para contornar esta situação, opta-se por uma modelagem baseada em períodos, onde em cada período as curvas de capacidade são constantes. Utiliza-se o exemplo da Figura 7 para ilustrar esta modelagem.

Pode-se dizer então que o modelo trabalha com uma divisão do cenário (para o exemplo anterior uma divisão em 3), onde o final de cada período impacta no início do próximo período.

3.1.2.1 CONJUNTOS, PARÂMETROS E VARIÁVEIS

Descreve-se na Tabela 2 os conjuntos, na Tabela 3 os parâmetros e na Tabela 4 as variáveis do modelo. Nestas Tabelas, para as violações e quantias, a unidade utilizada é sempre a de “uma unidade de volume”. Os conjuntos são esparsos, isto é, conjuntos que possuem apenas os elementos válidos para a manipulação (BOSCHETTO, 2011).

Tabela 2: Conjuntos do modelo de planejamento

$\{n, p\} \in NosProdutos$	um nó n e um produto p relacionados.
$\{n, p\} \in NosProdutosIndividuais$	um nó n e um produto p relacionados, com estoque individual.
$\{n, p, per\} \in NosProdutosPeriodos$	um nó n , um produto p e um período per relacionados.
$\{n, n1, r, p, per\}$ $\in NoProdutoSemDegraPer$	um nó n , um nó $n1$, uma rota r existente entre n e $n1$, um produto p e um período per relacionados.
$\{o, d, r, p\}$ $\in OPSemDegracoes$	uma origem o , um destino d , uma rota r e um produto p relacionados, onde não ocorrem degradações.
$\{o, d, r, p, per\}$ $\in OPSemDegracoesPer$	uma origem o , um destino d , uma rota r , um produto p e um período per relacionados, onde não ocorrem degradações.
$\{p, gr\}$ $\in Produtos$	um produto p e seu grupo gr .
$\{p\}$ $\in ProdutosIndividuais$	um produto p que não possui o estoque agrupado.
$\{p\}$ $\in ProdutosAgrupados$	um produto p que possui o estoque agrupado.
$\{n, p, p1, per\}$ $\in RegrasDegradaPer$	um nó n , um produto p , um produto $p1$ e um período per relacionados que definem que pode ocorrer uma degradação de p para $p1$ neste per .
$\{n, p1, p2, p, per\}$ $\in NosProdutosMisturaPeriodo$	um nó n , produtos $p1$, $p2$ e p , e um período per relacionados que definem que pode ocorrer uma mistura de $p1$ e $p2$ para p neste per .

$\{p1, p2, p, prop1, prop2\}$ $\in RegrasMistura$	produtos $p1, p2$ e p , e proporções $prop1$ e $prop2$, relacionados que definem que pode ocorrer misturas de $p1$ e $p2$ para p nestas proporções.
$\{r, n, dt\}$ $\in RotasSemDegradacoes$	uma rota r , um nó n proprietário desta rota, e um duto dt relacionados, onde não ocorrem degradações.
$\{dt, per\}$ $\in DutoPeriodo$	um duto dt e um período per relacionados.
$\{dt, per\}$ $\in Paradas$	um duto dt que está parado em um período per .
$\{o, p, estIni\}$ $\in EstoqueIni$	estoque inicial $estIni$ do produto p no nó o .
$\{o, p, per, eMetaMin\}$ $\in EstoqueMetaMin$	meta mínimo $eMetaMin$ do produto p , no nó o no período per .
$\{o, p, per, eMetaMax\}$ $\in EstoqueMetaMax$	meta máximo $eMetaMax$ do produto p , no nó o no período per .

Tabela 3: Parâmetros do modelo de planejamento

$pesoMin$	Peso para uma violação de mínimo.
$pesoMetaMin$	Peso para uma violação de mínimo meta.
$pesoNeg$	Peso para uma violação de inventário negativo.
$pesoMax$	Peso para uma violação de máximo.
$pesoMetaMax$	Peso para uma violação de máximo meta.
$pesoCapac$	Peso para uma violação de capacidade.
$QUANTIA_MIN$	A quantia mínima a ser enviada.

Tabela 4: Variáveis do modelo de planejamento

Variável	Descrição	Domínio
$violacaoMin_{n,p}$	Violação do estoque mínimo de um produto p em um nó n .	\mathbb{R}^+
$violacaoMetaMin_{n,p}$	Violação do estoque meta mínimo de um produto p em um nó n .	\mathbb{R}^+
$violacaoNeg_{n,p}$	Violação do estoque negativo (abaixo de zero) de um produto p em um nó n .	\mathbb{R}^+
$violacaoNegIndAgrup_{n,p}$	Violação do estoque negativo (abaixo de zero) de um produto p em um nó n . O produto é de um grupo com esto que unificado, mas esta violação é individual.	\mathbb{R}^+
$violacaoMax_{n,p}$	Violação do estoque máximo de um produto p em um nó n .	\mathbb{R}^+
$violacaoMetaMax_{n,p}$	Violação do estoque meta máximo de um produto p em um nó n .	\mathbb{R}^+
$violacaoCapacidade_{n,p}$	Violação da capacidade de um produto p em um nó n .	\mathbb{R}^+
$qChega_{n,p,per}$	Volume que chega de um produto p em um nó n em um período per .	\mathbb{R}^+
$qSai_{n,p,per}$	Volume que sai de um produto p em um nó n em um período per .	\mathbb{R}^+
$qEnviadaPer_{n1,n,r,p,per}$	Volume enviado em um período per de um nó $n1$ para um nó n de um produto p por uma rota r .	\mathbb{R}^+
$qGeradaPorDegradacao_{n,p,per}$	Volume gerado por degradações de um produto p em um nó n em um período per .	\mathbb{R}^+
$qDegradaPer_{n,p1,p,per}$	Volume de degradação de um produto $p1$ para um produto p em um nó n em um período per	\mathbb{R}^+
$qUtilizadaNaDegradacao_{n,p,per}$	Volume utilizado em degradações de um produto p em um nó n em um período per .	\mathbb{R}^+

Variável	Descrição	Domínio
$qMisturaPer_{n,p1,p2,p,per}$	Volume de mistura de $p1$ e $p2$ para um produto p em um nó n em um período per	$\mathbb{R}+$
$qTotalEnviada_{o,d,r,p}$	Volume enviado de um nó o para um nó d por uma rota r de um produto p .	$\mathbb{R}+$
$seMovimentou_{o,d,r,p}$	Se houve movimentação de um nó o para um nó d por uma rota r de um produto p .	$\{0, 1\}$
$transferidoPeloDuto_{dt,per}$	Volume transferido por um duto dt em um período per .	$\mathbb{R}+$
$estoque_{o,p,per}$	Estoque de um produto p em um nó n em um período per .	$\mathbb{R}+$
$estoqueIndiAgrup_{o,p,per}$	Estoque de um produto p em um nó n em um período per . O produto é de um grupo com estoque unificado mas, este estoque é o individual.	$\mathbb{R}+$
$producao_{o,p,per,prod}$	Produção de um produto p em um nó n em um período per .	$\mathbb{R}+$
$demanda_{o,p,per,dem}$	Demanda de um produto p em um nó n em um período per .	$\mathbb{R}+$
$qUtilizadaNaMistura_{o,p,per}$	Volume utilizado em misturas de um produto p em um nó o em um período per .	$\mathbb{R}+$
$qGeradaPorMistura_{o,p,per}$	Volume gerado por misturas de um produto p em um nó o em um período per .	$\mathbb{R}+$
$violaEstMetaMinPer_{o,p,per}$	Violação do meta mínimo de um produto p em um nó n em um período per .	$\mathbb{R}+$
$violaEstMetaMaxPer_{o,p,per}$	Violação do meta máximo de um produto p em um nó n em um período per .	$\mathbb{R}+$

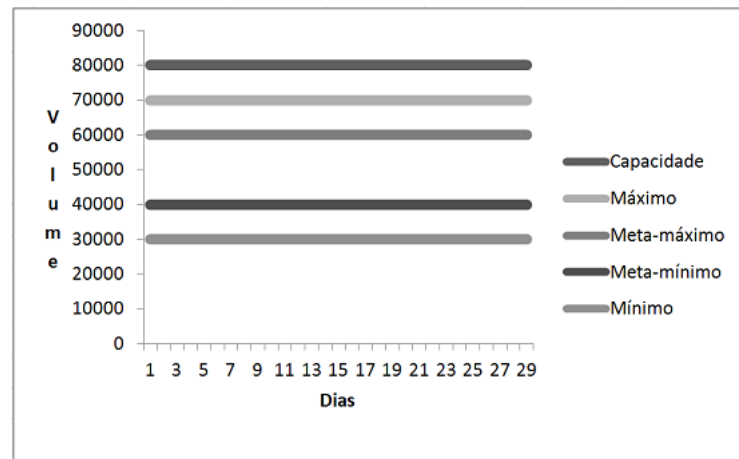


Figura 8: Metas utilizados para manter o balanço de inventário. Os conceitos de máximo e meta-máximo são limites empíricos, que representam menos volume que a capacidade disponível, onde o meta-máximo representa menos volume que o máximo. O mesmo é válido para o mínimo e o meta-mínimo, mas com ambos representando mais volume que o limite “zero”.

3.1.2.2 FUNÇÃO OBJETIVO

Busca-se minimizar, na função objetivo do modelo PLIM de planejamento (representada na equação (1)), os estoques e faltas de inventário de cada produto em cada nó. Utiliza-se para obtenção deste objetivo o conceito de metas, que são limites mínimos e máximos empíricos, muitas vezes desejáveis, mais restritivos que os limites reais (ver Figura 8).

Busca-se respeitar o meta máximo de todos os produtos em todos os nós, mas é preferível violar este limite do que violar o limite máximo. O mesmo para a capacidade e para os limites inferiores. Portanto, a função objetivo possui 6 termos: 3 para os limites superiores e três para os limites inferiores (incluindo o limite de volume zero, ou estoque negativo):

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar } Z = & \sum_{\{n,p\} \in \text{NosProdutos}} (\text{violacaoMin}_{n,p} \times \text{pesoMin}) + \\
 & \sum_{\{n,p\} \in \text{NosProdutos}} (\text{violacaoMetaMin}_{n,p} \times \text{pesoMetaMin}) + \\
 & \sum_{\{n,p\} \in \text{NosProdutos}} (\text{violacaoNeg}_{n,p} \times \text{pesoNeg}) + \\
 & \sum_{\{n,p\} \in \text{NosProdutos}} (\text{violacaoMax}_{n,p} \times \text{pesoMax}) + \\
 & \sum_{\{n,p\} \in \text{NosProdutos}} (\text{violacaoMetaMax}_{n,p} \times \text{pesoMetaMax}) + \\
 & \sum_{\{n,p\} \in \text{NosProdutos}} (\text{violacaoCapacidade}_{n,p} \times \text{pesoCapac})
 \end{aligned} \tag{1}$$

Utiliza-se pesos de ordem de grandeza diferentes para consideração dos limites como mais ou menos restritivos, dependendo de qual ciclo da abordagem de realimentação se está executando. Para exemplificar, suponha que os seguintes pesos são utilizados para a primeira execução do ciclo da abordagem (estes pesos foram definidos de forma empírica e são os pesos utilizados nos experimentos apresentados no capítulo 5):

- pesoMetaMin: 1;
- pesoMin: 10;
- pegoNeg: 100;
- pesoMetaMax: 1;
- pesoMax: 10;
- pesoCapac: 100.

E que os seguintes pesos são utilizados na segunda execução do ciclo de abordagem de realimentação:

- pesoMetaMin: 1;
- pesoMin: 100;
- pegoNeg: 10000;
- pesoMetaMax: 1;
- pesoMax: 100;
- pesoCapac: 10000.

Para entendimento da importância da utilização de diferentes faixas, imagine um modelo em que elas não existam. Neste caso um problema no balanço de inventário resultaria em piora da função objetivo apenas se ele estivesse no negativo ou na capacidade, e as soluções tenderiam a ficar com os balanços perto destes limites. A inserção dos metas (mínimo, máximo, meta-mínimo e meta-máximo) faz com que o modelo procure por soluções em que o inventário se mantenha perto da “metade” da capacidade, situação esta desejável operacionalmente por facilitar operações futuras.

3.1.2.3 RESTRIÇÕES

Para calcular o quanto chega de um produto em um nó em um período, faz-se o somatório do que é enviado deste produto para este nó neste período, como na restrição (2) (utiliza-se

o conjunto de movimentos que não são de degradações pois as degradações são consideradas na restrição (4):

$$qChega_{n,p,per} = \sum_{\{n1,n,r,p,per\} \in NoProdutoSemDegraPer} qEnviadaPer_{n1,n,r,p,per} \quad (2)$$

$$\forall \{n, p, per\} \in NosProdutosPeriodos$$

A restrição (3) é semelhante à restrição (2), e existe para realização do cálculo de quanto sai de um produto em um nó em um período, sendo o mesmo raciocínio aplicado, mas agora ao invés de $n1$ para n , de n para $n1$:

$$qSai_{n,p,per} = \sum_{\{n,n1,r,p,per\} \in NoProdutoSemDegraPer} qEnviadaPer_{n,n1,r,p,per} \quad (3)$$

$$\forall \{n, p, per\} \in NosProdutosPeriodos$$

As restrições (4) e (5) são utilizadas para consideração das degradações, onde na restrição (4) se calcula o quanto de um produto em um nó é gerado por degradação e na restrição (5) o quanto é utilizado de um produto para geração de outro produto, por degradação, em um nó:

$$qGeradaPorDegradacao_{n,p,per} = \sum_{\{n,p1,p,per\} \in RegrasDegradaPer} qDegradadaPer_{n,p1,p,per} \quad (4)$$

$$\forall \{n, p, per\} \in NosProdutosPeriodos$$

$$qUtilizadaNaDegradacao_{n,p,per} = \sum_{\{n,p,p1,per\} \in RegrasDegradaPer} qDegradadaPer_{n,p,p1,per} \quad (5)$$

$$\forall \{n, p, per\} \in NosProdutosPeriodos$$

Restrições como às utilizadas para degradações são utilizadas para misturas, mas considerando as regras de misturas, como nas equações (6) e (7).

$$qGeradaPorMistura_{n,p,per} = \sum_{\{n,p1,p2,p,per\} \in NosProdutosMisturaPeriodo} qMisturaPer_{n,p1,p2,p,per} \quad (6)$$

$$\forall \{n, p, per\} \in NosProdutosPeriodos$$

$$\begin{aligned}
qUtilizadaNaMistura_{n,p1,per} = & \sum_{\{n,p1,p2,p,per\} \in NosProdutosMisturaPeriodo, \{p1,p2,p,prop1,prop2\} \in RegrasMisturas} qMisturaPer_{n,p1,p2,p,per} * prop1 + \\
& \sum_{\{n,p2,p1,p,per\} \in NosProdutosMisturaPeriodo, \{p2,p1,p,prop1,prop2\} \in RegrasMisturas} qMisturaPer_{n,p2,p1,p,per} * prop2 \quad (7) \\
& \forall \{n, p1, per\} \in NosProdutosPeriodos
\end{aligned}$$

É interessante operacionalmente que, caso ocorra transporte entre dois nós, envie-se pelo menos uma quantidade mínima do produto, (e.g. Cinco mil unidades de volume, como utilizado nos experimentos apresentados no capítulo 5). Utilizam-se variáveis binárias para modelagem desta restrição (*seMovimentou*) e se diz que a quantidade total enviada deve ser maior do que a quantidade mínima, multiplicada por esta binária:

$$\begin{aligned}
qTotalEnviada_{o,d,r,p} >= & QUANTIA_MIN \times \\
& seMovimentou_{o,d,r,p} \quad (8) \\
& \forall \{o, d, r, p\} \in OPSemDegradacoes
\end{aligned}$$

Para considerar que em um período não ocorrem movimentações (para paradas e/ou manutenções) é necessário calcular o quanto é transferido por um duto em um período e então indicar que esta quantidade deve ser igual a zero. Realiza-se isto através das restrições 9 e 10 a seguir apresentadas:

$$\begin{aligned}
transferidoPeloDuto_{dt,per} = & \sum_{\{r,n,dt\} \in RotasSemDegradacoes, \{o,d,r,p,per\} \in OPSemDegradacoesPer} qEnviadaPer_{o,d,r,p,per} \quad (9) \\
& \forall \{dt, per\} \in DutoPeriodo
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
transferidoPeloDuto_{dt,per} = & 0 \quad (10) \\
& \forall \{dt, per\} \in Paradas
\end{aligned}$$

Diferencia-se o cálculo do balanço de inventário para os produtos que o estoque é unificado dos que o estoque não é unificado através da consideração, para cada termo das restrições dos produtos do grupo unificado, do somatório dos produtos do grupo. As equações (11) e (12) são para o cálculo do estoque no início do horizonte (período 0):

$$\begin{aligned}
estoque_{o,p,per} &= \sum_{\{o,p,estIni\} \in EstoqueIni} estIni \\
\forall \{p\} &\in ProdutosIndividuais, \\
\{o,p,per\} &\in NosProdutosPeriodos : per = 0
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
estoque_{o,p,per} &= \sum_{\{o,p2,estIni\} \in EstoqueIni, \{p2,gr\} \in Produtos} estIni \\
\forall \{p\} &\in ProdutosAgrupados, \{p,gr\} \in Produtos, \\
\{o,p,per\} &\in NosProdutosPeriodos : per = 0
\end{aligned} \tag{12}$$

Nota-se que a diferença entre as equações (11) e (12) é que na equação (12) calcula-se o estoque de todo produto “*p*”, do grupo “*gr*”, no período “0”, através do somatório dos estoques iniciais de todos os produtos “*p2*” pertencentes ao grupo “*gr*”.

As equações (13) e (14) são para o cálculo do inventário nos demais períodos. Para estes casos é necessário considerar o estoque do período anterior, a produção, a demanda e as quantias utilizadas e geradas por e para degradações e misturas.

Como a variável estoque assume apenas valores positivos, utiliza-se outra variável (*violacaoNeg*) para considerar as situações em que a demanda não é atendida. Então, para cálculo do estoque em um período, a falta de estoque do período anterior é subtraída e a falta de estoque do período atual é somada:

$$\begin{aligned}
estoque_{o,p,per} &= estoque_{o,p,per-1} - violacaoNeg_{o,p,per-1} + \\
&\quad \sum_{\{o,p,per,prod\} \in Producao} prod - \\
&\quad \sum_{\{o,p,per,dem\} \in Demanda} dem + \\
&\quad violacaoNeg_{o,p,per} + qChega_{o,p,per} - qSai_{o,p,per} + \\
&\quad qGeradaPorDegracao_{o,p,per} + qGeradaPorMistura_{o,p,per} - \\
&\quad qUtilizadaNaDegracao_{o,p,per} - qUtilizadaNaMistura_{o,p,per} \\
\forall \{p\} &\in ProdutosIndividuais, \{o,p,per\} \in NosProdutosPeriodos : per > 0
\end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
estoque_{o,p,per} = & estoque_{o,p,per-1} - violacaoNeg_{o,p,per-1} + \\
& \sum_{\{o,p,per,prod\} \in Producao} prod - \\
& \sum_{\{o,p,per,dem\} \in Demanda} dem + \\
& violacaoNeg_{o,p,per} + qChega_{o,p,per} - qSai_{o,p,per} + \\
& \sum_{\{o,p2,per\} \in NosProdutosPeriodos, \{p2,gr\} \in Produtos} qGeradaPorDegradação_{o,p2,per} + \\
& \sum_{\{o,p2,per\} \in NosProdutosPeriodos, \{p2,gr\} \in Produtos} qGeradaPorMistura_{o,p2,per} - \\
& \sum_{\{o,p2,per\} \in NosProdutosPeriodos, \{p2,gr\} \in Produtos} qUtilizadaNaDegradação_{o,p2,per} - \\
& \sum_{\{o,p2,per\} \in NosProdutosPeriodos, \{p2,gr\} \in Produtos} qUtilizadaNaMistura_{o,p2,per} \\
& \forall \{p\} \in ProdutosAgrupados, \{p, gr\} \in Produtos, \\
& \{o, p, per\} \in NosProdutosPeriodos : per > 0
\end{aligned} \tag{14}$$

Os cálculos das violações do inventário também são feitos levando em consideração se o estoque do grupo deve ser unificado. As violações de estoque negativo são consideradas já no cálculo da variável *estoque*, pois esta não pode ser negativa. Utiliza-se para exemplificar o cálculo das violações dos estoques meta mínimos e meta máximos (ver equações (15) e (16)):

$$\begin{aligned}
estoque_{o,p,per} + violaEstMetaMinPer_{o,p,per} & \geq eMetaMin \\
\forall \{p\} \in ProdutosIndividuais, \{o, p, per, eMetaMin\} & \in EstoqueMetaMin
\end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
estoque_{o,p,per} + violaEstMetaMinPer_{o,p,per} & \geq \\
& \sum_{\{o,p2,per,eMetaMin\} \in EstoqueMetaMin, \{p2,gr\} \in Produtos} eMetaMin \\
\forall \{p\} \in ProdutosAgrupados, \{p, gr\} \in Produtos, \\
& \{o, p, per\} \in NosProdutosPeriodos
\end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
estoque_{o,p,per} + violaEstMetaMaxPer_{o,p,per} & \leq eMetaMax \\
\forall \{p\} \in ProdutosIndividuais, \{o, p, per, eMetaMax\} & \in EstoqueMetaMax
\end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
estoque_{o,p,per} + violaEstMetaMaxPer_{o,p,per} &\geq \\
&\sum_{\{o,p2,per,eMetaMax\} \in EstoqueMetaMax, \{p2,gr\} \in Produtos} eMetaMax \\
\forall \{p\} \in ProdutosAgrupados, \{p,gr\} \in Produtos, \\
&\{o,p,per\} \in NosProdutosPeriodos
\end{aligned} \tag{18}$$

Com esta modelagem os movimentos são gerados de forma individual para cada produto, mas o estoque é considerado como unificado. No entanto, apenas com estas restrições ainda se permite a criação de movimentos de produtos que não possuem inventário, pois estas violações não são consideradas na função objetivo.

Para contornar esta situação, utiliza-se as restrições (19) e (20), onde se calcula a falta de produto de forma individual para os produtos com estoque unificado e, então, minimiza-se também estas faltas na função objetivo, que passa a ser como em (21).

$$\begin{aligned}
estoqueIndAgrup_{o,p,per} &= \sum_{\{o,p,estIni\} \in EstoqueIni} estIni \\
\forall \{p\} \in ProdutosAgrupados, \\
\{o,p,per\} \in NosProdutosPeriodos : per &= 0
\end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
estoqueIndAgrup_{o,p,per} &= estoqueIndAgrup_{o,p,per-1} - \\
&violacaoNegIndAgrup_{o,p,per-1} + \\
&\sum_{\{o,p,per,prod\} \in Prod} prod - \\
&\sum_{\{o,p,per,dem\} \in Dem} dem +
\end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
&violacaoNegIndAgrup_{o,p,per} + qChega_{o,p,per} - qSai_{o,p,per} + \\
&qGeradaPorDegracao_{o,p,per} + qGeradaPorMistura_{o,p,per} - \\
&qUtilizadaNaDegracao_{o,p,per} - qUtilizadaNaMistura_{o,p,per} \\
\forall \{p\} \in ProdutosAgrupados, \{o,p,per\} \in NosProdutosPeriodos : per &> 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Minimizar } Z = & \sum_{\{n,p\} \in \text{NosProdutos}} (\text{violacaoMin}_{n,p} \times \text{pesoMin}) + \\
& \sum_{\{n,p\} \in \text{NosProdutos}} (\text{violacaoMetaMin}_{n,p} \times \text{pesoMetaMin}) + \\
& \sum_{\{n,p\} \in \text{NosProdutosIndividuais}} (\text{violacaoNeg}_{n,p} \times \text{pesoNeg}) + \\
& \sum_{\{n,p\} \in \text{NosProdutos}} (\text{violacaoNegIndAgrup}_{n,p} \times \text{pesoNeg}) + \\
& \sum_{\{n,p\} \in \text{NosProdutos}} (\text{violacaoMax}_{n,p} \times \text{pesoMax}) + \\
& \sum_{\{n,p\} \in \text{NosProdutos}} (\text{violacaoMetaMax}_{n,p} \times \text{pesoMetaMax}) + \\
& \sum_{\{n,p\} \in \text{NosProdutos}} (\text{violacaoCapacidade}_{n,p} \times \text{pesoCapac})
\end{aligned} \tag{21}$$

Na nova função objetivo o índice das violações negativas (*violacaoNeg*) dos produtos individuais também deve ser alterado para considerar apenas os produtos em que o estoque não deve ser considerado como unificado (*NosProdutosIndividuais*). Isso é necessário pois as violações dos produtos agrupados nesta variável é o somatório das violações de todos os produtos dos grupos.

3.2 ALOCAÇÃO E SEQUENCIAMENTO

O módulo de alocação e sequenciamento é um algoritmo heurístico para fragmentação e ordenação dos volumes definidos no módulo de Planejamento.

Magatão et al. (2012) apresenta um modelo PLIM para alocação e sequenciamento de produtos claros em uma rede dutoviária e o custo computacional deste modelo é impeditivo, o que justifica a abordagem aqui explorada. No entanto, como a malha aqui tratada apresenta menos nós e menos produtos que a malha tratada em Magatão et al. (2012), uma possibilidade para trabalhos futuros é adaptar este modelo.

Descreve-se aqui um algoritmo baseado no apresentado em Fabro et al. (2014) que trata grupos de produtos onde o estoque deve ser considerado como unificado, sem deixar de diferenciar os bombeios dos diferentes produtos, que trata também de misturas e escolha de volumes, respeitando as restrições de aquecimento, para o fim do horizonte.

O módulo de alocação e sequenciamento é o segundo módulo da abordagem descrita na seção 2.3 e ilustrada na Figura 9.

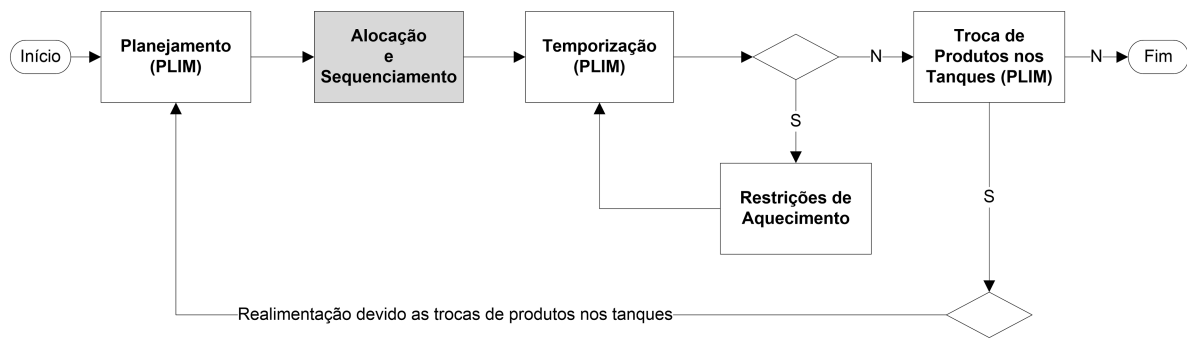


Figura 9: Fluxograma da abordagem para obtenção do *scheduling* com destaque para o módulo de alocação e sequenciamento, que é o segundo módulo a ser executado e onde se objetiva fragmentar e ordenar os volumes definidos no módulo de planejamento. Cada ciclo de realimentação é executado apenas uma vez.

3.2.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO E SEQUENCIAMENTO

O problema de alocação e sequenciamento consiste em fragmentar os volumes definidos no planejamento e ordenar estes fragmentos nos dutos. Utiliza-se para realização desta tarefa as curvas de produção e demanda de cada nó e, então, se criam volumes de forma sequencial para atender as demandas e não permitir o estouro da capacidade nos nós produtores (refinarias).

Faz-se necessário, para entendimento de como os volumes são calculados, a definição, utilizando a curva de inventário de cada produto em cada nó, de 4 tempos, conforme especificado em Boschetto (2011):

1. Tempo de Envio Disponível (TED): A hora em que um nó pode começar a enviar uma determinada quantia de um determinado produto, a uma determinada vazão, na qual o inventário não irá ficar abaixo de um limite;
2. Tempo de Envio Crítico (TEC): A hora em que um nó deve começar a enviar uma determinada quantia de um determinado produto, a uma determinada vazão, para que o inventário não fique acima de um limite;
3. Tempo de Recebimento Disponível (TRD): A hora em que um nó pode começar a receber uma determinada quantia de um determinado produto, a uma determinada vazão, para que o inventário não fique acima de um limite;
4. Tempo de Recebimento Crítico (TRC): A hora em que um nó deve começar a receber uma determinada quantia de um determinado produto, a uma determinada vazão, para que o inventário não fique abaixo de um limite.

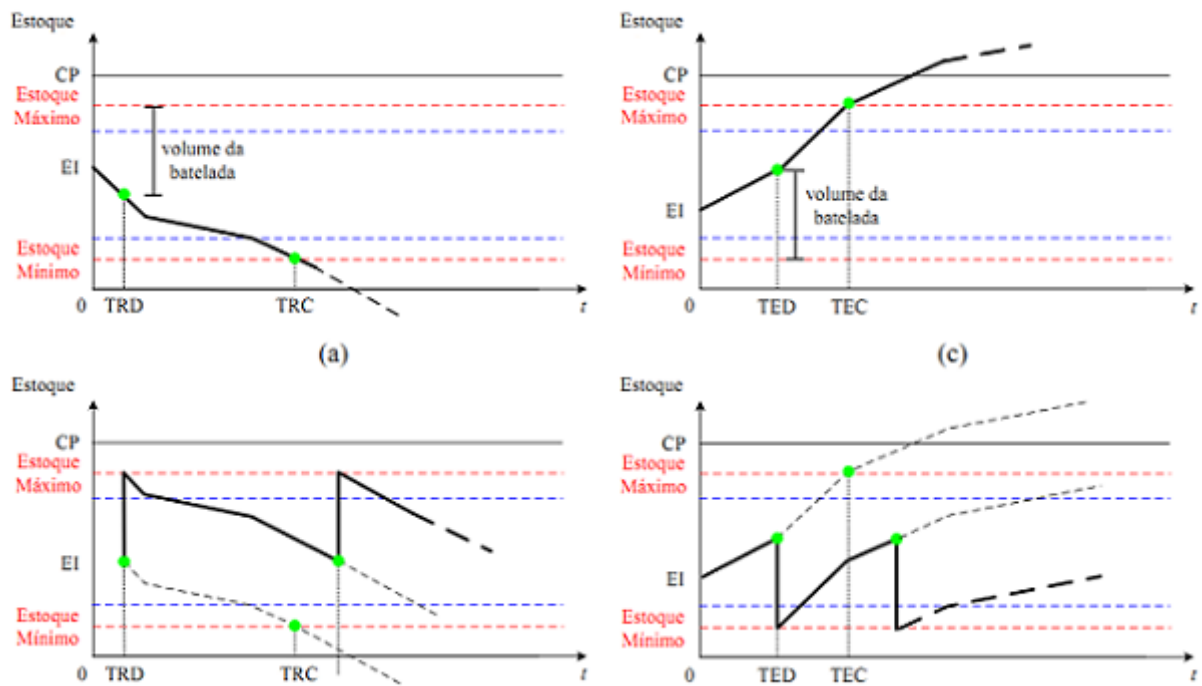


Figura 10: Exemplo de janela de recebimento (à esquerda), formada pelo TRD e pelo TRC, e a janela de envio (à direita), formada pelo TED e pelo TEC. Fonte: Felizari (2009).

Com estes tempos é possível calcular uma janela temporal de recebimento e uma janela temporal de envio (ilustradas na Figura 10), para cada produto em cada nó. O conceito de janela de tempo também é importante para o próximo módulo da abordagem - temporização - onde objetiva-se definir o tempo de início e o tempo de fim de bombeio e de recebimento de cada porção volumétrica de um movimento, onde estes tempos devem obedecer as janelas definidas na alocação e posteriormente processadas na pré-análise (ver subsecção 4.1.2.1).

Uma diferença no cálculo de janelas apresentado em trabalhos anteriores para o aqui utilizado e, também, da Figura 10, é que aqui se consideram apenas os limites máximos (falta de inventário e estouro da capacidade).

3.2.2 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO E DAS HEURÍSTICAS

O algoritmo de alocação e sequenciamento recebe como dados de entrada:

- Os movimentos presentes no duto no início do cenário;
- Os movimentos programados;
- As curvas de produção para cada produto em cada nó;
- As curvas de demanda para cada produto em cada nó;
- As curvas de estoque inicial para cada produto em cada nó;

- A capacidade para cada produto em cada nó;
- A lista de porções volumétricas tipicamente movimentadas de cada produto;
- A lista de incompatibilidade entre os produtos e como tratá-las.

Utiliza-se para criação dos movimentos um algoritmo heurístico que, de forma cíclica, escolhe o nó mais necessitado, dentre os que foram definidos pelo planejamento, para enviar ou receber um produto, escolhe um par (dentre os definidos no planejamento) para enviar ou receber uma determinada quantia (baseada em porções volumétricas tipicamente movimentadas), cria o movimento e atualiza o estado dos inventários considerando que o movimento chegará em seu destino com a vazão máxima, até que todas as necessidades sejam atingidas, ou que não seja mais possível atender nenhuma necessidade.

Ilustra-se na Figura 11 o algoritmo descrito no parágrafo anterior. Para escolha do produto mais necessitado, avalia-se todos os bombeios definidos no planejamento que ainda não foram alocados. Para escolha do par, calcula-se a janela de tempo para todos os pares (definidos no planejamento) e se escolhe o par que melhor atenda a janela do mais necessitado.

Em uma parte do módulo chamada por Fabro et al. (2014) de pós-alocação, cria-se movimentos para empurrar os últimos movimentos planejados e alocados. Estes movimentos são importantes pois, sem eles, os últimos volumes planejados não chegariam ao seus destinos.

Ainda, devido às trocas de produtos nos tanques, não se sabe com certeza a tancagem disponível para cada produto em cada nó antes da realimentação e, portanto, não se pode afirmar quais serão os valores de dois pontos: O Tempo de Envio Crítico e o Tempo de Recebimento Disponível. Utiliza-se para estes casos os seguintes valores para formação das janelas:

- O TEC é sempre igual ao fim do horizonte;
- O TRD é igual ao TED mais o tempo de bombeio (volume dividido pela vazão máxima), presumindo que o produto poderá ser recebido pouco depois do momento no qual ele pode ser enviado;

Existe uma exceção no cálculo da janela para os movimentos que já estavam no duto no início do cenário, pois estes movimentos não possuem tempos críticos, considera-se nestes casos que eles são recebidos no início do cenário e se indica para a temporização que eles podem ser recebidos em qualquer momento.

No entanto, esta simplificação pode gerar falta de produto no nó de destino do movimento que estava no duto no início do cenário, já que, por possuírem as janelas “abertas”, o modelo de temporização pode optar por empurrá-los em um momento posterior à demanda real.

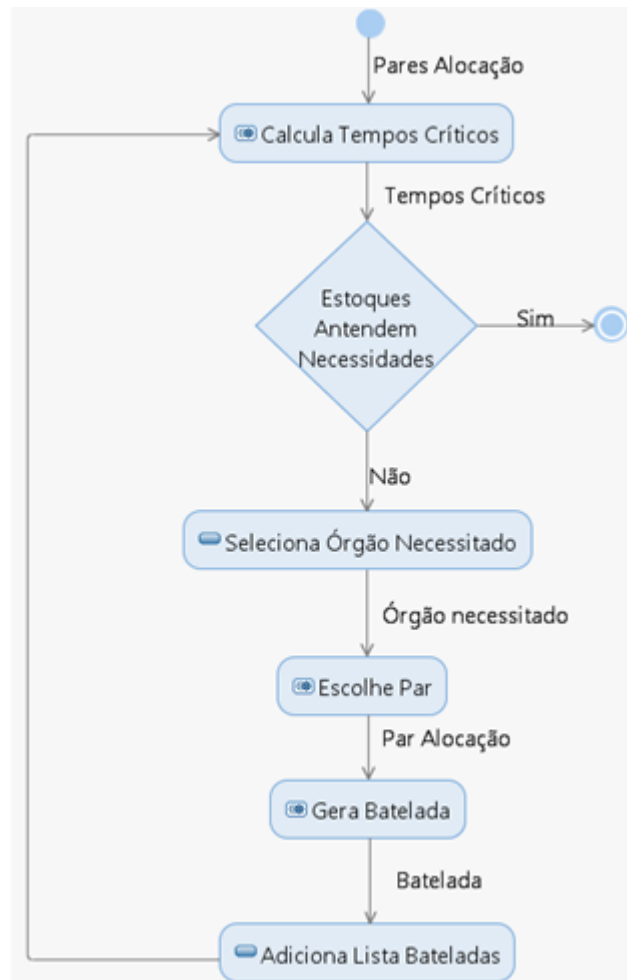


Figura 11: Fluxo de execução do algoritmo para alocação e sequenciamento. Uma batelada é um movimento ou um volume menor do que o definido no módulo de planejamento. Fonte: Polli et al. (2014).

Utiliza-se um esquema de precedências para solucionar este problema, onde, após executada a temporização uma primeira vez, atrela-se precedências de saída aos movimentos, e se executa novamente a temporização.

Este esquema de precedências também permite a utilização do inventário de produtos nos nós intermediários para adiantar um movimento que apenas iria passar por este nó, isto é, envia-se o inventário do nó intermediário antes da chegada do produto que apenas passaria por ele e, com a chegada do produto no nó intermediário, o inventário é repostado.

3.2.2.1 GRUPOS DE PRODUTOS COM ESTOQUE UNIFICADO

Para manter o módulo de alocação e sequenciamento como em Fabro et al. (2014), opta-se por uma abordagem onde se consideram os grupos com estoque unificado como um único produto. Então, para o cálculo dos tempos críticos, busca-se as informações unificadas e, para a escolha dos pares, o produto mais necessitado do grupo e se cria o movimento deste produto.

Desta maneira, no próximo ciclo de execução do módulo de alocação e sequenciamento, ao se recalcularem os tempos críticos, o grupo do produto (que no momento é considerado como um único produto) terá seu estoque atualizado. Ilustra-se na Figura 12 em que fases do algoritmo ilustrado na Figura 11 os produtos são tratados como grupos e em que fase são tratados como individuais.

Faz-se importante notar que apenas o algoritmo representado na Figura 12, que é uma modificação do algoritmo representado na Figura 11 para tratamento dos produtos com estoque unificado, é executado.

3.2.2.2 MISTURAS

Para tratamento de misturas são necessárias modificações na fase de escolha de par no algoritmo ilustrado na Figura 11 pois, caso o par indicado pelo módulo de planejamento seja para mistura, é necessário compatibilizar as janelas dos três nós (os dois envolvidos na geração da mistura e o nó necessitado).

Portanto, para criação de um movimento de mistura, é necessária a criação dos dois movimentos geradores e do movimento final. Para os movimentos geradores as janelas são calculadas como explicado na subseção 3.2.2.1. Para o movimento final, a janela é criada com o maior TED somado com o tempo de bombeio (na vazão máxima), dentre os dois movimentos geradores, e TEC é o fim do horizonte de programação.

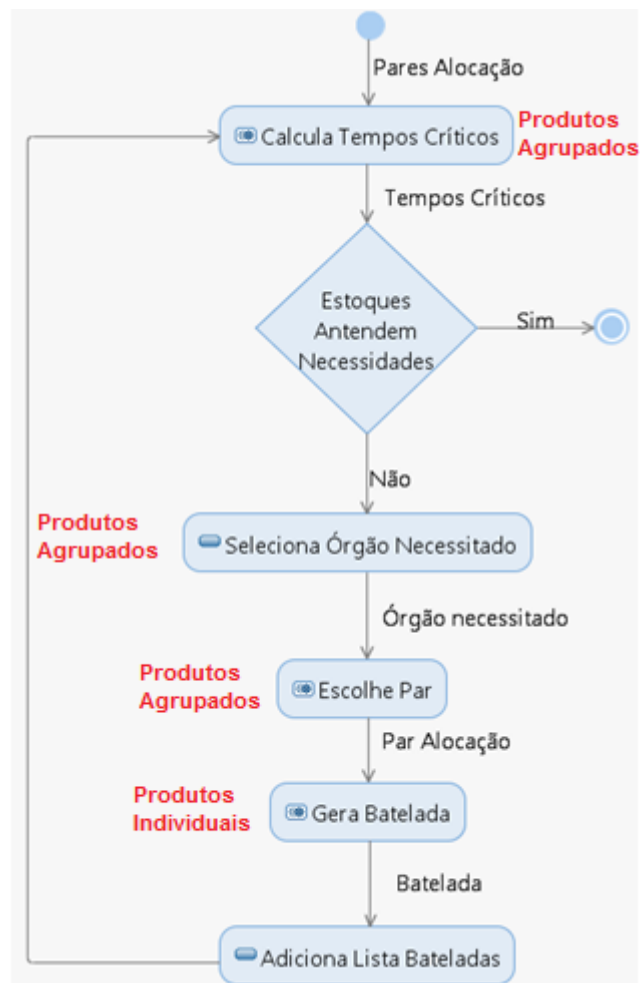


Figura 12: Fluxo de execução do algoritmo para alocação e sequenciamento com destaque para onde os grupos de produtos com estoque unificado são tratados como sendo um único produto e onde são tratados como sendo um grupo. Uma batelada é um movimento ou um volume menor do que o definido no módulo de planejamento. Adaptada de: (POLLI et al., 2014).

Exemplifica-se na Figura 13 o cálculo de janelas para um movimento de mistura, o movimento final é criado com o TED do “Movimento 1”, que é o maior TED, onde já se considera o tempo de bombeio até o nó N4.

3.2.2.3 MOVIMENTOS DE FIM DO HORIZONTE COM AQUECIMENTO

A criação de movimentos não planejados para que eles “empurrem” os movimentos planejados foi abordada anteriormente por Fabro et al. (2014). No entanto, é possível endereçar já nesta etapa as restrições de aquecimento, situação não contemplada anteriormente.

Como nesta etapa ainda não foram definidos os tempos de envio e recebimento de cada volume, estima-se a vazão de bombeio dos movimentos supondo que eles são bombeados com a mesma vazão, sendo esta: todo o volume movimentado no duto dividido pelo volume do duto.

Com a vazão de bombeio é possível ter uma estimativa de quando o movimento irá chegar em seu destino e, então, torna-se possível tomar a seguinte decisão: inserir um movimento que seja do produto mais movimentado neste duto ou inserir um movimento que possa ficar neste duto até o fim do horizonte de programação sem violar a sua restrição de aquecimento.

A inserção do produto mais movimentado é interessante pois, em geral, as movimentações dos dias posteriores às do horizonte seguem o mesmo padrão do horizonte atual. No entanto, se esta inserção violar uma restrição de aquecimento, prefere-se a inserção de um movimento que não a viole.

Após a temporização é possível substituir os movimentos de fim de duto por novos movimentos, agora considerando os tempos e vazões corretos.

Descreve-se no próximo capítulo o módulo de temporização, o módulo de restrições de aquecimento e o módulo de trocas de produtos nos tanques.

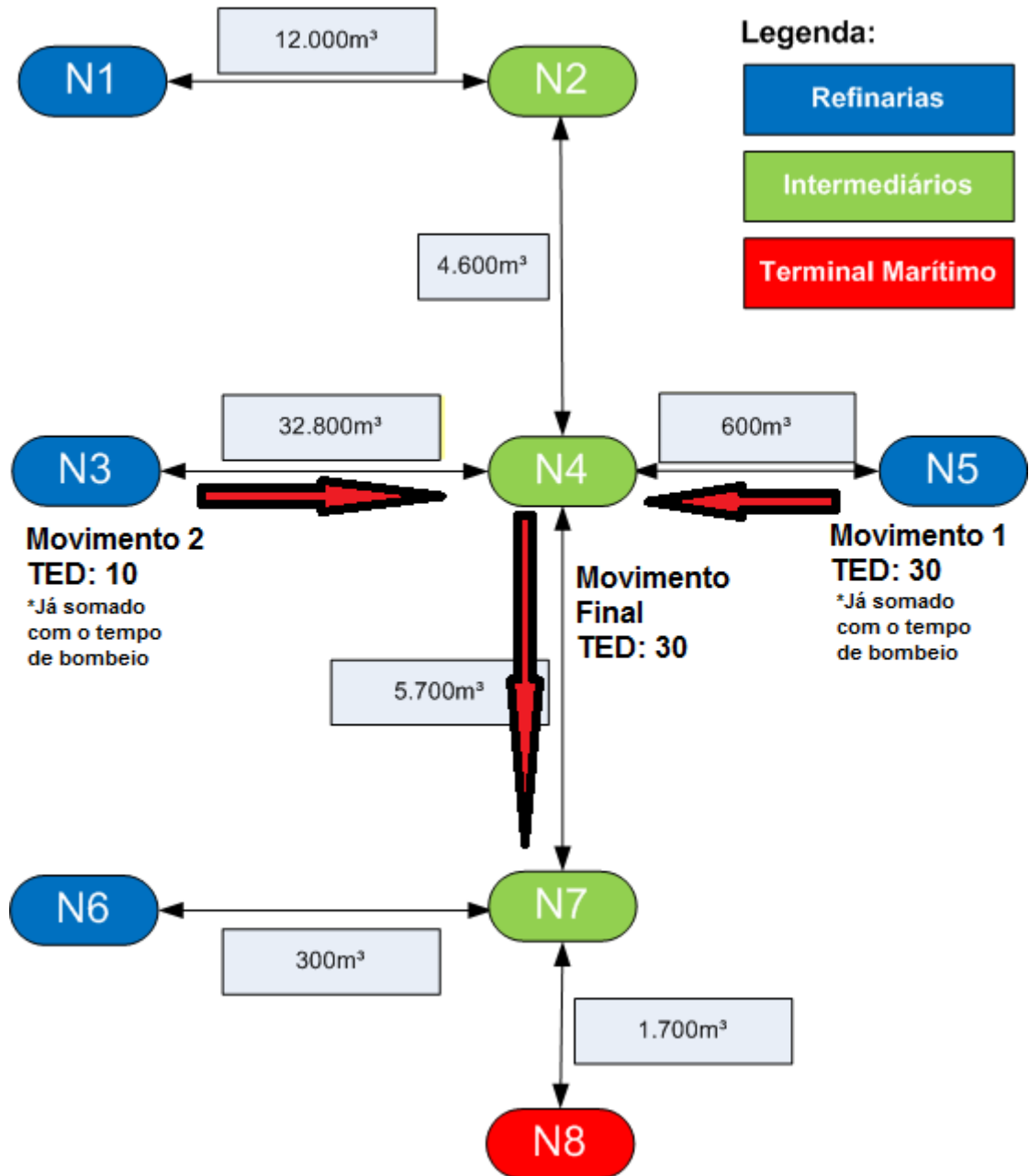


Figura 13: Exemplo de cálculo de janela para um movimento de mistura. Para os movimentos geradores as janelas são calculadas como explicado na subseção 3.2.2.1 (com os tempos de envio e recebimento disponível e críticos mais a vazão máxima). Para o movimento final, a janela é criada com o maior tempo de envio disponível (TED) somado com o tempo de bombeio (utilizando a vazão máxima) dentre os dois movimentos geradores e o TEC é o fim do horizonte de programação. Fonte: Adaptada de Bueno et al. (2015).

4 TEMPORIZAÇÃO, AQUECIMENTO E TROCA DE PRODUTOS NOS TANQUES

Descreve-se neste capítulo os módulos de temporização, de restrições de aquecimento e de trocas de produtos nos tanques.

4.1 TEMPORIZAÇÃO E RESTRIÇÕES DE AQUECIMENTO

No modelo de temporização se objetiva calcular os tempos de bombeio e recebimento dos movimentos e no módulo de restrições de aquecimento, a identificação das necessidades de inserção de movimentos para empurrar eventuais volumes que estejam violando as restrições de aquecimento.

A abordagem utilizada no modelo de temporização é a mesma de Fabro et al. (2014). O módulo de restrições de aquecimento também é o mesmo de Fabro et al. (2014), que é baseado na abordagem apresentada também pelo autor da presente dissertação em Rossato et al. (2013).

O modelo de temporização é o terceiro módulo da abordagem e o algoritmo para tratamento das restrições de aquecimento é o quarto. Ambos estão ilustrados na Figura 14.

4.1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE TEMPORIZAÇÃO

Define-se o problema de temporização como o problema de determinar quando um volume será bombeado em uma origem e a vazão deste bombeio, obedecendo as restrições operacionais (como as restrições de vazão) e satisfazendo as necessidades de estoque (sobra ou falta de produtos nos nós).

A tarefa de definição de tempo e vazão é uma tarefa complexa pois, em uma malha dutoviária, a movimentação de um volume é influenciada pela movimentação dos volumes seguintes, fazendo com que um movimento possa ser impactado por n outros movimentos e, desta forma, com que n partes de um movimento sejam recebidas a vazões diferentes.

Ilustra-se na Figura 15 a influência de um bombeio no recebimento dos outros. Nela,

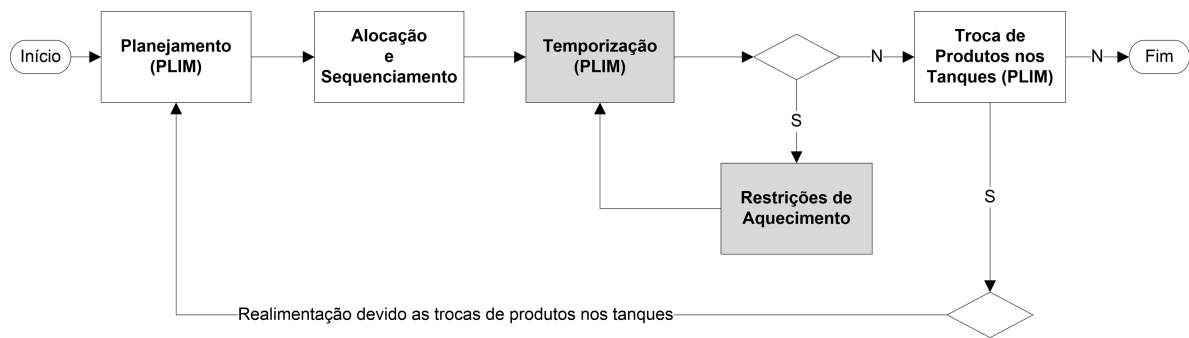


Figura 14: Fluxograma da abordagem para obtenção do *scheduling* com destaque para o modelo PLIM de temporização e o módulo de tratamento das Restrições de Aquecimento. No modelo de temporização se objetiva calcular os tempos de bombeio e recebimento dos movimentos e no módulo de restrições de aquecimento a identificação das necessidades de inserção de movimentos para “empurrar” eventuais volumes que estejam violando as restrições de aquecimento. Cada ciclo de realimentação é executado apenas uma vez.

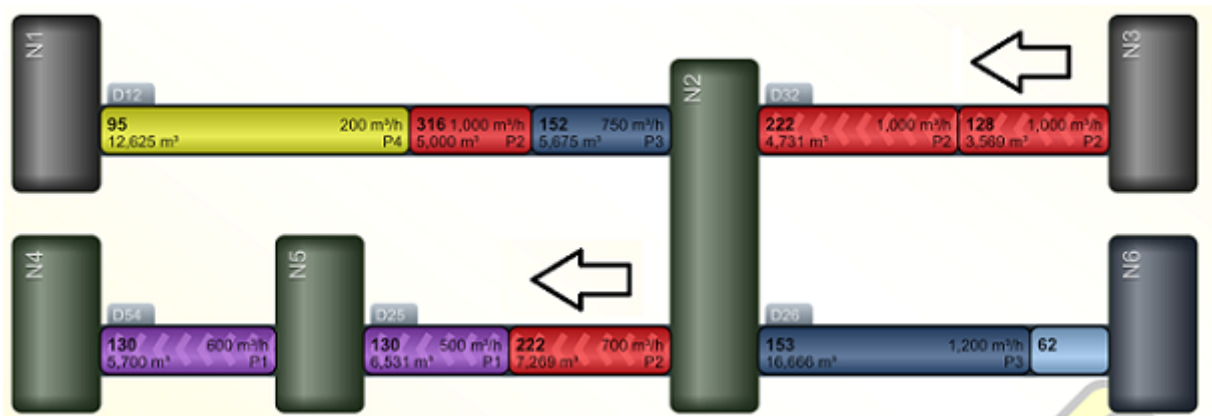


Figura 15: Influência de um bombeio no recebimento dos outros. O movimento “128” empurra o movimento “222” (a flecha indica o sentido do bombeio), que por consequência empurra o movimento “130”. Nesta figura representa-se apenas um instante de tempo.

o movimento “128” empurra o movimento “222” (a flecha indica o sentido do bombeio), que por consequência empurra o movimento “130”. Nesta figura representa-se apenas um instante de tempo.

Um movimento pode ser bombeado para um tanque com uma vazão e ser bombeado deste tanque para outro duto com outra vazão. As bombas em cada nó possuem capacidades de bombeio diferentes, assim como os dutos e tanques possuem vazões mínimas e máximas para passagem e recebimento, respectivamente.

4.1.2 DESCRIÇÃO DO MODELO PLIM DE TEMPORIZAÇÃO

No modelo de temporização objetiva-se determinar os tempos de início e fim de bombeio e recebimento de cada movimento. Um mesmo movimento pode ser dividido em partes que

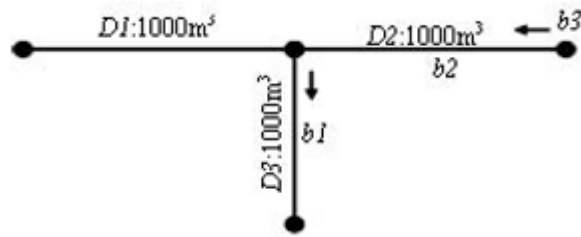


Figura 16: Influências que o algoritmo de pré-análise detecta. Nela o movimento “b1” está no duto “D3” e o movimento “b2” está no duto “D2”. Supondo que o movimento “b2” tenha como rota o duto “D3” e, que o próximo movimento a ser inserido no duto “D2”, o movimento “b3”, tenha como rota o duto “D1”, então o movimento “b3”, que não tem como rota o duto “D3”, influenciará o recebimento do movimento “b1” e a entrada do movimento “b2” neste duto. Fonte: Boschetto (2011).

são movimentadas a vazões diferentes devido às influências dos movimentos seguintes.

Identificar as influências no modelo PLIM de temporização aumenta o tempo computacional do modelo para um teto não aceitável. Então utiliza-se um algoritmo chamado de pré-análise para divisão dos movimentos em partes e identificação das influências entre as partes.

4.1.2.1 PRÉ-ANÁLISE

O algoritmo de pré-análise é determinístico e com ele se divide os volumes criados no módulo de alocação e sequenciamento em partes menores, devido às diferenças de vazão nos bombeios. No algoritmo de pré-análise também se cria uma lista de influências para cada uma destas partes.

Ilustra-se na Figura 16 as influências que o algoritmo de pré-análise detecta. Nela, o movimento “b1” está no duto “D3” e o movimento “b2” está no duto “D2”. Supondo que o movimento “b2” tenha como rota o duto “D3” e, que o próximo movimento a ser inserido no duto “D2”, o movimento “b3”, tenha como rota o duto “D1”, então o movimento “b3”, que não tem como rota o duto “D3”, influenciará o recebimento do movimento “b1” e a entrada do movimento “b2” neste duto.

Uma descrição mais detalhada do algoritmo de pré-análise é feita em Boschetto (2011). Uma diferença do algoritmo aqui utilizado para o de Boschetto (2011) é que aqui também se calcula:

- Início mínimo de bombeio: que representa quando um nó pode começar a enviar uma parte de um movimento;

- Início máximo de bombeio: que representa quando um nó precisa começar a enviar uma parte de um movimento;
- Fim mínimo de bombeio: que representa quando um nó pode terminar de enviar uma parte de um movimento;
- Fim máximo de bombeio: que representa quando um nó precisa terminar de enviar uma parte de um movimento;
- Início mínimo de recebimento: que representa quando um nó pode começar a receber uma parte de um movimento;
- Início máximo de recebimento: que representa quando um nó precisa começar a receber uma parte de um movimento;
- Fim mínimo de recebimento: que representa quando um nó pode terminar de receber uma parte de um movimento;
- Fim máximo de recebimento: que representa quando um nó precisa terminar de receber uma parte de um movimento.

Calcula-se estes tempos da seguinte forma: Considera-se uma curva simplificada de inventário para cada produto em cada nó, formada pela soma da produção, da demanda, do estoque inicial e do volume das partes já consideradas previamente. Então para cada parte, de forma sequencial, verifica-se estes tempos nesta curva.

4.1.2.2 MODELO PLIM DE TEMPORIZAÇÃO

Descreve-se nesta subseção o modelo PLIM de temporização, onde se tem como objetivo determinar os tempos de início e fim de bombeio e recebimento de cada parte de um movimento. Considera-se para esta tarefa as restrições operacionais da rede e o nível de inventário dos produtos nos nós.

Define-se os tempos de bombeio e recebimento através das influências determinadas pelo algoritmo de pré-análise e das janelas calculadas pela alocação e pela pré-análise, assim, também é possível escolher momentos para paradas no bombeio.

Ilustra-se uma parada de bombeio na Figura 17. A Figura 17 é um gráfico de Gantt onde o eixo horizontal representa o tempo, a linha “01” representa um duto e cada porção na linha é a parte de um movimento, as partes possuem o número do seu movimento e um mesmo

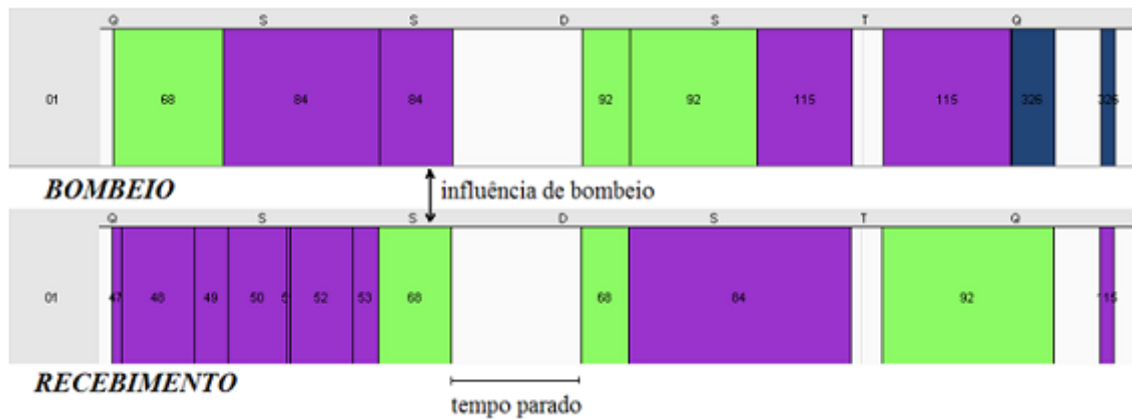


Figura 17: Gantt com exemplo de parada de bombeio. O eixo horizontal representa o tempo, a linha “01” representa um duto e cada porção na linha é a parte de um movimento, as partes possuem número associadas aos seus movimentos e um mesmo movimento pode ser dividido em mais de uma parte. O movimento “68” é dividido em duas partes de recebimento pois é empurrado pelos movimentos “84” e “92”, ocorrendo uma parada de bombeio entre eles. Fonte: Boschetto (2011).

movimento pode ser dividido em mais de uma parte. O movimento “68” é dividido em duas partes de recebimento pois é empurrado pelos movimentos “84” e “92”, ocorrendo uma parada de bombeio entre eles.

Além das informações indicadas pela pré-análise e pela alocação, no modelo PLIM de temporização também são levados em conta os seguintes itens:

- Limites de vazão de bombeio para cada produto em cada nó;
- Limites de vazão de bombeio para cada produto em cada duto;
- Limites de bombeios simultâneos em cada nó;
- O tempo máximo que a menor porção volumétrica considerada de um derivado pode ficar em cada duto.

Nota-se que, mesmo com a inclusão do modelo PLIM de temporização na abordagem de realimentação, os pesos da função objetivo continuam os mesmos nos dois ciclos. Isso é possível pois o modelo utiliza as informações provenientes da alocação (que já considera as faixas de inventário como mais ou menos impactantes para o *scheduling*).

Para consideração das restrições de aquecimento adotou-se o conceito de tempo de residência máxima, um tempo limite que a menor porção volumétrica considerada de um derivado pode permanecer sem ser aquecida (assumindo que ela perde calor em tempo constante). Este tempo de residência é um parâmetro e é definido para cada derivado em cada duto.

Justifica-se esta abordagem pois, como descrito em Rossato et al. (2013), a consideração precisa das variáveis envolvidas na perda de temperatura, como a temperatura exterior, a fricção e as características de cada duto, são imprevisíveis e difíceis de se incorporar em um modelo PLIM.

Como considerar o tempo de residência máximo para cada menor porção volumétrica considerada é um problema de difícil tratamento, opta-se por calcular este tempo para a maior porção volumétrica de um movimento que permanece em um duto sem ser dividida.

Como um movimento pode ser dividido em partes menores devido às diferenças de vazão dos movimentos que o influenciam, projetando as paradas de bombeio e de recebimento, é possível obter as porções volumétricas que entraram e saíram do duto sem serem divididas.

Ilustra-se esta característica na Figura 18, onde o bombeio de um movimento de $10.000m^3$ é dividido em duas partes, assim como o seu recebimento. Projetando a hora da divisão do bombeio e a hora da divisão do recebimento, obtém-se três porções volumétricas que entraram e saíram dos dutos sem serem divididas. Supondo que, para o derivado da Figura 18 o tempo de residência máxima é de 110h, então apenas a última porção volumétrica do movimento viola a restrição de aquecimento.

A identificação das partes dos movimentos que permanecem no duto sem serem divididas possibilita o cálculo do tempo de residência de cada uma destas partes através da consideração dos tempos de residência da primeira e da última menor porção volumétrica considerada de cada parte. Para este cálculo existem três possibilidades:

1. A vazão de bombeio e recebimento é a mesma: Bastando considerar o tempo de residência da primeira e da última menor porção volumétrica considerada do volume e, se as duas obedecerem o tempo de residência máximo, todas as outras também obedecem;
2. A vazão de bombeio é maior que a vazão de recebimento: Neste caso a última menor porção volumétrica considerada tem o maior tempo de residência e, se ela obedecer o tempo de residência máximo, todas as outras também obedecem;
3. A vazão de recebimento é maior que a vazão de bombeio: Neste caso a primeira menor porção volumétrica considerada tem o maior tempo de residência e, se ela obedecer o tempo de residência máximo, todas as outras também obedecem.

Tendo em vista o aqui exposto em relação aos tempos de residência máximo, faz-se necessário adequar os cálculos no modelo PLIM de temporização. Esta adequação está descrita detalhadamente em Rossato et al. (2013).

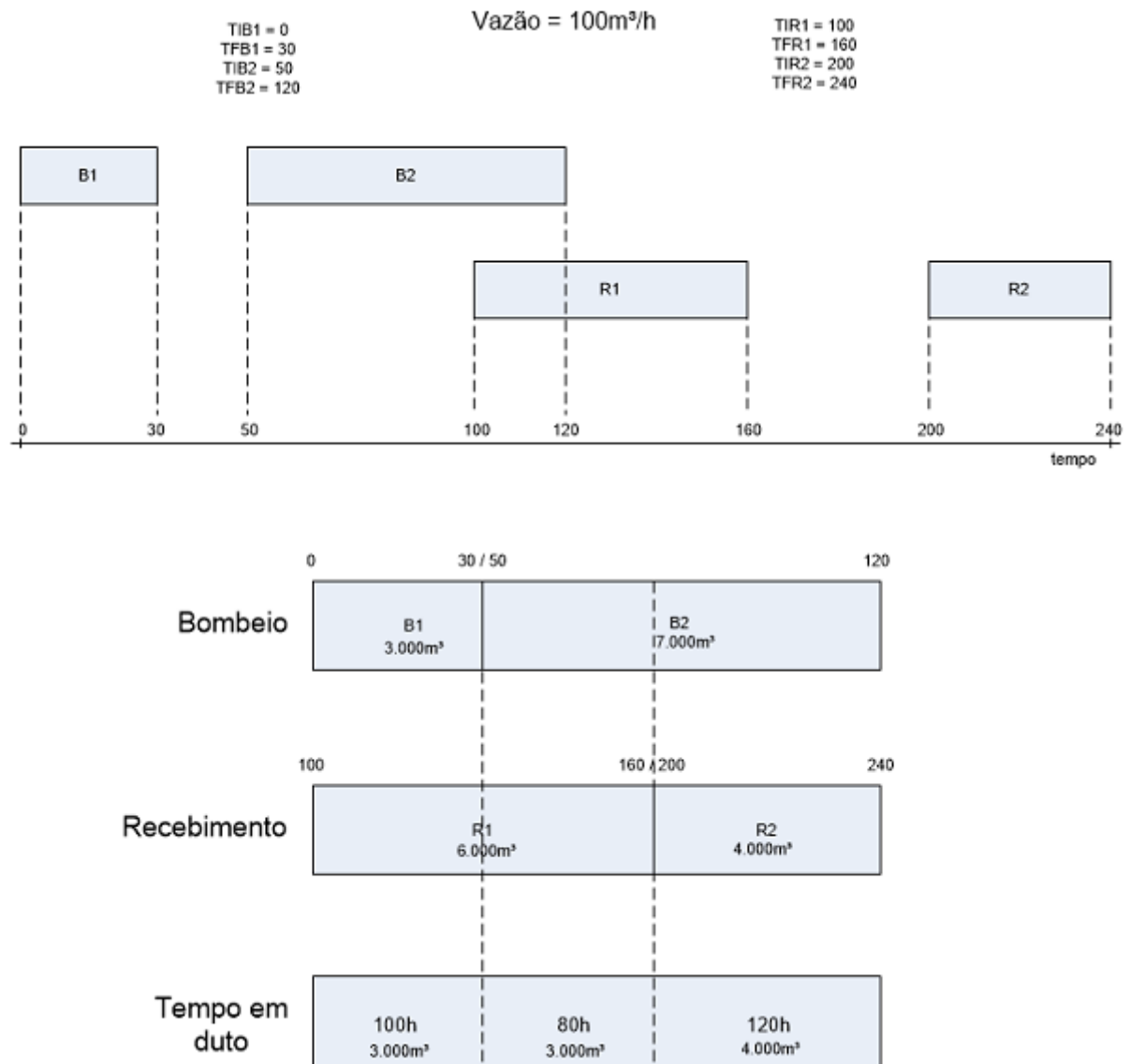


Figura 18: Exemplo de divisão volumétrica para obtenção dos tempos de residência máxima. Um bombeio de 10.000m³ é dividido em duas partes, assim como o seu recebimento. Projetando as paradas de bombeio e de recebimento é possível obter as porções volumétricas que entraram e saíram do duto sem serem divididas. Supondo que o tempo de residência máxima para este derivado é de 110h, então apenas a última porção volumétrica do movimento viola a restrição de aquecimento. Fonte: Rossato et al. (2013).

Uma descrição mais detalhada do modelo de temporização é feita em Boschetto (2011) e uma revisão, onde também se considera as restrições de aquecimento, em Fabro et al. (2014). Aqui também se considera na função objetivo os tempos calculados na pré-análise, e se minimiza a violação dos mesmos.

Para quando não se consegue não violar as restrições de aquecimento, utiliza-se a abordagem descrita na próxima subseção. Optou-se por esta abordagem de decomposição para não aumentar a carga computacional do modelo de temporização.

4.1.3 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO PARA CONSIDERAÇÃO DAS RESTRIÇÕES DE AQUECIMENTO

Com o resultado da temporização é possível verificar quais volumes violam as restrições de aquecimento e, então, inserir movimentos que não violem estas restrições e que empurrem os movimentos que as violam. Este procedimento é chamado de parada de duto.

Decidir o número de movimentos de parada não é tarefa trivial, pois como o movimento de parada inserido não possui tempos definidos, é necessário recalcular a solução do problema de temporização. Portanto, apenas insere-se um movimento de parada por duto e se executa novamente o modelo de temporização.

Apesar de optar-se pela inserção de apenas um movimento de parada por duto, também é desejável que o número ideal de paradas seja calculado pelo algoritmo. Outra característica desejável é a inserção de movimentos para acondicionamento dos dutos, isto é, para um duto que está parado, a inserção de um movimento aquecido para empurrar o movimento que está parado para seu destino, e outro movimento no sentido contrário para empurrar o movimento parado e o movimento aquecido para as suas origens.

4.2 TROCA DE PRODUTOS NOS TANQUES

Descreve-se nesta seção o modelo de troca de produtos nos tanques, um modelo PLIM para definição de qual produto estará alocado em qual tanque, em que período do horizonte de programação.

A existência destas trocas implica maior complexidade na tarefa de *scheduling*, pois a tancagem disponível para cada produto é sempre uma restrição nos módulos anteriores e a possibilidade de mudança de inventário altera estas restrições *a posteriori*.

Utiliza-se uma abordagem de realimentação para resolução deste problema, descrita

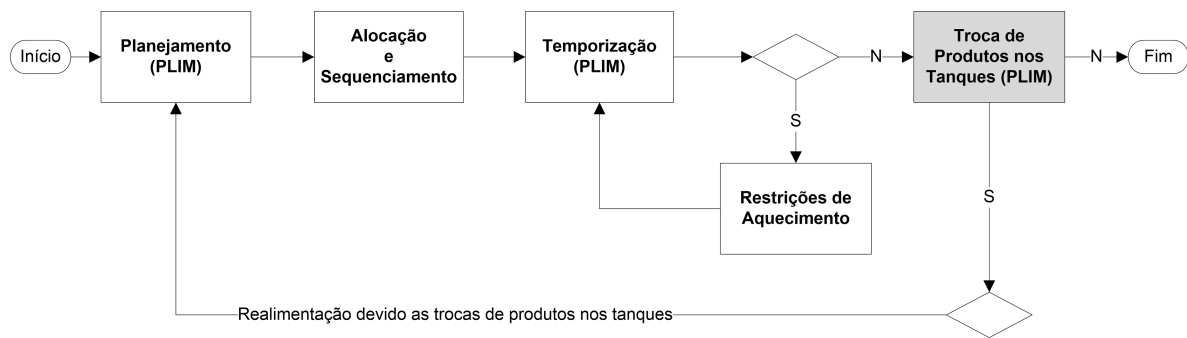


Figura 19: Fluxograma da abordagem para realização do *scheduling* com destaque para o módulo de troca de produtos nos tanques. O primeiro ciclo considera a tancagem como menos restritiva, pois ainda podem ocorrer trocas de produtos nos tanques e o segundo ciclo como mais restritiva. Cada ciclo de realimentação é executado apenas uma vez.

na subseção 2.3 e ilustrada na Figura 19. Executa-se primeiro toda a abordagem, considerando a tancagem como menos restritiva, e em seguida se executa novamente a abordagem, considerando a tancagem como mais restritiva.

A troca de produtos nos tanques foi abordada anteriormente por Valério et al. (2012b), com um algoritmo que analisa sequencialmente as necessidades e realiza as trocas de forma gulosa. Portanto, um algoritmo que não garante a obtenção de uma solução ótima. Posteriormente este problema foi abordado com um modelo PLIM por Fabro et al. (2014) e pelo autor da presente dissertação em Bueno et al. (2014).

A principal diferença do modelo aqui apresentado para o de Fabro et al. (2014) é a consideração de quais produtos podem ser armazenados em quais tanques e não apenas a realização de trocas de produtos nos tanques que pertencem ao mesmo grupo de produtos. Diferença esta também apresentada pelo autor da presente dissertação em Bueno et al. (2014).

Com relação aos grupos de produtos em que o estoque deve ser considerado como unificado e, devido à solução aqui descrita para este requisito (detalhada na seção 3.2), o modelo não sofreu mudanças, pois passou a receber as informações dos grupos como se estes fossem um único produto.

No entanto, como o modelo de planejamento considera os produtos individuais, após a execução do módulo de troca de produtos nos tanques é necessário indicar para qual produto o tanque se destina. Opta-se aqui pelo produto que possui mais atividade operacional.

4.2.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE TROCA DE PRODUTOS NOS TANQUES

Não é possível armazenar todos os produtos em todos os períodos de tempo e trocas de produtos nos tanques são necessárias. Dependendo das características do produto que está

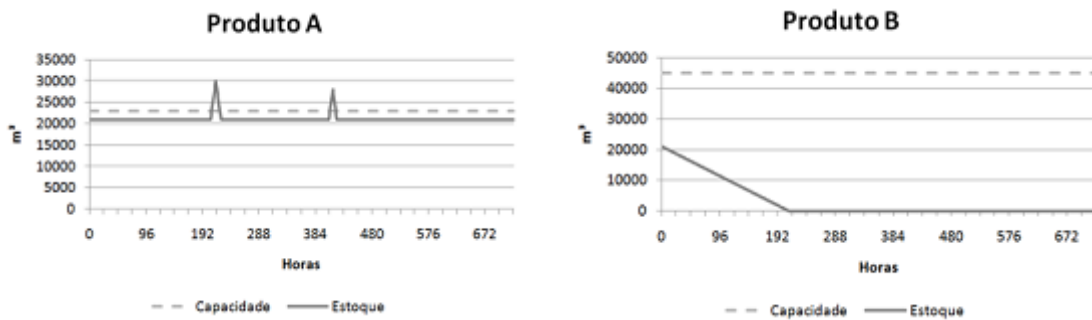


Figura 20: Exemplo de troca de produtos nos tanques. O estoque do produto “A” ultrapassa sua capacidade. A capacidade do produto “B” é muito maior que seu estoque. Fonte: Bueno et al. (2014).

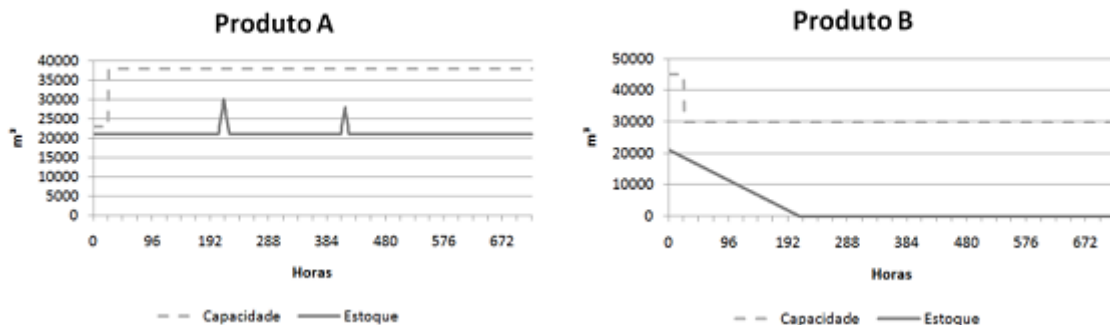


Figura 21: Exemplo de troca de produtos nos tanques. O produto “A” recebe o tanque do produto “B”. Fonte: Bueno et al. (2014).

alocado em um tanque, também não é possível armazenar qualquer outro produto neste tanque. Logo, sabe-se de antemão quais produtos podem ser alocados em quais tanques.

A troca de um produto em um tanque é um processo custoso e que implica mudanças na solução de *scheduling* encontrada até o momento (que é baseada na tancagem antiga), por isso evita-se a realização de trocas. Só acontecem trocas de produtos em tanques de um mesmo nó.

Caso sejam necessárias duas trocas prefere-se que elas sejam realizadas em tanques diferentes. Um tanque possui lastro e, para remoção deste lastro e preparação do tanque para chegada do novo produto, considera-se que estas operações demandam um dia.

Considera-se a tancagem disponível para um produto como a tancagem agregada (somatório de todos os tanques alocados a este produto). Para os produtos com estoque unificado se considera o grupo de produtos como sendo apenas um produto (somatório de todos os tanques alocados a todos os produtos deste grupo).

Ilustra-se nas Figuras 20 e 21 uma troca de tanques. Nelas, o produto “A” precisa de um tanque e o produto “B” tem um tanque disponível.

Tabela 5: Conjuntos do modelo de troca de produtos nos tanques

$p \in \text{Produtos}$	p é um produto.
$t \in \text{Tanques}$	t é um tanque.
$d \in \text{Dias}$	d é um dia.
$\{p, d\} \in \text{ProdutoDia}$	um produto p e um dia d relacionados.
$\{t, p, d\} \in \text{TanqueProdutoDia}$	Um tanque t , um produto p , e um dia d relacionados.
$\{t, p\} \in \text{TanqueProdutoAdmissiveis}$	Um tanque t e um produto p relacionados. Este conjunto representa os produtos que podem ser alocados em um tanque.

4.2.2 DESCRIÇÃO DO MODELO PLIM DE TROCA DE PRODUTOS NOS TANQUES

É descrito nesta subseção o modelo PLIM para troca de produtos nos tanques. Inicia-se pelos conjuntos, parâmetros e variáveis, e se segue para a função objetivo e restrições. Os conjuntos são esparsos, isto é, conjuntos que possuem apenas os elementos válidos para a manipulação (BOSCHETTO, 2011). Os dados de entrada do modelo PLIM para troca de produtos nos tanques são:

1. O horizonte de programação;
2. Os tanques;
3. As capacidades dos tanques;
4. O produto inicialmente alocado em cada tanque;
5. O perfil de estoque (inventário) de cada produto;
6. Uma lista de produtos que podem ser alocados em cada tanque;
7. Os pesos para a função objetivo.

4.2.2.1 CONJUNTOS, PARÂMETROS E VARIÁVEIS

São descritos na Tabela 5 os conjuntos utilizados no modelo, na Tabela 6 os parâmetros e na Tabela 7 as variáveis. Nestas tabelas, para as violações e quantias, a unidade utilizada é sempre a de “uma unidade de volume”.

Tabela 6: Parâmetros do modelo de troca de produtos nos tanques

$TanqCap_t$	Capacidade de um tanque t .
$ProdutoInicialTanque_{t,pe}$	Produto pe alocado inicialmente em t .
$PonderacaoViolacao$	Peso para uma violação da capacidade.
$PonderacaoNumeroTrocas$	Peso para o número máximo de trocas.
$PonderacaoRelaxNumTrocas$	Peso para a relaxação do número máximo de trocas.
$PonderacaoRelaxPeriodoTanqProd$	Peso para a relaxação do período mínimo.
NUM_DIAS	Número de dias do horizonte de programação.
$PERIODO_MINIMO$	Número mínimo de dias que um produto fica alocado.
MAX_QUANT_TROCAS	Número máximo de trocas em um tanque.
U	Limite superior.
L	Limite inferior.
ε	Pequeno valor.

4.2.2.2 FUNÇÃO OBJETIVO

Busca-se na função objetivo do modelo de troca de produtos nos tanques, representada na equação (22), minimizar: o volume dos estouros de capacidade, o número de trocas de produtos em cada tanque, a relaxação do número máximo de trocas de produtos em cada tanque (uma troca) e a relaxação do período mínimo que um produto fica alocado em um tanque (15 dias).

Procura-se, portanto, pela solução com o menor somatório de estouro das capacidades, que possua as trocas distribuídas entre os tanques e que, caso seja necessário realizar mais que uma troca em um tanque, que elas estejam distantes por um período de no mínimo 15 dias (que pode ser relaxado).

$$\begin{aligned}
\text{Minimizar } Z = & \sum_{\{p,d\} \in \text{ProdutoDia}} (\text{relaxViolacaoCapacAgregada}_{p,d} \times \text{PonderacaoViolacao}) + \\
& \sum_{\{t\} \in \text{Tanques}} (\text{numeroTrocas}_t \times \text{PonderacaoNumeroTrocas}) + \\
& \sum_{\{t\} \in \text{Tanques}} (\text{relaxNumTrocas}_t \times \text{PonderacaoRelaxNumTrocas}) + \\
& \sum_{\{t,p\} \in \text{TanquesProdutosAdmissiveis}} (\text{relaxPeriodoTanqueProduto}_{t,p} \times \\
& \text{PonderacaoRelaxPeriodoTanqueProduto})
\end{aligned} \tag{22}$$

Tabela 7: Variáveis do modelo de troca de produtos nos tanques

Variável	Descrição	Domínio
$capacAgregada_{p,d}$	Capacidade agregada de um produto p , em um dia d .	$\mathbb{R}+$
$relaxViolacaoCapacAgregada_{p,d}$	Volume de estouro da capacidade agregada do produto p no dia d .	$\mathbb{R}+$
$numeroTrocas_t$	Número de trocas em um tanque t .	$\mathbb{Z}+$
$relaxNumTrocas_t$	Relaxação do número de trocas em um tanque t para quando $numeroTrocas_t$ ultrapassar MAX_QUANT_TROCAS .	$\mathbb{Z}+$
$periodoTanqueProduto_{t,p}$	Período em dias que um produto p fica alocado em um tanque t .	$\mathbb{Z}+$
$relaxPeriodoTanqueProduto_{t,p}$	Relaxação do número de dias que um produto p fica alocado em um tanque t a mais que o $PERIODO_MINIMO$.	$\mathbb{Z}+$
$binTanqueProdutoDia_{t,p,d}$	Se um produto p está alocado no tanque t no dia d .	$\mathbb{R}+$
$binTanqueTroca_{t,p,d}$	Se um produto p passou a ser alocado no tanque t no dia d .	$\{0, 1\}$
$binTanqueTrocaProduto_{t,p}$	Se o produto p foi alocado em algum momento no tanque t .	$\{0, 1\}$

Como os termos da função objetivo são de unidades diferentes (e.g. Número de trocas e violação da capacidade) e conforme recomendações práticas dos especialistas da rede, utilizam-se os parâmetros para que apenas ocorra a troca de um produto em um tanque se a violação for maior que 10.000 unidades de volume multiplicada pela quantidade de dias da violação. Também se prefere desrespeitar em um dia o período mínimo que um produto precisa estar alocado em um tanque se a violação da capacidade for maior que 2.000 unidades de volume neste dia.

4.2.2.3 RESTRIÇÕES

Utiliza-se a equação (23), que diz que o somatório dos produtos alocados em um tanque em um dia deve ser igual a 1, para garantir que em cada dia um tanque possua apenas um produto alocado.

$$\sum_{\{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia}} \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d} = 1 \quad (23)$$

$$\forall \{t\} \in \text{Tanques}, \{d\} \in \text{Dias}$$

Como sempre deve existir um produto alocado em um tanque, o somatório dos produtos alocados em um tanque em todos os dias deve ser igual ao número de dias do horizonte de programação:

$$\sum_{\{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia}} \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d} = \text{NUM_DIAS} \quad (24)$$

$$\forall \{t\} \in \text{Tanques}$$

Deve-se somar a capacidade dos tanques alocados a um produto em um dia para obter a capacidade agregada deste produto neste dia, como se define na equação (25):

$$\text{capacAgregada}_{p,d} = \sum_{\{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia}, \{t\} \in \text{Tanques}} (\text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d} \times \text{TanqCap}_t) \quad (25)$$

$$\forall \{p,d\} \in \text{ProdutoDia}$$

Define-se que o volume de inventário de um produto em um dia deve ser menor que a capacidade agregada deste produto neste dia, mais a relaxação desta capacidade, para cálculo das violações da capacidade:

$$\begin{aligned} \text{Volume}_{p,d} &\leq \text{capacAgregada}_{p,d} + \text{relaxViolaCapacidade}_{p,d} \\ &\forall \{p,d\} \in \text{ProdutoDia} \end{aligned} \quad (26)$$

A variável binária $\text{binTanqueTrocaProduto}_{t,p,d}$ deve ter valor 1 se houve troca do tanque t , no produto p , no dia d . Utiliza-se a seguinte formulação *Big-M* para obtenção deste resultado (WILLIAMS, 1999):

$$\begin{aligned} \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d} - \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d-1} &\geq \\ &U \times \text{binTanqueTrocaProduto}_{t,p,d} \\ &\forall \{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia} \mid d > 0 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d} - \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d-1} &\geq \\ &L \times \text{binTanqueTrocaProduto}_{t,p,d} \\ &\forall \{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia} \mid d > 0 \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d} - \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d-1} &\geq \\ &(U + \varepsilon) \times (1 - \text{binTanqueTrocaProduto}1_{t,p,d}) - \varepsilon \\ &\forall \{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia} \mid d > 0 \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d} - \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d-1} &\geq \\ &(L - \varepsilon) \times (1 - \text{binTanqueTrocaProduto}2_{t,p,d}) + \varepsilon \\ &\forall \{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia} \mid d > 0 \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \text{binTanqueTrocaProduto}_{t,p,d} &= \\ \text{binTanqueTrocaProduto}1_{t,p,d} + \text{binTanqueTrocaProduto}2_{t,p,d} & \\ &\forall \{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia} \mid d > 0 \end{aligned} \quad (31)$$

Soma-se a binária restringida no grupo de restrições anterior para determinação do número de trocas em um tanque:

$$\begin{aligned} \sum_{\{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia}} \text{binTanqueTroca}_{t,p,d} &= \text{numeroTrocas}_t \\ &\forall \{t\} \in \text{Tanques} \end{aligned} \quad (32)$$

Com o número de trocas calculado na última restrição, é possível limitar o número de

trocas, e relaxar esta limitação:

$$\begin{aligned} \text{numeroTrocas}_t &\leq \text{MAX_QUANT_TROCAS} + \text{relaxNumTrocas}_t \\ &\forall \{t\} \in \text{Tanques} \end{aligned} \quad (33)$$

Define-se que a binária $\text{binTanqueProdutoDia}_{t,d,p}$ é 1 se o tanque t alocou com o produto p , em qualquer dia do horizonte, com as restrições *Big-M* descritas a seguir:

$$\begin{aligned} \sum_{\{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia}} \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d} - 1 &\geq L \times (1 - \text{binTanqueProduto}_{t,p}) \\ &\forall \{t, p\} \in \text{TanqueProdutosAdmissiveis} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \sum_{\{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia}} \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d} - 1 &\leq (U + \varepsilon) \times \text{binTanqueProduto}_{t,p} - \varepsilon \\ &\forall \{t, p\} \in \text{TanqueProdutosAdmissiveis} \end{aligned} \quad (35)$$

Com as restrições (36) e (37) se define que o período que um produto fica em um tanque é o somatório de dias que ele está alocado a este tanque e que este período deve ser maior ou igual ao período mínimo (15 dias), mais uma relaxação:

$$\begin{aligned} \sum_{\{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia}} \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d} &= \text{periodoTanqueProduto}_{t,p} \\ &\forall \{t, p\} \in \text{TanqueProdutosAdmissiveis} \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \text{periodoTanqueProduto}_{t,p} + \text{relaxPeriodoTanqueProduto}_{t,p} &\geq \\ &\text{PERIODO_MINIMO} \times \text{binTanqueProduto}_{t,p} \\ &\forall \{t, p\} \in \text{TanqueProdutosAdmissiveis}, \forall \{t, pe\} \in \text{ProdutoInicialTanque} : p \neq pe \end{aligned} \quad (37)$$

Descreve-se no próximo capítulo os experimentos e seus resultados, realizados com cada um dos módulos descritos nesta dissertação e com a integração de todos os módulos.

5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

São descritos neste capítulo os experimentos e seus resultados, realizados com cada um dos módulos da abordagem apresentada nesta dissertação e também com a integração de todos eles. Foram utilizados 5 cenários reais, relativos a certos meses dos anos de 2010 à 2012, nominados de cenário 1 a cenário 5.

Os experimentos foram realizados no “IBM ILOG CPLEX Optimization Studio v12.5”, em um computador pessoal com um processador “Intel Core i7-870 (2.93GHz)” e 8GB RAM. Todos os modelos foram executados até que se encontrasse uma solução ótima (com *gap* de integralidade em 0%). A linguagem de programação “Java Standard Edition 6” foi utilizada para as heurísticas.

Os dados de entrada dos módulos (que são em sua maioria conjuntos esparsos) foram gerados através de algoritmos externos aos módulos e, como esta geração não faz parte do processo de resolução, estes tempos foram desconsiderados na análise individual de cada módulo, mas considerados na análise da abordagem como um todo.

Descreve-se a seguir a estrutura de um cenário, os resultados obtidos com a abordagem integrada para o cenário 5 e algumas características das soluções obtidas para os outros cenários, com o objetivo de ambientar o leitor em relação aos experimentos. Após, os experimentos e uma análise com cada módulo e depois com a abordagem integrada.

5.1 ESTRUTURA DE UM CENÁRIO

Descreve-se nesta seção a estrutura de um cenário. Utiliza-se “u.v” para unidades de volume e “u.t” para unidades de tempo. Um cenário é composto por:

- Nós;
- Dutos;
- Tanques;

- Produtos (geralmente 15 produtos);
- Grupos de produtos;
- Rotas existentes;
- Faixas desejadas de inventário;
- Configurações de possíveis degradações;
- Configurações de possíveis misturas (geralmente se mistura 67% de um óleo combustível com 33% de um diluente para obtenção de um óleo combustível para exportação);
- Total demandando de cada produto em cada nó;
- Total produzido de cada produto em cada nó;
- Estoque inicial de cada produto em cada nó;
- Movimentos em duto no início do cenário;
- Movimentos programados no início do cenário;
- Programação de manutenções de dutos;
- Programação de manutenções de tanques;
- Volumes tipicamente movimentados em cada rota (geralmente entre 6.000u.v e 40.000u.v);
- Lista que relaciona em quais órgãos pode ocorrer pulmão, e de quais produtos;
- Tempo de residência máxima para cada produto (geralmente entre 80u.t e 160u.t);
- Lista de produtos que podem ser armazenados em cada tanque ;
- Limitações de vazão de bombeio (geralmente entre 175u.v/u.t e 1250u.v/u.t).

5.2 EXEMPLO DE SOLUÇÃO

Descreve-se nesta seção a resposta gerada para o cenário 5, com o objetivo de ambientar o leitor em relação aos experimentos, também são descritas algumas características da resposta gerada para os outros cenários. Explora-se o cenário 5 por ser o mais atual dentre os disponíveis e também por apresentar características comuns de operação da rede, como a necessidade de operações de misturas e degradações.

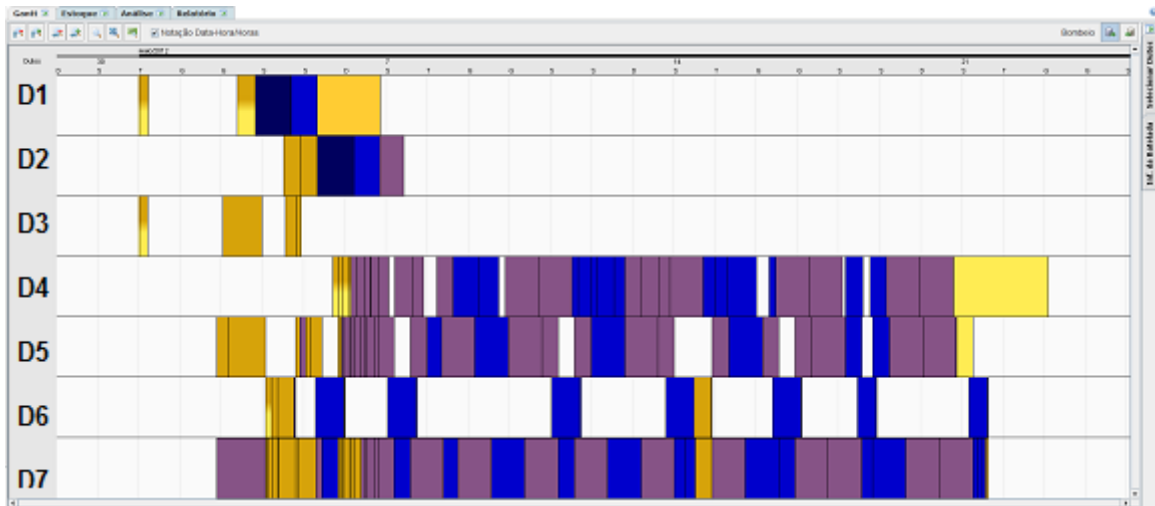


Figura 22: Gantt de bombeio para a solução do cenário 5. O eixo vertical dispõe os diferentes dutos da malha e o eixo horizontal, o tempo.

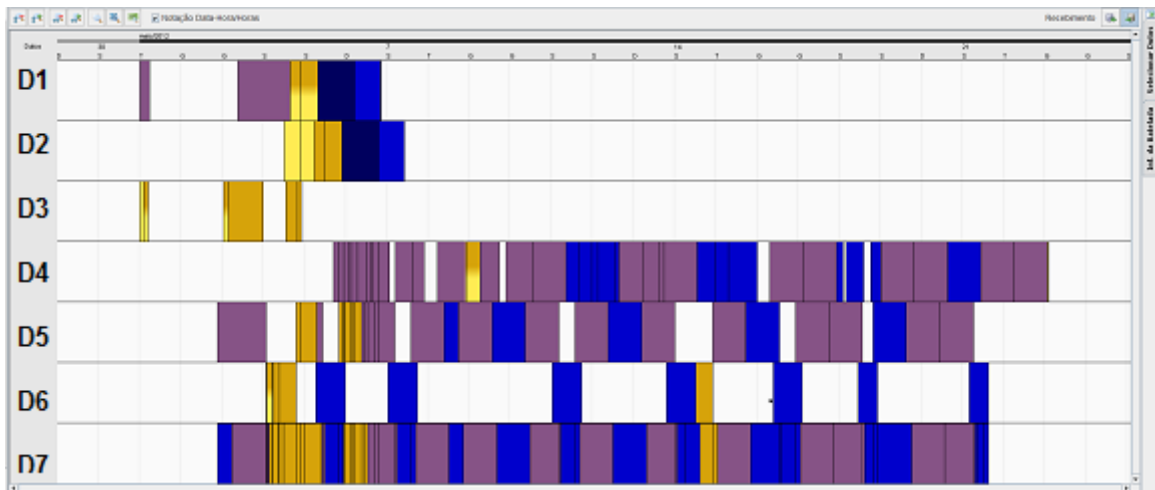


Figura 23: Gantt de recebimento para a solução do cenário 5. O eixo vertical dispõe os diferentes dutos da malha e o eixo horizontal, o tempo.

As Figuras 22 e 23 ilustram gráficos de Gantt para as operações de bombeio e recebimento. O eixo vertical dispõe os diferentes dutos da malha e o eixo horizontal, o tempo (no caso, até 720h). Cada cor representa um derivado (produto) e as linhas verticais entre os derivados separam as diferentes partes de um movimento.

No gráfico de Gantt, o tamanho de cada parte é proporcional ao volume desta parte pela vazão com a qual ela é bombeada, portanto, se uma parte de $10.000m^3$ é bombeada a $1.000m^3/h$, ela ocupará 10h no diagrama, por outro lado, se uma parte de $5.000m^3$ é bombeada a $500m^3/h$, ela também ocupará 10h no diagrama.

Percebe-se que as movimentações na rede são em sua maioria de 2 produtos, além disso existem operações de misturas, como exemplifica-se na Figura 24, onde os destaques

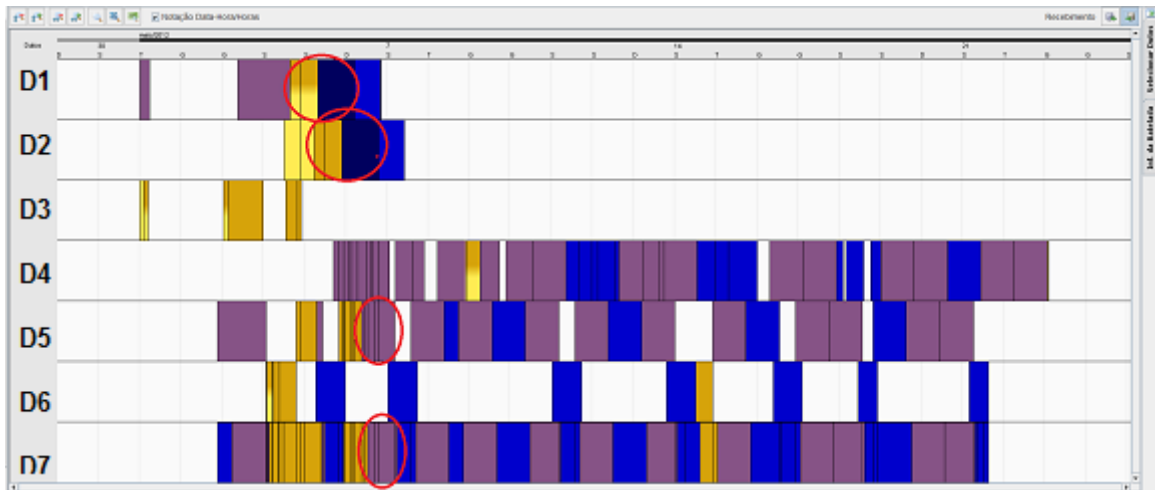


Figura 24: Gantt para a solução do cenário 5 com destaque para operações de mistura. Os destaques mais acima da Figura são para os produtos geradores e os destaques mais abaixo para o produto final. Os movimentos são de tamanhos diferentes devido às diferenças de vazão, isto é, os movimentos geradores são bombeados a uma vazão mais baixa que os movimentos finais e, portanto, parecem demorar mais para passar pelo duto.

(círculos vermelhos) mais acima da figura são para os produtos geradores e os destaques mais abaixo para o produto final.

Os movimentos são de tamanhos diferentes devido às diferenças de vazão, isto é, os movimentos geradores são bombeados a uma vazão mais baixa que os movimentos finais. Portanto, no gráfico de Gantt parecem demorar mais para passar pelo duto.

Percebe-se a baixa utilização dos dutos D1, D2 e D3. Com esta análise é possível tomar decisões estratégicas, como o aumento da demanda e/ou a utilização destes dutos para outros fins. Nota-se a existência de uma operação de degradação no duto D1, ilustrada na Figura 25 pelo movimento em destaque.

Ilustra-se na Figura 26 o inventário de um produto e se nota a busca em mantê-lo dentro dos metas (mais ao centro horizontal da imagem), bem como a impossibilidade de obtenção deste objetivo no final do horizonte. Esta situação acontece pois não existem dados de demanda mais tardios que o final do horizonte, e então a produção fica sem destino.

Apesar de existir um tratamento para empurrar os últimos movimentos programados, este ainda não é suficiente para escoar a produção restante. Também, este problema no final do horizonte não é grave, pois possibilita antecipar situações problemáticas e a consequente adoção de estratégias que as contornem. Além disso, a não ser que existam dados infinitos, em algum ponto não existirá demanda futura.

Uma estratégia de contorno para este problema é projetar os perfis de produção e de-

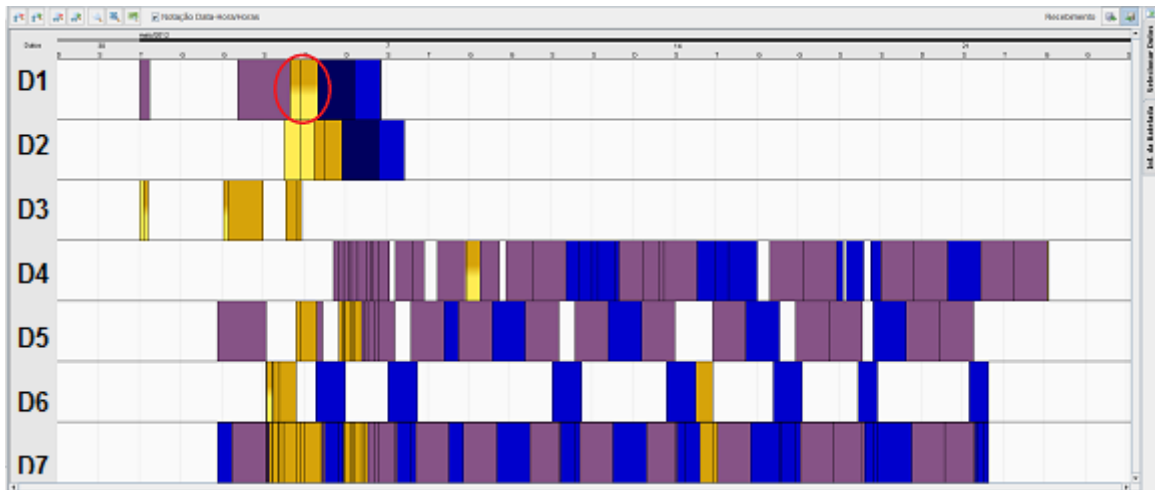


Figura 25: Gantt para a solução do cenário 5 com destaque para uma operação de degradação no duto D1.

manda e realizar a programação apenas para o cenário original pois, assumindo que a operação da rede não mude muito no próximo mês, as movimentações no final do horizonte seriam razoáveis. No entanto, como é interessante a visualização antecipada de situações problemáticas, optou-se pela não adoção desta abordagem.

Devido à inconsistências nos dados do cenário acontecem situações impossíveis de serem contornadas, como a representada na Figura 27, onde um dos produtos dentre os dois mais movimentados no terminal marítimo possui demanda mas não possui inventário no início do horizonte, tornando difícil a manutenção do inventário nos limites metas. No entanto, a abordagem ainda assim decide por enviar o produto.

Também no terminal marítimo, acontece outra circunstância indesejada, onde um produto possui demanda mas não possui tanques para armazená-la (ver Figura 28). Esta situação é bastante prejudicial para a obtenção de uma solução, pois este é um produto que sempre estará crítico (ver seção 3.2). Estas situações, se corrigidas, podem levar a melhoras no *scheduling*, como representado nas Figuras 29 e 30, onde foi inserido um tanque para o caso da Figura 28.

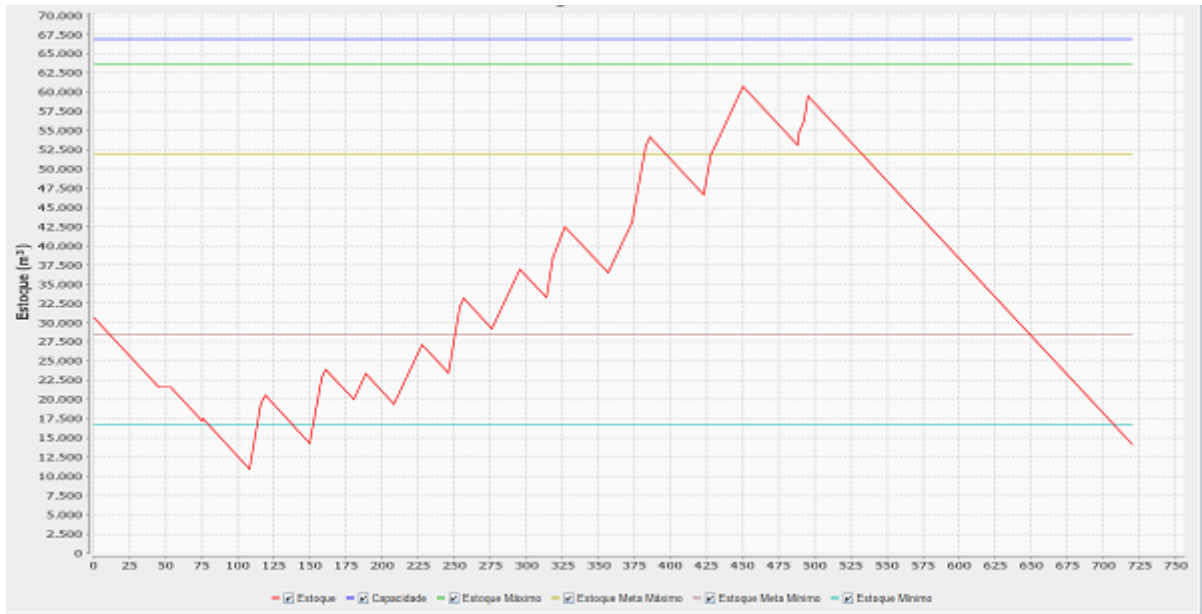


Figura 26: Inventário de um produto na solução do cenário 5. Nota-se a busca em mantê-lo dentro das metas (mais ao centro horizontal da imagem), bem como a impossibilidade de obtenção deste objetivo no final do horizonte. Esta situação acontece pois não existem dados de demanda mais tardios que o final do horizonte, e então a produção fica sem destino.

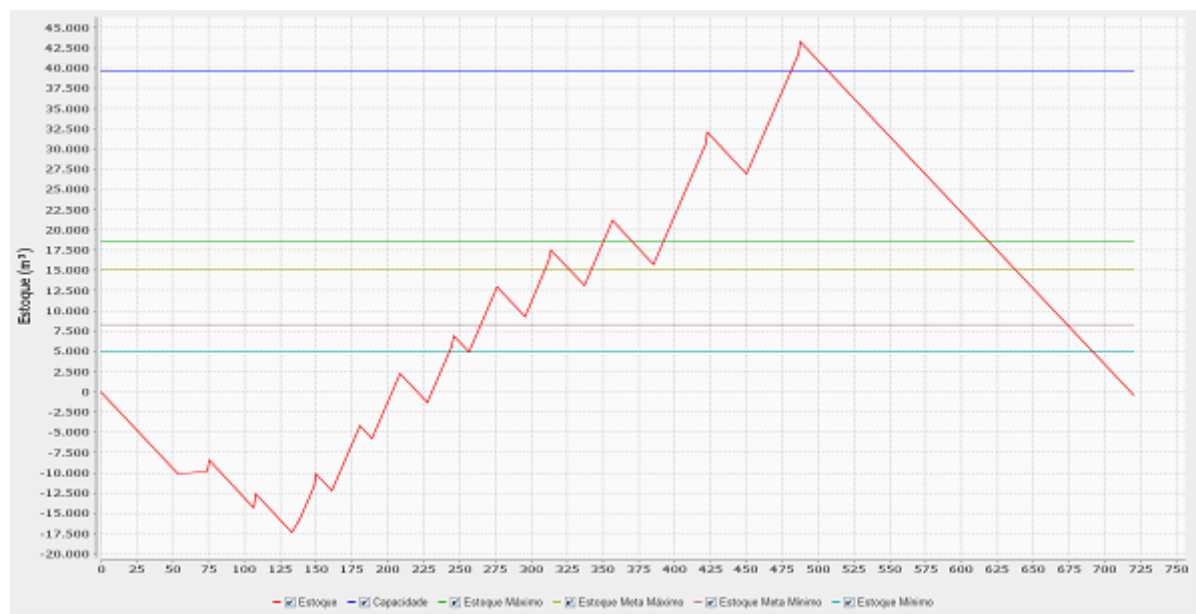


Figura 27: Inventário de um produto para a solução do cenário 5. O nó possui demanda deste produto mas não possui inventário no início do horizonte, dificultando a manutenção do inventário nos limites metas.

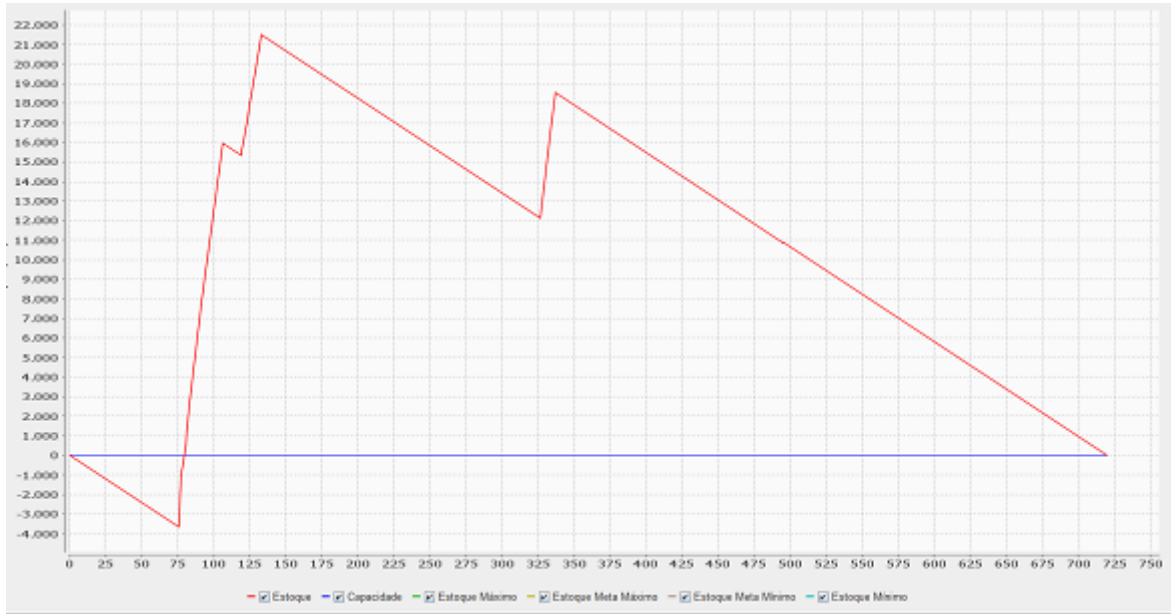


Figura 28: Exemplo de inconsistência nos dados do cenário 5, onde um produto possui demanda mas não possui tanques para armazená-la. A abordagem decide por receber o produto e este erro não faz a solução divergir.

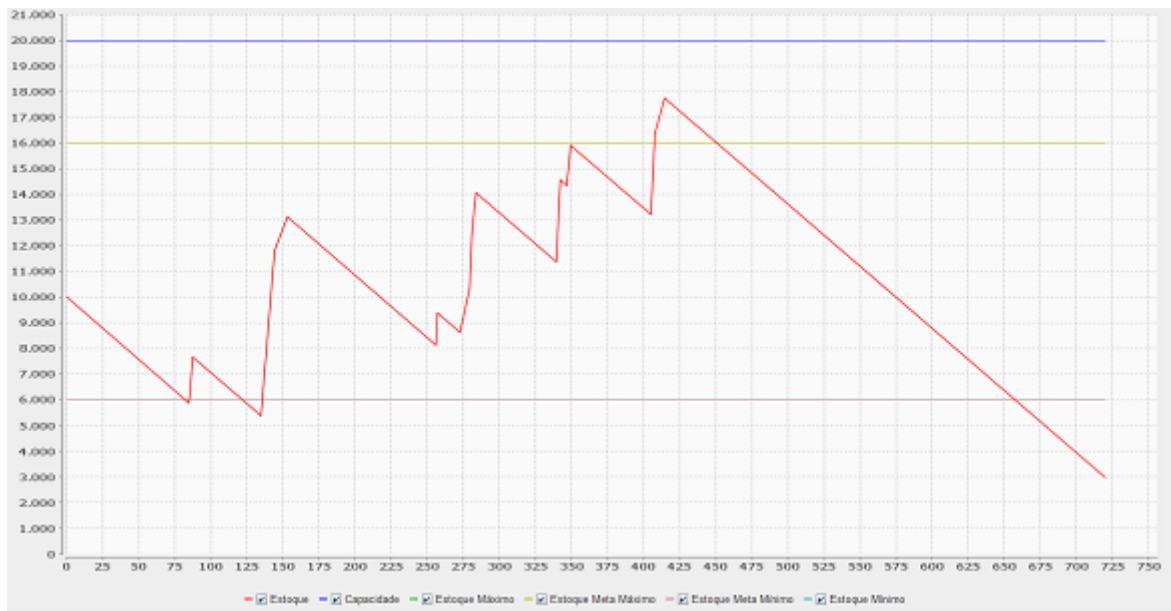


Figura 29: Inventário com a correção da inconsistência nos dados do cenário 5, onde o produto possui demanda mas não possui tanques para armazená-la. Inseriu-se um tanque para este produto. A linha azul representa a capacidade do produto e a linha vermelha o seu inventário.

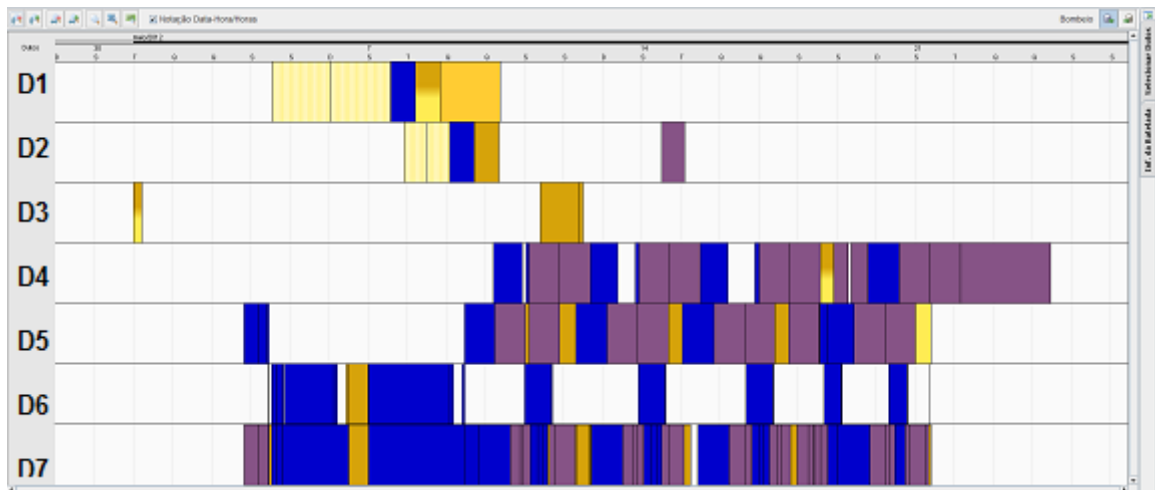


Figura 30: Gantt para correção da inconsistência nos dados do cenário 5. O produto possui demanda mas não possui tanques para armazená-la. Inseriu-se um tanque para este produto.

5.2.1 MISTURAS E MOVIMENTOS DO FINAL DO HORIZONTE DE PROGRAMAÇÃO

Ilustra-se na Figura 31 o gráfico de Gantt para o cenário 1, onde ocorrem misturas durante todo o cenário (praticamente toda a demanda de um dos produtos é atendida por misturas). Também no cenário 1, na Figura 32 se ilustra a inserção de movimentos de produtos diluentes (que podem permanecer nos dutos) para que estes empurrem os últimos movimentos programados, com exceção do duto D4, onde foi inserido o produto mais movimentado no cenário.

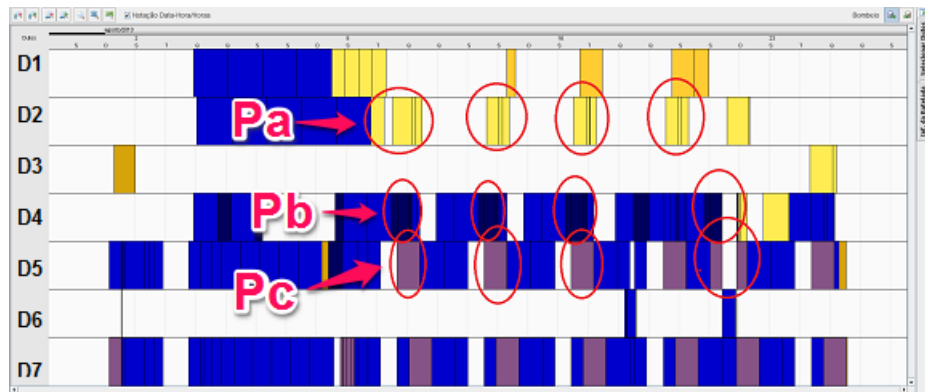


Figura 31: Gantt para a solução do cenário 1 com destaques para as misturas. Praticamente toda a demanda de um produto é atendida por misturas. Os destaques no duto D1 são do produto “Pa”, no duto D4 do produto “Pb” e no duto D5 do produto final “Pc”.

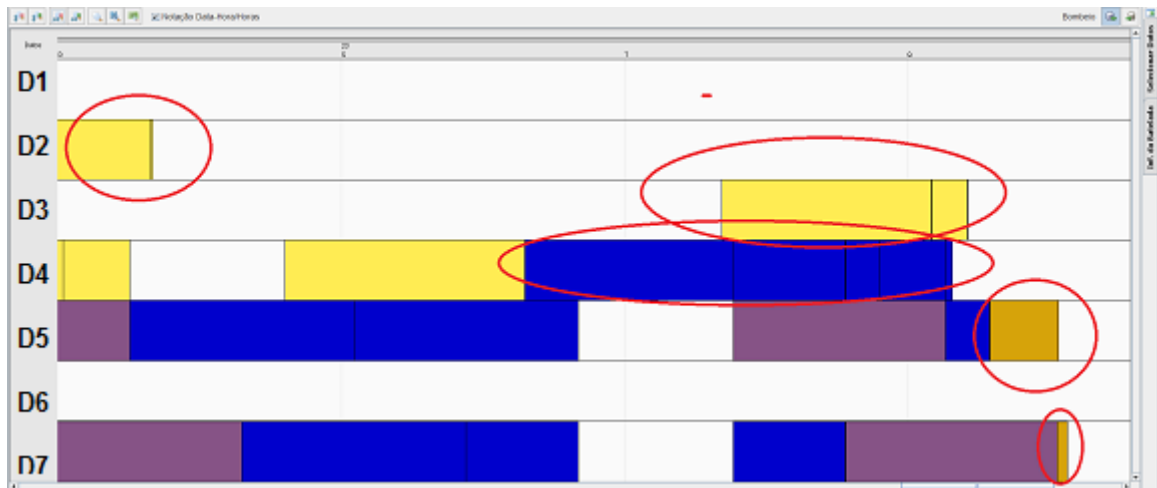


Figura 32: Gantt para a solução do cenário 1, com destaques para ilustrar movimentos inseridos para empurrarem os últimos movimentos programados. Estes movimentos são de produtos diluentes, que podem ficar parados nos dutos, com exceção do duto D4, onde foi inserido o produto mais movimentado no cenário.

5.2.2 TROCA DE PRODUTOS NOS TANQUES

Ilustra-se nas Figuras 33 e 34 a ocorrência de uma troca de produto em um tanque. Esta troca ocorreu no cenário 1.

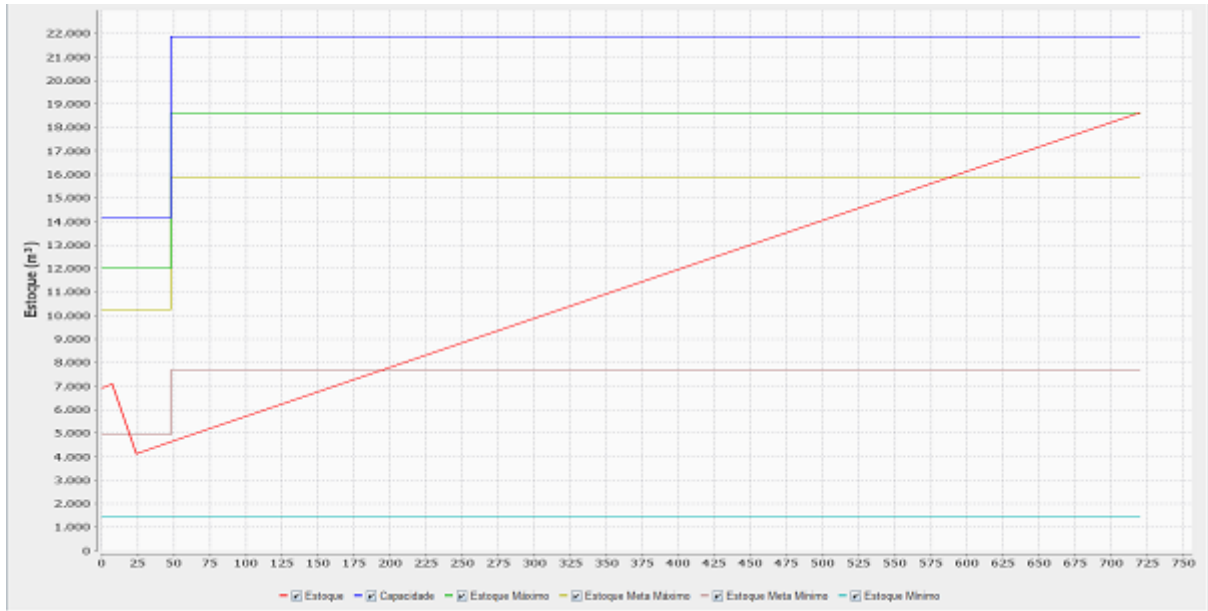


Figura 33: Inventário de um produto para a solução do cenário 1 onde este produto recebe um tanque no módulo de troca de produtos nos tanques. A linha azul representa a capacidade do produto e a linha vermelha o seu inventário.

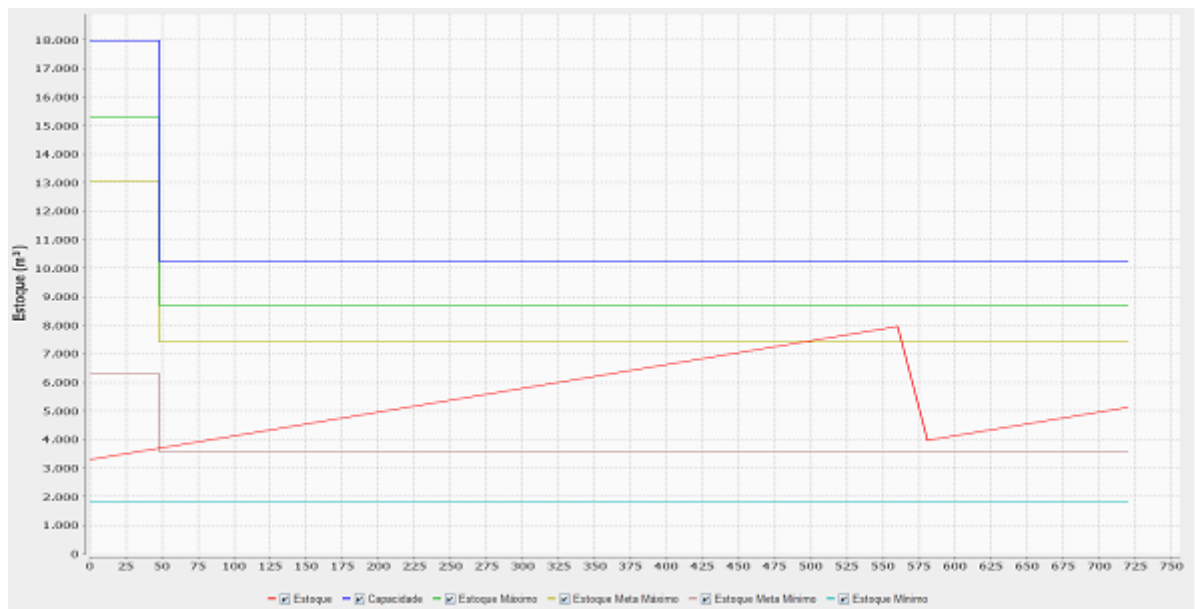


Figura 34: Inventário de um produto para a solução do cenário 1 onde este produto doa um tanque no módulo de troca de produtos nos tanques. A linha azul representa a capacidade do produto e a linha vermelha o seu inventário.

5.2.3 GRUPOS DE PRODUTOS COM ESTOQUE UNIFICADO

O estoque unificado foi descrito pelos especialistas da rede, mas esta situação não existe nos cenários disponíveis para realização dos experimentos. Portanto, para experimentação, modificou-se o cenário 4 com a inserção de 10.000u.v no nó N6 de um produto do mesmo subgrupo que um dos produtos movimentados e a indicação de que este subgrupo deve ter o inventário unificado.

Ilustra-se esta mudança nas Figuras 35 e 36. Ilustra-se na Figura 35 o Gantt para a solução do cenário original e na Figura 36 o Gantt para a solução do cenário modificado. Na Figura 36 existe um destaque para o produto inserido para atender a demanda do produto do mesmo grupo. Nota-se que a abordagem decidiu por enviar o produto no duto D7 antes de recebê-lo, gerando uma falta de produto no nó destino do duto D6.

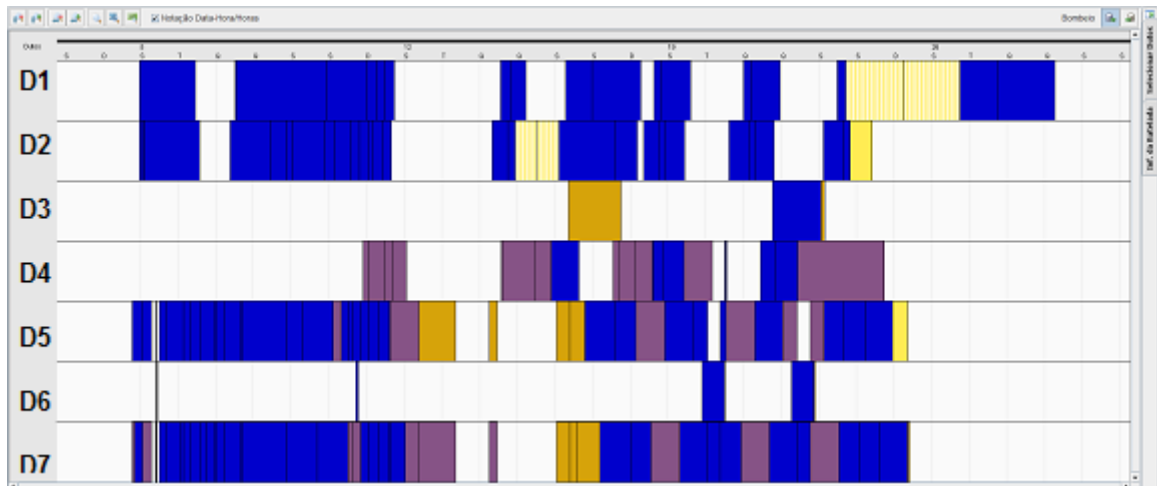


Figura 35: Gantt para a solução do cenário 4 original.

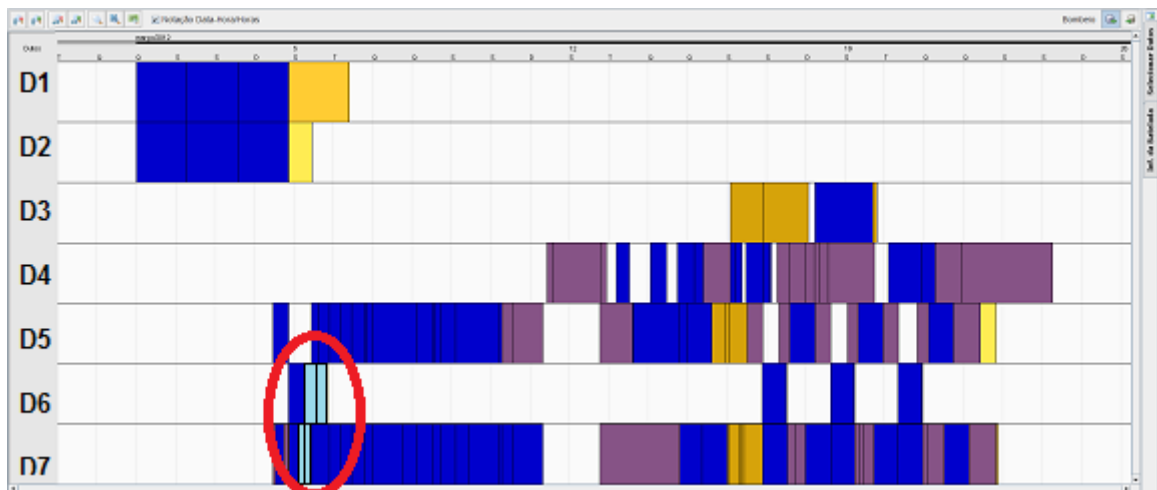


Figura 36: Gantt para a modificação do cenário 4. Realizou-se a inserção de 10.000u.v no nó N6 de um produto do mesmo subgrupo de um produto movimentado e a indicação de que este subgrupo deve ter o inventário unificado. O destaque é para o produto inserido para atendimento da demanda do produto do mesmo grupo.

5.2.4 CENÁRIO COM GRANDE VOLUME DE MOVIMENTAÇÃO

Ilustra-se na Figura 37 o gráfico de Gantt para a solução do cenário 2, um cenário onde ocorre um grande volume de movimentações.

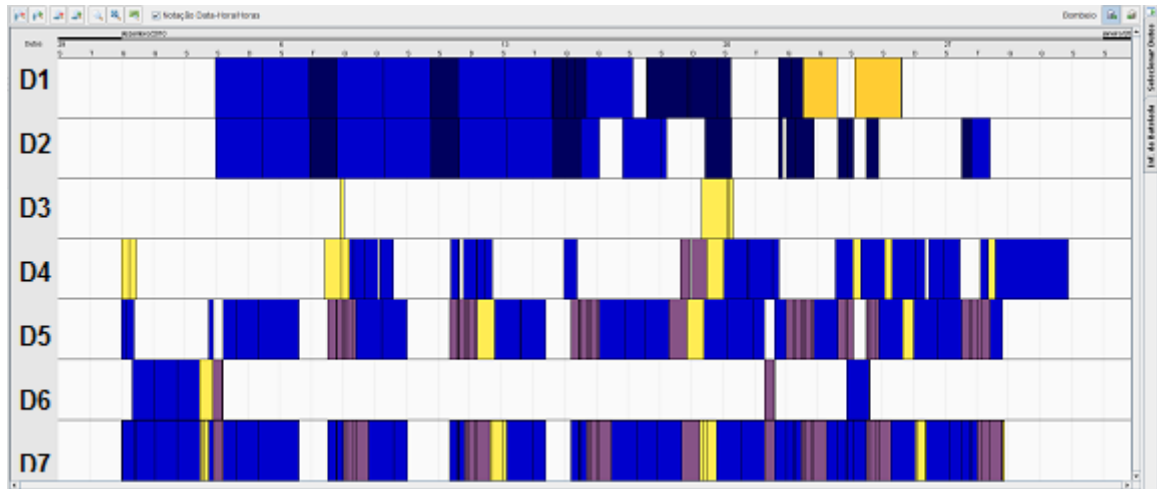


Figura 37: Gantt para a solução do cenário 2. Um cenário com grande volume de movimentações.

5.2.5 PROBLEMAS NOS DADOS DE ENTRADA

Por último, ilustra-se nas Figuras 38 e 39 uma situação problemática no cenário 3, onde o terminal marítimo não possui tanque para receber um produto demandado, gerando um atraso no início do cenário. Resolve-se o problema com a inserção de um tanque com um pequeno estoque deste produto e se ilustra esta situação na Figura 40.

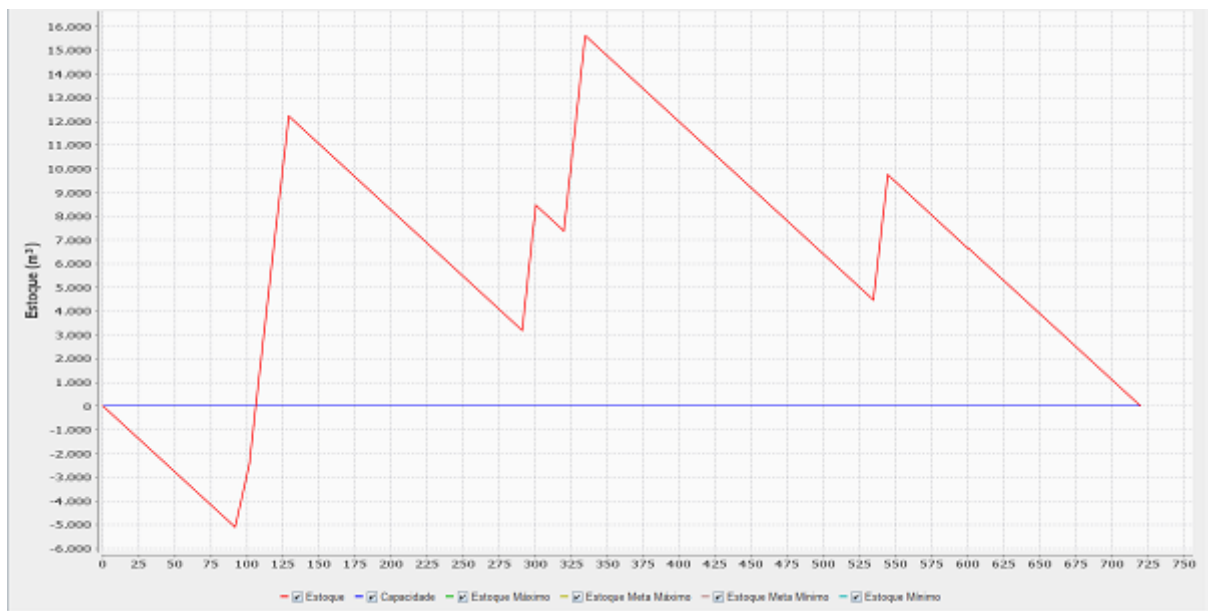


Figura 38: Inventário para o cenário 3 de um produto que o terminal marítimo não possui tanque, mas possui demanda.

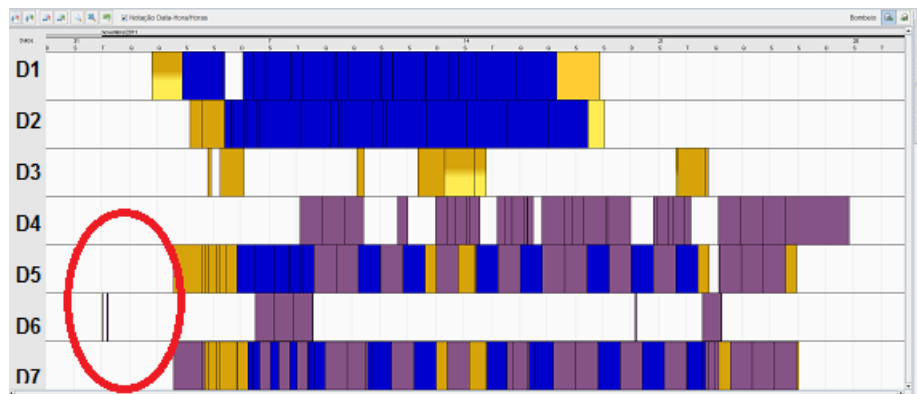


Figura 39: Gantt para o cenário 3, onde o terminal marítimo não possui tanque para receber um produto demandado, o que gera um atraso no início do cenário.

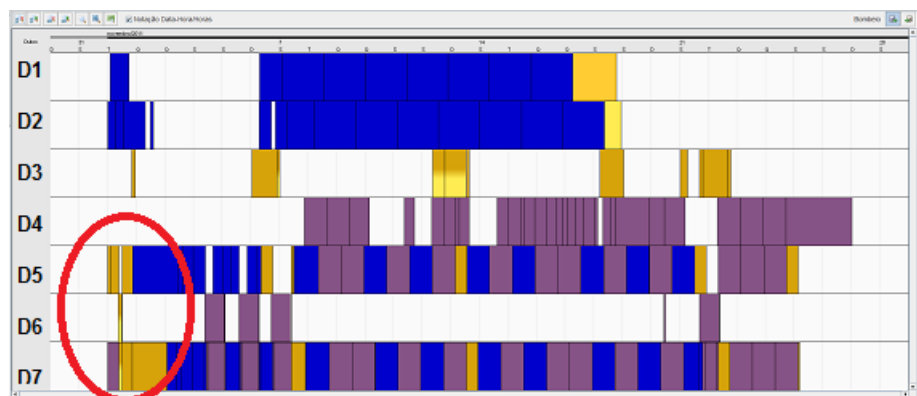


Figura 40: Gantt para o cenário 3, onde foi inserido um tanque no terminal marítimo para receber um produto demandado que não possuía tanques, o que corrige o atraso no início do cenário.

5.3 EXPERIMENTOS COM O MÓDULO DE PLANEJAMENTO E COM O MÓDULO DE ALOCAÇÃO E SEQUENCIAMENTO

Descreve-se nesta seção os resultados obtidos com o modelo de planejamento e o módulo de alocação e sequenciamento em experimentos com todos os cenários disponíveis. Sumariza-se nas Tabelas 8 e 9 os resultados destes experimentos para o primeiro e segundo ciclo da abordagem, respectivamente. Os volumes são indicados em Unidades de Volume (u.v).

O nº de violações, o volume de violações, o nº de faltas, o volume de faltas, o nº de misturas e o volume de misturas são relativos às soluções do modelo de planejamento. Enquanto o volume demandado e o volume produzido são relativos aos dados do cenário.

Uma violação representa uma ocorrência em que o inventário foi maior que a capacidade disponível para um produto em um nó, enquanto o volume é a quantidade desta ocorrência. Portanto, mesmo se o número de violações entre dois cenários for próximo, o volume total pode não ser. Enquanto que uma falta representa o não atendimento de uma demanda.

Tabela 8: Experimentos com o modelo de planejamento

Cenário	1	2	3	4	5
Tempo do Planejamento	0,6s	0,7s	0,7s	0,7s	0,6s
Tempo da Alocação	0,3s	0,4s	0,3s	0,3s	0,4s
nº de Violações	2	1	1	0	3
Volume de Violações (u.v)	31.134	3.116	4.929	0	30.505
nº de Faltas	0	2	2	3	1
Volume de Faltas (u.v)	0	2.233	10.418	9.131	1.935
nº de misturas	2	1	1	0	1
Volume de Misturas (u.v)	107.045	81.814	11.054	0	10.428
Volume Demandado (u.v)	1.720.000	1.828.000	1.840.000	1.046.000	897.000
Volume Produzido (u.v)	1.704.000	1.879.000	1.639.000	1.035.000	930.000

Com a análise dos resultados, percebe-se que o tempo de execução do modelo de Planejamento no segundo ciclo da realimentação é, com exceção do primeiro cenário, sempre menor que o tempo de execução do primeiro ciclo. No entanto os tempos sempre são menores que 1 segundo.

É difícil considerar todas as variáveis que influenciam o tempo computacional. No entanto, se acredita que esta redução do tempo computacional no segundo ciclo em relação ao primeiro aconteça devido às otimizações nas interfaces de chamada do “IBM CPLEX Optimization Studio” através da linguagem de programação “Java Standard Edition 6”. Chega-se a

Tabela 9: Experimentos com o modelo de planejamento na realimentação

Cenário	1	2	3	4	5
Tempo do Planejamento	0,6s	0,2s	0,5s	0,3s	0,3s
Tempo da Alocação	0,4s	0,4s	0,4s	0,3s	0,4s
n ^o de Violações	1	1	1	0	3
Volume de Violações (u.v)	31.134	3.116	4.929	0	30.505
n ^o de Faltas	0	0	0	0	1
Volume de Faltas (u.v)	0	0	0	0	1.935
n ^o de misturas	2	1	1	0	1
Volume de Misturas (u.v)	107.046	62.409	10.000	0	10.428
Volume Demandado (u.v)	1.720.000	1.828.000	1.840.000	1.046.000	897.000
Volume Produzido (u.v)	1.704.000	1.879.000	1.639.000	1.035.000	930.000

esta conclusão pois se executaram os dados de forma individual e não se observaram mudanças significativas no tempo de execução.

O volume de violações da capacidade não diminuiu na realimentação, no entanto os problemas de faltas (inventário negativo) foram resolvidos, com exceção do cenário 5, onde o volume de faltas se manteve.

Os volumes de faltas e violações são sempre menores que 32.000 unidades de volume, enquanto os volumes demandados e produzidos em cada cenário são sempre maiores que 890.000 unidades de volume. Além disso estas faltas e violações não são necessariamente ruins, pois podem auxiliar o processo de tomada de decisões no sentido de se tomarem medidas preventivas.

5.4 EXPERIMENTOS COM O MÓDULO DE TEMPORIZAÇÃO E COM O MÓDULO DE RESTRIÇÕES DE AQUECIMENTO

Descreve-se nesta seção os experimentos realizados com o modelo de temporização e com o algoritmo para tratamento das restrições de aquecimento. Sumariza-se nas Tabelas 10 e 11 os resultados destes experimentos para o primeiro e segundo ciclo da abordagem, respectivamente.

O tempo de execução da temporização (soma do tempo de execução da pré-análise e da temporização) variou pouco entre os dois ciclos da abordagem. Foram inseridos os maiores tempos de cada módulo em cada experimento pois (como se descreve no capítulo 4) eles são executados mais de uma vez em cada abordagem, no entanto, os tempos entre as execuções de

Tabela 10: Experimentos com o modelo de temporização e com o módulo de restrições de aquecimento

Cenário	1	2	3	4	5
Tempo da Temporização	2,7s	3,7s	3,6s	2s	2,8s
n ^o de Movimentos para Aquecimento	2	0	0	2	0
N ^o de Violações de Aquecimento	5	4	9	11	4

Tabela 11: Experimentos com o modelo de temporização e com o módulo de restrições de aquecimento na realimentação

Cenário	1	2	3	4	5
Tempo da Temporização	4,6s	4s	3,5s	2s	3s
n ^o de Movimentos para Aquecimento	1	1	1	2	0
N ^o de Violações de Aquecimento	3	3	9	12	2

um mesmo ciclo variam pouco.

Acontecem diferenças nos tempos de execução, pois, mesmo pequenas mudanças na ordem dos movimentos, que é gerada pelos módulos anteriores, implicam mudanças na temporização. Quanto às restrições de aquecimento, na realimentação foram inseridos mais movimentos para tratá-las e também ocorreram menos violações destas restrições.

5.5 EXPERIMENTOS COM O MÓDULO DE TROCA DE PRODUTOS NOS TANQUES

Descreve-se nesta seção os experimentos realizados com o modelo de troca de produtos nos tanques. Sumariza-se na Tabela 12 os resultados destes experimentos para o primeiro e segundo ciclo da abordagem.

Tabela 12: Experimentos com o modelo de troca de produtos nos tanques

Cenário	Tempo da 1 ^a Execução	Tempo da 2 ^a Execução	Pontos de Troca
1	2,4s	2,2s	4
2	0,5s	0,5s	0
3	0,5s	0,5s	0
4	1,4s	1,6s	0
5	0,5s	0,5s	0

O tempo de execução do módulo de troca de produtos nos tanques variou pouco entre os dois ciclos da abordagem e o resultado não variou. Isto acontece pois a capacidade de

Tabela 13: Experimentos com a integração de todos os módulos

Cenário	1	2	3	4	5
Tempo de Execução	39,6s	38,1s	34,5s	22,6s	27,7s
n ^o de Violações	7	8	10	8	10
Volume de Violações (u.v)	13.701	94.820	55.298	43.677	82.496
n ^o de Faltas	4	4	8	8	11
Volume de Faltas (u.v)	22.242	18.589	15.853	20.227	52.358
Volume Demandado (u.v)	1.720.000	1.828.000	1.840.000	1.046.000	897.000
Volume Produzido (u.v)	1.704.000	1.879.000	1.639.000	1.035.000	930.000

inventário dos produtos é recalculada para a execução da realimentação, isto é, as trocas da primeira execução não são consideradas na segunda.

Ocorreram trocas apenas no primeiro cenário. No entanto, foram inseridos tanques para correção de alguns erros nos cenários. Portanto, caso não tivessem sido inseridos estes tanques, seriam necessárias mais trocas.

5.6 EXPERIMENTOS COM A ABORDAGEM INTEGRADA

Descreve-se nesta seção os experimentos realizados com a integração de todos os módulos. Sumariza-se na Tabela 13 os resultados destes experimentos, onde os volumes são indicados em Unidades de Volume (u.v).

O n^o de violações, o volume de violações, o n^o de faltas e o volume de faltas são relativos às soluções da abordagem. Enquanto o volume demandado e o volume produzido são relativos aos dados do cenário.

Em todos os cenários o tempo de execução foi menor que 40s. Para cálculo deste tempo somou-se também os tempos dos algoritmos utilizados para geração dos dados e transferência de dados entre os módulos (não considerados nos tempos individuais de cada módulo). Também se somaram todas as execuções da temporização e da pré-análise (considerados apenas os maiores tempos para experimentação de cada módulo).

O número e volume de violações e faltas difere do apresentado no módulo de planejamento pois aqui se utiliza o número e volume de violações e faltas obtidos após a execução de toda a abordagem. Apesar de ocorrerem violações e faltas em todos os cenários, a soma do volume de violações e faltas é sempre de menos que 15% que o maior volume entre a produção e a demanda no cenário e, se desconsiderado o último cenário, sempre menor que 6,2%.

As violações podem ocorrer por problemas nos dados do cenário ou por falhas na solução, como as escolhas de rota e ordem dos movimentos. A seguir lista-se os motivos das falhas em cada cenário:

1. Cenário 1 - Escolhas falhas de rotas na solução;
2. Cenário 2 - Escolhas falhas de rotas na solução;
3. Cenário 3 - Escolhas falhas de rotas na solução e problemas nos dados do cenário (produções sem tancagem depois do início do cenário);
4. Cenário 4 - Escolhas falhas de rotas na solução e de ordem dos movimentos;
5. Cenário 5 - Escolhas falhas de rotas na solução e problemas nos dados do cenário (demandas sem tancagem e demandas sem produção).

Descreve-se no próximo capítulo as conclusões obtidas com o desenvolvimento da presente dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

6 CONCLUSÃO

A indústria petrolífera brasileira encontra-se em expansão e com a necessidade de otimização da utilização dos recursos disponíveis (POLLI, 2014). Com relação ao transporte dos derivados de petróleo, o modal dutoviário apresenta custo operacional relativamente baixo e é ambientalmente seguro (KENNEDY, 1993).

A utilização do modal dutoviário apresenta dificuldades no sentido de expansão, devido a restrições políticas e ambientais, o que gera importância econômica e socioambiental para a otimização do uso da malha disponível. No entanto, a atividade de *scheduling* do transporte de derivados em redes dutoviárias é comumente realizada por especialistas, sem o auxílio de uma abordagem computacional consolidada, pois é ainda inexistente (BOSCHETTO, 2011).

O problema de otimização do *scheduling* do transporte de derivados de petróleo em malhas dutoviárias é um problema complexo, combinatório de larga escala e que possui um alto custo computacional (MÉNDEZ et al., 2006).

Descreve-se em trabalhos recentes uma estratégia de decomposição para este problema onde obteve-se sucesso, como em Neves-Jr et al. (2007), Felizari (2009), Boschetto (2011), Polli (2014) e Fabro et al. (2014), o que justifica a exploração desta abordagem com o objetivo de se considerar outras restrições operacionais.

Com relação a abordagem de decomposição, um problema de *scheduling* pode ser dividido em três componentes principais (alocação das tarefas aos recursos, sequenciamento das tarefas e temporização das tarefas nos recursos) (REKLAITIS, 1996). Tendo em vista estes componentes e as restrições operacionais dos derivados escuros na malha aqui tratada, a abordagem de decomposição proposta é a seguinte:

1. Planejamento: É o primeiro módulo da estrutura e onde se objetiva definir o quanto será bombeado de um nó a outro, assim como a natureza destes bombeios (se são de mistura ou degradação). Este módulo é um modelo PLIM;
2. Alocação e Sequenciamento: É o módulo onde objetiva-se dividir os volumes planejados

em volumes menores e definir uma ordem na qual eles serão bombeados. Neste módulo utilizam-se heurísticas;

3. Temporização: Um modelo PLIM onde objetiva-se definir os tempos de início e fim de cada atividade;
4. Restrições de Aquecimento: Heurísticas aplicadas na solução depois da primeira execução da Temporização e antes da segunda execução da Temporização para tratamento das restrições de aquecimento;
5. Alocação de produtos em Tanques: Um modelo PLIM onde objetiva-se a realização de trocas de produtos nos tanques para viabilizar a programação proposta até o momento de sua execução.

Com esta abordagem é possível encontrar em um tempo computacional aceitável soluções para o problema de *scheduling* do transporte dutoviário dos derivados escuros de petróleo na malha aqui estudada. Este trabalho parte da abordagem apresentada em Fabro et al. (2014) e também faz:

1. A consideração do estoque unificado (somatório dos estoques individuais) para os produtos pertencentes a determinados grupos sem, no entanto, deixar de diferenciar os movimentos individuais dos diferentes produtos destes grupos;
2. Na função objetivo do modelo de planejamento, a consideração de apenas o balanço de inventário;
3. No modelo de planejamento, a consideração da existência de períodos devido às trocas de produtos nos tanques, manutenções de tanques, manutenções de dutos e períodos em que os dutos ficam parados sem operação;
4. No módulo de alocação, o cálculo dos tempos dos movimentos de mistura tendo em vista heurísticas para os tempos possíveis de serem atendidos;
5. No módulo de alocação, a escolha dos movimentos de fim de cenário tendo em vista as restrições de aquecimento dos derivados escuros;
6. No modelo de troca de produtos nos tanques, a consideração de uma lista de produtos que podem ser alocados em cada tanque.

6.1 RESULTADOS

Realizaram-se experimentos com 5 cenários reais e se obtiveram soluções em menos de 1 minuto. Verificou-se que problemas nos dados de cenários reais são comuns, pois estes são gerados automaticamente a partir de informações mantidas em bancos de dados, que nem sempre estão atualizados.

Portanto, a obtenção de uma solução para um cenário com erros é interessante na medida em que eles não façam a solução divergir, que a solução possa auxiliar a tomada de decisões e que a solução possibilite a correção e antecipação de outros erros.

O tempo computacional relativamente baixo é interessante para uma abordagem de auxílio à tomada de decisões pois permite que sejam executadas várias variações de um cenário em um tempo operacional viável, com o objetivo de analisar os resultados de diferentes possibilidades deste cenário.

Apesar de ocorrerem violações e faltas em todos os cenários analisados, a soma do volume de violações e faltas é sempre de menos que 15% que o maior volume entre a produção e a demanda no cenário e, se desconsiderado o último cenário, sempre menor que 6,2%.

Além disso, as soluções geradas também possibilitam a identificação de limitações da rede e a análise de possíveis mudanças em seu modelo de operação.

Também, como o tempo computacional para obtenção de soluções é relativamente baixo, parece viável tornar a abordagem mais robusta, como considerando novas restrições e outras possibilidades de operação da malha.

O tempo computacional foi menor que o relatado em Fabro et al. (2014). Também Fabro et al. (2014) realizam 2 ciclos de realimentação e aqui se realiza apenas 1. No entanto, mesmo se desconsiderado o tempo do segundo ciclo de realimentação de Fabro et al. (2014), o tempo computacional ainda é mais baixo (de 2 minutos para 1 minuto), sendo também difícil comparar os resultados pois aqui se consideram outras características desta malha.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros:

- Evoluir o módulo de alocação e sequenciamento para uma abordagem exata;
- Evoluir o módulo de alocação e sequenciamento com relação ao cálculo das janelas;

- Evoluir o tratamento das paradas e das restrições de aquecimento para uma abordagem exata;
- Evoluir o tratamento das paradas e das restrições de aquecimento para realização automática do cálculo do número de movimentos de parada ideal para cada duto;
- Evoluir o tratamento das paradas e das restrições de aquecimento para inserção de movimentos de recondicionamento dos dutos;
- Evoluir o módulo de troca de produtos nos tanques para consideração de períodos em que os tanques se encontram em manutenção;
- Evoluir a abordagem para criação de movimentos de reversão;
- Evoluir a abordagem para consideração dos períodos de trocas de turno e horossazonalidade;
- Evoluir a abordagem para criação de movimentos de mistura com o objetivo de aumento de vazão, e não apenas para obtenção de um terceiro produto.

Os resultados alcançados com a abordagem aqui descrita são promissores, mas existem possibilidades de melhoria, como verificado com os experimentos. Devido a isso, à constante mudança no perfil de operação da rede e a possibilidade de se considerarem outras restrições, existe a motivação para continuação do estudo deste problema e desta abordagem.

REFERÊNCIAS

- ALVES, V. R. F. M. **Programação de Transferência de Derivados de Petróleo em Rede Dutoviária Usando Algoritmo Genético**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- ARRUDA, L. V. R.; NEVES-JR, F.; YAMAMOTO, L. Using MOGA to Order Batches in a Real World Pipeline Network. In: **23rd International Conference on Industrial Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems**. Cordoba-Spain: [s.n.], 2010. p. 546–555.
- BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa Operacional para Cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: LCT, 2013.
- BOSCHETTO, S. N. **Otimização das Operações de Transferência e Estocagem em Rede de Dutos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Automação e Sistemas) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.
- BOSCHETTO, S. N.; MAGATÃO, L.; BRONDANI, W. M.; RELVAS, S.; NEVES-JR, F.; ARRUDA, L. V. R.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D. An Operational Scheduling Model to Product Distribution through a Pipeline Network. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, p. 5661–5682, 2010.
- BRANCONI, V. M. **Heurísticas Multifluxo para Roteamento de Produtos em Redes Dutoviárias**. 78 p. Dissertação (Mestrado em Informática) — PUC-RIO, 2002.
- BUENO, L.; MEIRA, W. H. T.; NEVES-JR, F.; MAGATÃO, L.; ARRUDA, L. V. R.; RIBAS, P. C. A MILP planning model to the scheduling activities of heavy oil derivatives in a real world pipeline. In: **XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Porto de Galinhas - PE: [s.n.], 2015.
- BUENO, L.; POLLI, H. L.; ROSSATO, D.; OLIVEIRA, J. P. D.; NEVES-JR, F.; ARRUDA, L. V. R. Modelo PLIM para alocação de produtos em tanques de uma malha dutoviária por onde trafegam derivados pesados de petróleo. In: **XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Salvador - BA: [s.n.], 2014.
- CAFARO, D. C.; CERDÁ, J. Rigorous scheduling of mesh-structure refined petroleum pipeline networks. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier Ltd, v. 38, p. 185–203, mar. 2012. ISSN 00981354.
- CAFARO, V. G.; CAFARO, D. C.; MÉNDEZ, C. A.; CERDÁ, J. Optimization model for the detailed scheduling of multi-source pipelines. **Computers & Industrial Engineering**, v. 88, p. 395 – 409, 2015. ISSN 0360-8352. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835215003253>>.
- CAMPOGARA, E. **A-Teams para um Problema de Transporte de Derivados de Petróleo**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade Estadual de Campinas, 1995.

CRANE, D. S.; WAINWRIGHT, R. L.; SCHOENEFELD, D. A. Scheduling of multi-product fungible liquid pipelines using genetic algorithms. **Proceedings of the 1999 ACM Symposium on Applied computing - SAC '99**, ACM Press, New York, New York, USA, i, p. 280–285, 1999.

FABRO, J. A.; STEBEL, S. L.; ROSSATO, D.; POLLI, H. L.; ARRUDA, L. V. R.; NEVES-JR, F.; RIBAS, P. C.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F.; RELVAS, S. A MILP (mixed integer linear programming) decomposition solution to the scheduling of heavy oil derivatives in a real-world pipeline. **Computers & Chemical Engineering**, v. 66, n. 0, p. 124 – 138, 2014. ISSN 0098-1354. Selected papers from ESCAPE-23 (European Symposium on Computer Aided Process Engineering - 23), 9-12 June 2013, Lappeenranta, Finland. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135414000064>>.

FELIZARI, L. C. **Programação das Operações de Transporte de Derivados de Petróleo em Rede de Dutos**. Tese (Doutorado em Informática Industrial) — UTFPR, 2009.

FELIZARI, L. C.; ARRUDA, L. V. R.; STEBEL, S. L.; LÜDERS, R. Sequencing Batches in a Real-World Pipeline Network Using Constraint Programming. In: B.V, E. (Ed.). **10th International Symposium on Process Systems Engineering**. Salvador: [s.n.], 2009. v. 27, p. 303–308.

GROSSMANN, I. E. Challenges in the new millennium: product discovery and design, enterprise and supply chain optimization, global life cycle assessment. **Computers & Chemical Engineering**, v. 29, n. 1, p. 29–39, dez. 2004. ISSN 00981354.

GROSSMANN, I. E. Enterprise-wide optimization: A new frontier in process systems engineering. **AIChE Journal**, Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company, v. 51, n. 7, p. 1846–1857, 2005. ISSN 1547-5905. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/aic.10617>>.

HAMACHER, S.; FERREIRA FILHO, V. J. M. **Aplicações de Pesquisa Operacional na Indústria Internacional de Petróleo e Gás**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Elsevier, 2015.

HERRÁN, A.; DE LA CRUZ, J. M.; DE ANDRÉS, B. A mathematical model for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system. **Computers & Chemical Engineering**, v. 34, n. 3, p. 401–413, mar. 2010. ISSN 00981354.

HERRÁN, A.; DE LA CRUZ, J. M.; DE ANDRÉS, B. Global Search Metaheuristics for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier Ltd, v. 37, p. 248–261, fev. 2012. ISSN 00981354.

JOLY, M. **Técnicas de otimização mista-inteira para o scheduling e gerenciamento da produção em refinarias de petróleo**. Tese (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.

KENNEDY, J. L. **Oil and Gas Pipeline Fundamentals**. Tulsa, Oklahoma, U.S.A: Pennwell Corp, 1993.

LOPES, T. M. T.; CIRÉ, A. A.; SOUZA, C. C.; MOURA, A. V. A hybrid model for a multi-product pipeline planning and scheduling problem. **Constraints**, v. 15, n. 2, p. 151–189, nov. 2009. ISSN 1383-7133.

MAGATÃO, L. **Programação matemática aplicada à otimização das operações de um poliduto**. 170 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2001.

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, n. 1-2, p. 171–185, jan. 2004. ISSN 00981354.

MAGATÃO, L.; ARRUDA, L. V. R.; NEVES-JR, F. A combined CLP-MILP approach for scheduling commodities in a pipeline. **Journal of Scheduling**, v. 14, n. 1, p. 57–87, ago. 2011. ISSN 1094-6136.

MAGATÃO, S. N. B.; MAGATÃO, L.; NEVES-JR, F.; POLLI, H. L.; ARRUDA, L. V. R.; RELVAS, S.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D. Planning and Sequencing Product Distribution in a Real-World Pipeline Network: An MILP Decomposition Approach. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 51, p. 4591–4609, 2012.

MAGATÃO, S. N. B.; MAGATÃO, L.; NEVES-JR, F.; ARRUDA, L. V. R. Novel MILP Decomposition Approach for Scheduling Product Distribution through a Pipeline Network. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 54, p. 5077 – 5095, 2015.

MÉNDEZ, C. A.; CERDÁ, J.; GROSSMANN, I. E.; HARJUNKOSKI, I.; FAHL, M. State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes. **Computers & Chemical Engineering**, v. 30, n. 6-7, p. 913–946, maio 2006. ISSN 00981354.

MILIDIÚ, R. L.; PESSOA, A. A.; BRANCONI, V. M.; LABER, E. S.; REY, P. A. Um algoritmo GRASP para o problema de transporte de derivados de petróleo em oleodutos. In: **XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Campos do Jordão, Brasil: SOBRAPO, 2001.

MORO, L. F. L.; ZANIN, A. C.; PINTO, J. M. A planning model for refinery diesel production. **Computers & Chemical Engineering**, v. 22, p. 1039 – 1042, 1998.

MOSTAFEI, H.; CASTRO, P. M.; HADIGHEH, A. G. A novel monolithic milp framework for lot-sizing and scheduling of multiproduct tree-like pipeline networks. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 54, p. 9202 – 9221, 2015.

MOSTAFEI, H.; HADIGHEH, A. G. A general modeling framework for the long-term scheduling of multiproduct pipelines with delivery constraints. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, p. 7029 – 7042, 2014.

MOURA, A. V.; SOUZA, C. C.; CIRE, A. A.; LOPES, T. M. T. Heuristics and Constraint Programming Hybridizations for a Real Pipeline Planning and Scheduling Problem. **11th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering**, Ieee, p. 455–462, jul. 2008.

NEIRO, S. M.; PINTO, J. M. A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains. **Computers & Chemical Engineering**, v. 28, n. 6-7, p. 871–896, jun. 2004. ISSN 00981354.

NEVES-JR, F.; ARRUDA, L. V. R.; MAGATÃO, L.; STEBEL, S. L.; LÜDERS, R.; FELIZARI, L. C.; BOSCHETTO, S. N.; YAMAMOTO, L.; MORI, F. M.; BARBOSA, V.; BONACIN,

M. V.; POLLI, H. L. An Efficient Approach to the Operational Scheduling of a Real-World Pipeline Network. In: B.V, E. (Ed.). **17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE 17)**. Bucarestre: [s.n.], 2007. p. 697–702.

PEREIRA, B. C. **Programação de transferência de derivados de petróleo em rede dutoviária: uma análise exata via branch-and-bound**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

PINTO, J.; JOLY, M.; MORO, L. F. L. Planning and scheduling models for refinery operations. **Computers & Chemical Engineering**, v. 24, p. 2259–2276, 2000.

POLLI, H. L. **Otimização do Transporte de Derivados Claros de Petróleo em Rede de Dutos Utilizando Programação Linear Inteira Mista**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Automação e Sistemas) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

POLLI, H. L.; KLÜPPEL, L. B.; MAGATÃO, L.; NEVES-JR, F.; ARRUDA, L. V. R. Alocação de bateladas de derivados leves de petróleo em uma rede dutoviária. In: **XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Salvador - BA: [s.n.], 2014.

PUCCINI, A.; PIZZOLATO, N. **Programação Linear**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: LCT, 1990.

REJOWSKI, R.; PINTO, J. M. Scheduling of a multiproduct pipeline system. **Computers & Chemical Engineering**, v. 27, n. 8-9, p. 1229–1246, set. 2003. ISSN 00981354.

REJOWSKI, R.; PINTO, J. M. Efficient MILP formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling. **Computers & Chemical Engineering**, v. 28, n. 8, p. 1511 – 1528, 2004. ISSN 0098-1354. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135403003120>>.

REJOWSKI, R.; PINTO, J. M. A novel continuous time representation for the scheduling of pipeline systems with pumping yield rate constraints. **Computers & Chemical Engineering**, v. 32, n. 4-5, p. 1042–1066, abr. 2008. ISSN 00981354.

REKLAITIS, G. Overview of scheduling and planning of batch process operations. In: REKLAITIS, G.; SUNOL, A.; RIPPIN, D.; HORTACSU, 'O. (Ed.). **Batch Processing Systems Engineering**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 1996, (NATO ASI Series, v. 143). p. 660–705. ISBN 978-3-642-64635-5.

RELVAS, S.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; MATOS, H. A. Heuristic batch sequencing on a multiproduct oil distribution system. **Computers & Chemical Engineering**, v. 33, n. 3, p. 712–730, mar. 2009. ISSN 00981354.

RELVAS, S.; MATOS, H. A.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; FIALHO, J.; PINHEIRO, A. S. Pipeline Scheduling and Inventory Management of a Multiproduct Distribution Oil System. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, p. 7841–7855, 2006.

RIBAS, P. C.; YAMAMOTO, L.; POLLI, H. L.; ARRUDA, L. V. R.; NEVES-JR, F. A micro-genetic algorithm for multi-objective scheduling of a real world pipeline network. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 26, n. 1, p. 302–313, 2013.

ROSSATO, D.; POLLI, H. L.; BUENO, L.; OLIVEIRA, J. P. D.; NEVES-JR, F.; STEBEL, S. L.; RIBAS, P. C. An approach to minimum temperature of heavy oil derivatives in pipeline network optimization using residence time. In: **Rio Pipeline 2013**. Rio de Janeiro - RJ: [s.n.], 2013.

SASIKUMAR, M.; RAVI PRAKASH, P.; PATIL, S. M.; RAMANI, S. A heuristic search model for pipeline schedule generation. **Knowledge-Based Systems**, v. 10, n. 3, p. 169–175, out. 1997. ISSN 09507051.

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

Souza Filho, E. M.; BAHIENSE, L.; FERREIRA, F. V. J. M. Scheduling a multi-product pipeline network. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier Ltd, v. 53, p. 55–69, jun. 2013. ISSN 00981354.

VALÉRIO, F. A. M.; POLLI, H. L.; FABRO, J. A.; STEBEL, S. L.; NEVES-JR, F.; ARRUDA, L. V. R.; RIBAS, P. C. Modelo de Planejamento para uma Rede de Dutos de Derivados Escuros de Petróleo. In: **Rio Oil & Gas Expo and Conference 2012**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012.

VALÉRIO, F. A. M.; POLLI, H. L.; FABRO, J. A.; STEBEL, S. L.; NEVES-JR, F.; ARRUDA, L. V. R.; RIBAS, P. C. Troca de Tanques para o Scheduling das Operações de Transporte de Derivados Escuros de Petróleo. In: **Rio Oil & Gas Expo and Conference 2012**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012.

WESTPHAL, H.; NEVES-JR, F.; ARRUDA, L. V. R. Algoritmo Micro-genético Aplicado ao Scheduling de uma Rede de Distribuição de Derivados de Petróleo. In: **Heitor Silverio Lopes; Ricardo Hiroshi C. Takahashi. (Org.). Computação Evolucionária em Problemas de Engenharia**. 1. ed. Curitiba: Omnipax, 2011. cap. 15, p. 331–354. ISBN 9788564619005.

WILLIAMS, H. P. **Model Building in Mathematical Programing**. 4 ed. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1999.