

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

PAULO CESAR RIBAS

**OTIMIZAÇÃO DO *SCHEDULING* DE MOVIMENTAÇÕES DE UM  
DUTO COM UMA ORIGEM E VÁRIOS DESTINOS**

TESE

CURITIBA  
2012



PAULO CESAR RIBAS

**OTIMIZAÇÃO DO *SCHEDULING* DE MOVIMENTAÇÕES DE UM  
DUTO COM UMA ORIGEM E VÁRIOS DESTINOS**

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

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Lúcia Valéria Ramos de Arruda

Co-orientador: Prof. Dr. Leandro Magatão

CURITIBA  
2012

---

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

R482 Ribas, Paulo Cesar  
Otimização do *scheduling* de movimentações de um duto com uma origem e vários destinos /  
Paulo Cesar Ribas. — 2012.  
172 p. : il. ; 30 cm

Orientadora: Lúcia Valéria Ramos de Arruda.

Coorientador : Leandro Magatão.

Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2012.

Bibliografia: p. 167-172.

1. Dutos. 2. Otimização matemática. 3. Programação (Matemática). 4. Agendas de execução  
(Administração) – Processo decisório. 5. Heurística. 6. Programação linear. 7. Engenharia elétrica  
– Teses. I. Arruda, Lúcia Valéria Ramos de, orient. II. Magatão, Leandro, coorient. III.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica  
e Informática Industrial. IV. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

---

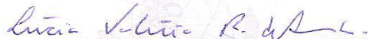
Título da Tese Nº. 77

**“Otimização do Scheduling de Movimentações de um Duto com uma Origem e Vários Destinos”**

por

**Paulo Cesar Ribas**

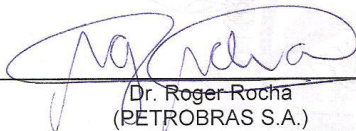
Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em CIÊNCIAS - Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Curitiba, às 09horas do dia 20 de agosto de 2012. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:



Profª. Lúcia Valéria Ramos de Arruda, Dr.  
(Presidente)



Prof. Silvio Hamacher, Dr.  
(PUC-Rio)



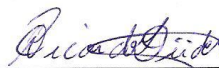
Dr. Roger Rocha  
(PETROBRAS S.A.)



Profª. Maria Teresinha Arns Steiner, Dr.  
(UFPR)



Prof. Flávio Neves Junior, Dr.  
(UTFPR-CT)



Prof. Ricardo Lüders, Dr.  
(Coordenador do CPGEI)

Visto da Coordenação:



Aos meus pais Domingos (*in memoriam*) e Nadir;  
Aos amores da minha vida, Flávia e Lis que logo chegará.





## AGRADECIMENTOS

À minha irmã, cunhado, sobrinha e demais familiares pelos incentivos, formação e compreensão.

À minha orientadora, professora Valéria, pelo suporte e cobrança sem os quais este trabalho seria impossível.

Ao professor Magatão, meu coorientador, pelo conhecimento, ajuda e incentivo.

Aos membros da Banca Examinadora pela atenção e contribuição.

À Equipe Lasca que quebrou muitas pedras neste problema.

Aos Colegas de Trabalho da PETROBRAS com os quais compartilho muitas discussões e hipóteses.

Aos professores e funcionários da UTFPR pelos ensinamentos e ajuda.

À Pedrita pelo companheirismo e lambidas.

Aos amigos. Em especial aos que concluíram doutorado neste período (Marcela e Gaio) mostrando que é possível, e para os que estão para terminar (Arthur e Aline) – *Yes, we can!*



## RESUMO

RIBAS, P. C. Otimização do Scheduling de Movimentações de Um Duto com Uma Origem e Vários Destinos. 172 f. Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

O presente trabalho desenvolve um modelo de apoio à tomada de decisão de atividades de *scheduling* em um sistema de dutos sequenciais, com uma origem e vários destinos. Esse modelo foi inserido em uma ferramenta computacional que possibilita a realização de estudos de caso em um duto real denominado OSBRA, que a partir da maior refinaria brasileira, a REPLAN, abastece cinco órgãos localizados em quatro unidades da federação diferentes. O sistema proposto baseia seu método na execução iterativa de um modelo de programação linear inteira mista, com o horizonte de tempo sendo deslocado com o intuito de se atingir uma programação para um período de no mínimo um mês. São consideradas no modelo as principais características operacionais do OSBRA, como variação da vazão em função da entrada ou saída de sangrias de recebimento, sempre respeitando os limites de vazão tanto dos trechos de dutos quanto das sangrias. Outras características do sistema real contempladas no modelo são o recebimento por parte das bases intermediárias exclusivamente por sangria, ou seja, apenas uma parte da batelada é recebida evitando, desta forma, a parada dos trechos de duto a jusante; variação diária de demanda e utilização de bateladas selo para evitar a contaminação entre produtos adjacentes. Dezoito cenários do sistema OSBRA, com diferentes características sazonais, foram submetidos ao modelo, que obteve soluções de grande qualidade, atingindo-se um nível de serviço satisfatório na grande maioria dos cenários.

**Palavras-chave:** Otimização dutoviária, *scheduling*, programação linear inteira mista, heurística.



## ***ABSTRACT***

RIBAS, P. C. Scheduling Activities Optimization in a Pipeline with One Refinery Source and Multiple Destinations. 172 p. Thesis – Graduate School of Electrical Engineering and Computer Science, Federal University of Technology - Parana. Curitiba, 2012.

This thesis presents a model to support decision making of scheduling activities in a sequential pipeline system, composed by one refinery source and multiple destinations. This model is inserted into a system and used to develop a case study in the real world pipeline system called OSBRA that links the largest refinery in Brazil, REPLAN, to five terminals located in four different states. The proposed system relies its method in the iterative execution of a model of mixed integer linear programming, with the time horizon being moved in order to achieve a schedule for a period of at least one month. The main operational features and restrictions of OSBRA are considered in this model, as the flow variation due to the entry or exit of bleeding receiving, always within the limits of both the flow sections of pipelines as of bleeding. Others features of the real system contemplated in the model are the receiving by the intermediate bases exclusively by bleeding, meaning that only part of the batch is received thus, avoiding downstream stretches from the pipeline to stop, daily variance in the demand and the use of stamp batches to prevent contamination between adjacent derivatives. Eighteen scenarios of OSBRA's system were submitted to the model and high quality solutions were obtained, reaching a satisfactory level of service in most scenarios.

**Keywords:** Pipeline optimization, scheduling, mixed integer linear programming, heuristic.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Planejamento do Fluxo de Materiais, Simplificado de Brito (2000). .....	24
Figura 2 – Mapa de Dutos do Brasil (TRANSPETRO, 2011) .....	28
Figura 3 – Representação do OSBRA (TRANSPETRO, 2011) .....	34
Figura 4 – Características Físicas do OSBRA (TRANSPETRO, 2011).....	34
Figura 5 – Limites de Estoque Considerados .....	40
Figura 6 – Operação Pulmão .....	42
Figura 7 – Operação de Sangria.....	43
Figura 8 – Chaveamento de Linha .....	44
Figura 9 – Operação Reversão.....	45
Figura 10 – Operação Injeção .....	46
Figura 11 – Representação do Tempo (MENDEZ et al., 2006).....	54
Figura 12 – Alimentação de Crus da Refap (MAGALHÃES e SHAH, 2003) .....	56
Figura 13 - Descrição da Arquitetura de Resolução (RELVAS, BARBOSA-PÓVOA e MATOS, 2009).....	59
Figura 14 - Descrição da Arquitetura de Resolução (BOSCHETTO et al., 2010).....	60
Figura 15 – Rede de Claros da Região de São Paulo (CAMPONOGARA, 1995).....	63
Figura 16 – Rede de Dutos Hipotética (DE LA CRUZ et al., 2003) .....	64
Figura 17 – Rede de Escuros da Área de São Paulo (ALVES, 2007).....	65
Figura 18 – Diagrama de Resolução da Rede de Claros (FELIZARI, 2009).....	66
Figura 19 – Rede 1 (CAFARO e CERDÁ, 2010).....	67
Figura 20 - Rede 2 (CAFARO e CERDÁ, 2010) .....	67
Figura 21 - Rede 3 (CAFARO e CERDÁ, 2010) .....	67
Figura 22 – Diagrama de Solução Rede de Dutos .....	68
Figura 23 – Duto Genérico (REJOWSKI e PINTO, 2002) .....	71
Figura 24 – Representação do modelo com horizonte rolante no tempo .....	78
Figura 25 – Representação da Modelagem por Eventos.....	79
Figura 26 – Pseudocódigo dos Cálculos Globais da Heurística .....	81
Figura 27 – Pseudocódigo do Controle do Horizonte de Tempo da Heurística Iterativa .....	82
Figura 28 – Fluxograma do Procedimento de Otimização de Curto Prazo .....	82
Figura 29 – Fluxograma do Pré-Processamento da Otimização .....	83
Figura 30 – Pseudocódigo da Rotina de Sequenciamento de Bateladas.....	84
Figura 31 – Representação da Sequência de Bateladas .....	85
Figura 32 – Rotina de Cálculo dos Limites de Volume de Cada Batelada .....	86
Figura 33 – Representação Gráfica Aproximada da Penalidade por Violação de Estoque Meta .....	92
Figura 34 – Representação Gráfica Aproximada da Penalidade por Violação de Estoque Desejável .....	93
Figura 35 – Representação Gráfica Aproximada da Penalidade por Violação de Estoque de Lastro e Capacidade Operacional .....	94
Figura 36 – Representação Gráfica Aproximada da Soma das Penalidades por Violação de Estoque.....	95
Figura 37 – Exemplo de Eventos e seus Impactos nas Coordenadas das Bateladas em Duto .....	99
Figura 38 – Relações entre as Variáveis no Modelo PLIM .....	110
Figura 39 – Variação da Demanda nos Cenários .....	117
Figura 40 – Participação de Diesel e Gasolina nos Cenários .....	117
Figura 41 – Resultados Função Objetivo x Parâmetros .....	123
Figura 42 – Evolução do Estoque de Gasolina em Brasília – Cenário 6a – SolFO_03 .....	124
Figura 43 – Evolução do Estoque de Gasolina em Brasília – Cenário 6a – SolFO_14 .....	125
Figura 44 – Tempo de Execução por Iteração em Função do Tempo Médio de Execução Total .....	131
Figura 45 – Tempo de Execução por Iteração em Função do Percentual de Soluções Completas Obtidas .....	131
Figura 46 – Percentual de Soluções Completas Obtidas em Função da Ênfase do Solver .....	132
Figura 47 – Ocorrências de Configurações de FO com bons resultados para os Cenários Testados .....	136
Figura 48 – Ocorrências de Faixas de Valores de Nível de Serviço para SolFO_14 .....	138
Figura 49 – Ocorrências de Faixas de Valores de Nível de Serviço para SolFO_15 .....	140
Figura 50 – Gantt de Bombeio – Cenário 4b – SolFO_14 .....	142
Figura 51 – Detalhe do Gantt de Bombeio – Cenário 4b – SolFO_14.....	144
Figura 52 – Detalhe do Gantt de Bombeio com Sangrias – Cenário 4b – SolFO_14.....	145

Figura 53 – Evolução Estoque Gasolina R.Preto e Uberaba – Cenário 4b – SolFO_14 .....	146
Figura 54 – Evolução Estoque Gasolina Uberlândia, Goiânia e Brasília – Cenário 4b – SolFO_14 .....	147
Figura 55 – Evolução Estoque Diesel R.Preto e Uberaba – Cenário 4b – SolFO_14 .....	148
Figura 56 – Evolução Estoque Diesel Uberlândia, Goiânia e Brasília – Cenário 4b – SolFO_14 .....	149
Figura 57 – Perfil de Estoques Diesel – Brasília – Cenário 1c – SolFO_14 .....	150
Figura 58 – Perfil de Estoques Diesel – R.Preto – Cenário 5a – SolFO_15.....	150
Figura 59 – Perfil de Estoques Gasolina – Goiânia – Cenário 1c – SolFO_14.....	151
Figura 60 – Perfil de Estoques Gasolina – Brasília – Cenário 5a – SolFO_15 .....	151
Figura 61 – Perfil de Estoques Gasolina – Brasília – Cenário 3b – SolFO_14.....	152
Figura 62 – Perfil de Estoques Diesel – Brasília – Cenário 5b – SolFO_15.....	152
Figura 63 – Perfil de Estoques Gasolina – Uberaba – Cenário 3b – SolFO_14.....	152
Figura 64 – Perfil de Estoques Gasolina – Goiânia – Cenário 5b – SolFO_15 .....	153
Figura 65 – Perfil de Estoques Gasolina – Goiânia – Cenário 1b – SolFO_15 .....	154
Figura 66 – Perfil de Estoques Gasolina – R.Preto – Cenário 1b – SolFO_15 .....	154
Figura 67 – Perfis de Estoques– Cenário 1c – SolFO_15.....	155
Figura 68 – Perfis de Estoques– Cenário 1a – SolFO_14 .....	156
Figura 69 – Perfis de Estoques– Cenário 1a – SolFO_14 – Pesos Estoque Meta Modificados .....	158



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Custos de Transporte por Modal (VAZ, OLIVEIRA e DAMASCENO, 2005).....	25
Tabela 1.2 – Evolução PIB Brasil e Regiões.....	26
Tabela 2.1 – Capacidade de Estoque por Base OSBRA (REJOWSKI, 2007) .....	35
Tabela 2.2 – Participação em Bombeio OSBRA (TRANSPETRO, 2011) .....	36
Tabela 2.3 – Evolução e Crescimento de Volume Transportado OSBRA.....	36
Tabela 2.4 – Faixas de Vazão OSBRA .....	38
Tabela 2.5 – Faixas de Vazão de Sangria OSBRA .....	38
Tabela 2.6 – Compatibilidade de Produtos .....	39
Tabela 3.1 – Evolução do IBM – CPLEX (IBM, 2011).....	52
Tabela 3.2 – Resumo dos Trabalhos: Alimentação de Refinarias .....	57
Tabela 3.3 – Resumo dos Trabalhos: Escoamento de Derivados em um Duto com Uma Origem e Um Destino .....	61
Tabela 3.4 – Resumo dos Trabalhos: Rede de Dutos Derivados .....	69
Tabela 3.5 – Resumo dos Trabalhos: Uma Origem Vários Destinos.....	74
Tabela 3.6 – Aderência dos Trabalhos aos Requisitos Operacionais.....	75
Tabela 4.1 – Parâmetros Utilizados no Modelo Matemático .....	88
Tabela 4.2 – Conjuntos Utilizados no Modelo .....	89
Tabela 4.3 – Variáveis Binárias Utilizadas no Modelo .....	89
Tabela 4.4 – Variáveis Contínuas Utilizadas no Modelo Matemático .....	90
Tabela 5.1 – Disponibilidade de Produtos / Confiabilidade Data de Entrega – Nível de Serviço em Função da Demanda Atendida .....	112
Tabela 5.2 – Confiabilidade da Data de Entrega – Nível de Serviço em Função do Limite Superior de Estoque .....	113
Tabela 5.3 – Sazonalidade de Demanda Semanal para os Cenários c.....	115
Tabela 5.4 – Variações de Demanda nos Cenários.....	115
Tabela 5.5 – Número de Dias que a Capacidade de Estoque Supriria a Demanda Média. ....	118
Tabela 5.6 – Definição dos Experimentos para Obtenção dos Parâmetros da Função Objetivo .....	121
Tabela 5.7 – Resultados dos Experimentos de Determinação dos Parâmetros da Função Objetivo .....	122
Tabela 5.8 – Evolução do Estoque de Gasolina em Brasília – Cenário 6a – SolFO_03 .....	124
Tabela 5.9 – Evolução do Estoque de Gasolina em Brasília – Cenário 6a – SolFO_14 .....	125
Tabela 5.10 – Definição dos Experimentos para Obtenção dos Parâmetros de Execução do Otimizador .....	127
Tabela 5.11 – Resultados dos Experimentos de Determinação dos Parâmetros de Execução do Otimizador ...	129
Tabela 6.1 – Resultados Experimentais Totalizados.....	134
Tabela 6.2 – Resultados Experimentais Totalizados – Filtrados os Bons Níveis de Serviço .....	135
Tabela 6.3 – Resultados Bons para Cenários Utilizando SolFO_14 .....	137
Tabela 6.4 – Resultados Bons para Cenários Utilizando SolFO_15 .....	139
Tabela 6.5 – Demanda Total Cenário 4b .....	141
Tabela 6.6 – Participação na Demanda Cenário 4b.....	141
Tabela 6.7 – Volume das Bateladas – Cenário 4b – SolFO_14.....	143
Tabela 7.1 – Aderência dos Trabalhos aos Requisitos Operacionais, atualização da Tabela 3.6 .....	165



# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	23
1.1. MOTIVAÇÃO .....	24
1.1.1. Modal Dutoviário .....	25
1.1.2. Contexto Econômico Brasileiro .....	26
1.2. OBJETIVOS .....	28
1.3. METODOLOGIA .....	29
1.4. CONTRIBUIÇÕES .....	30
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	31
2. O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DUTOVIÁRIA .....	33
2.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO OSBRA .....	33
2.2. RESTRIÇÕES OPERACIONAIS E CARACTERÍSTICAS ESPERADAS DA SOLUÇÃO .....	37
2.3. LIMITES DE ESTOQUE CONSIDERADOS NAS BASES .....	39
2.3.1. Limites Físicos .....	39
2.3.2. Limites Meta .....	40
2.3.3. Limites Desejáveis .....	40
2.4. DEFINIÇÕES DE OPERAÇÕES TÍPICAS EM DUTOS .....	41
2.4.1. Operação de Bombeio .....	41
2.4.2. Operação Recebimento .....	41
2.4.3. Passagem .....	42
2.4.4. Operação Pulmão .....	42
2.4.5. Operação Sangria .....	43
2.4.6. Chaveamento de Linha .....	43
2.4.7. Operação Reversão .....	44
2.4.8. Injeção .....	45
2.4.9. Degradação .....	46
2.5. ROTINA DE OPERAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DO OSBRA .....	47
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	49
3.1. MODELOS MATEMÁTICOS E PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO .....	49
3.1.1. Complexidade dos Modelos .....	50
3.1.2. Técnicas de Resolução .....	50
3.1.3. Representação do Tempo .....	53
3.2. PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO DUTOVIÁRIA .....	54
3.2.1. Abastecimento de Refinarias .....	54
3.2.2. escoamento de Derivados - Duto com Uma Origem e Um Destino .....	57

3.2.3. Escoamento de Derivados - Rede de Dutos.....	62
3.2.4. Escoamento de Derivados - Uma Origem e Vários Destinos.....	70
4. OTIMIZADOR DO <i>SCHEDULING</i> DO OSBRA.....	77
4.1. LIMITAÇÕES DA MODELAGEM PROPOSTA.....	77
4.2. ESTRATÉGIA ADOTADA.....	78
4.3. A HEURÍSTICA ITERATIVA.....	80
4.4. MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE CURTO PRAZO.....	82
4.4.1. Pré e Pós-Processamentos.....	83
4.4.2. Parâmetros, Variáveis e Conjuntos do Modelo Matemático.....	86
4.4.3. Função Objetivo.....	91
4.4.4. Restrições.....	95
4.4.5. Resumo dos Relacionamentos no Modelo.....	109
5. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS.....	111
5.1. AVALIAÇÃO DA SOLUÇÃO COMPLETA.....	111
5.2. CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS.....	114
5.3. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE OTIMIZAÇÃO.....	119
5.3.1. Parâmetros da Função Objetivo.....	119
5.3.2. Parâmetros de Execução do Otimizador.....	126
6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	133
6.1. RESULTADOS TOTALIZADOS POR CENÁRIOS.....	133
6.2. ANÁLISE QUANTITATIVA DAS RESPOSTAS.....	137
6.3. ANÁLISE QUALITATIVA DAS RESPOSTAS.....	140
6.3.1. Análise Qualitativa das Boas Soluções.....	141
6.3.2. Análise Qualitativa das Soluções Descartadas.....	154
6.4. SINTONIA FINA - MUDANÇA NOS PESOS DE ESTOQUE META.....	157
6.5. CONCLUSÕES DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	158
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	161
7.1. CONTRIBUIÇÕES.....	163
7.2. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	166
REFERÊNCIAS.....	167





## 1. INTRODUÇÃO

Com o fim da Segunda Guerra Mundial iniciou-se um longo ciclo de crescimento da economia mundial, mas a partir de 1974 tem-se início uma crise onde os investimentos e a demanda caem sensivelmente na maioria dos países industrializados, crise esta que perdurou até o fim do século XX (PASSOS, 1999). A partir do início desta crise, a concorrência internacional vem ficando cada vez mais acirrada, culminando no final do século passado com a globalização, caracterizada pela queda das barreiras internacionais de fluxo de produtos e capitais. No início do século atual a economia mundial oscilou, entre o crescimento puxado pelas economias emergentes de China, Brasil, Índia e Rússia e a crise advinda da estagnação dos Estados Unidos e da Europa – e com o aumento contínuo do impacto da globalização e, por consequência da concorrência mundial.

Durante o período de crescimento até 1974, as indústrias se organizavam sob o modelo fordista-taylorista e uma estrutura empresarial departamentalizada típica do fayolismo (PASSOS, 1999). Com o aumento da concorrência houve a necessidade de uma evolução das empresas capitalistas, surgindo modelos de produção de alto desempenho, o que foi designado por Passos (1999) como sendo a Terceira Revolução Industrial. Esta revolução apresenta quatro características básicas:

- Reformulação quase integral nos padrões de consumo e formas de produzir influenciada pela tecnologia;
- Formas de gestão inovadoras que visam flexibilizar e enxugar a produção;
- Revolução tecnológica nos processos produtivos;
- Modificação nos processos organizacionais com a integração das diversas áreas da empresa.

Estas características empresariais visam a competitividade, agilidade, flexibilidade, confiabilidade, produtividade e baixo custo, fatores sem os quais as empresas tendem a ser varridas do mercado.

Hoje em dia, sabe-se que tais características devem estar incluídas no planejamento do fluxo de materiais, o qual é a espinha dorsal do planejamento empresarial abrangendo todas as áreas da empresa, acompanhando os materiais até que os clientes recebam o produto final. O planejamento de fluxos de materiais é mostrado na Figura 1, sendo composto por: planejamento estratégico, planejamento tático e operacional (BRITO, 2000).

Segundo Ivanov (2010), a cadeia de suprimento impacta em mais de 30% do desempenho do negócio. E a redução de estoques e o aumento do nível de serviço podem aumentar em até 60% este desempenho.

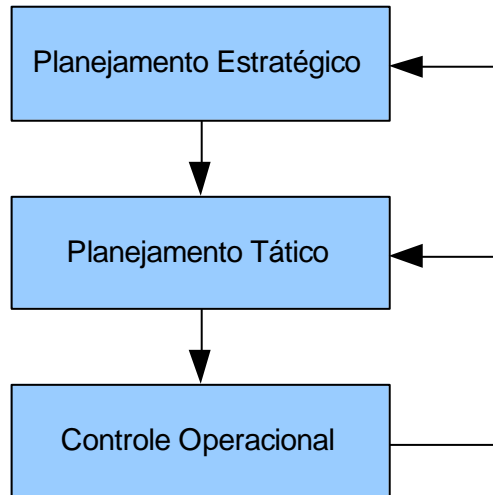


Figura 1 – Planejamento do Fluxo de Materiais, Simplificado de Brito (2000).

Esta tese se enquadra no planejamento operacional da cadeia de suprimentos do petróleo.

## 1.1. MOTIVAÇÃO

O planejamento e controle operacional da cadeia de suprimentos são compostos pela programação (*scheduling*) das tarefas de movimentação e pela execução e controle destas tarefas.

Problemas de programação da cadeia de suprimentos são extremamente desafiadores devido à alta complexidade que combina processos contínuos e discretos, além de integrar as operações de produção e transporte (KREIPL e PINEDO, 2004).

Segundo a classificação *Financial Times Global 500* (FINANCIAL TIMES, 2010) as duas maiores empresas do mundo e a maior empresa brasileira são empresas petrolíferas. Também 48% de todo o investimento industrial brasileiro previsto de 2007 a 2010 era voltado para a indústria de petróleo (RIBAS, HAMACHER e STREET, 2008). Neste contexto, os ganhos obtidos na programação, e em especial na otimização, da cadeia de suprimentos são de grande importância financeira e refletem-se em todas as atividades que utilizam os produtos oriundos desta indústria.



### 1.1.1. Modal Dutoviário

O modal dutoviário, conforme Tabela 1.1, é o de menor custo dentre os modais de transporte terrestre e ainda apresenta uma maior disponibilidade e confiabilidade do que o modal aquaviário uma vez que não sofre influências climáticas.

Tabela 1.1 – Custos de Transporte por Modal (VAZ, OLIVEIRA e DAMASCENO, 2005).

	EUA	Brasil	Brasil/EUA
Aéreo	320	523	1,63
Rodoviário	56	19	0,34
Ferrovário	14	11	0,79
Dutoviário	9	11	1,22
Aquaviário	5	7	1,40

(em US\$ por 1000 ton-quilômetro)

Segundo Vaz, Oliveira e Damasceno (2005), o modal dutoviário apresenta como vantagens:

- Dispensa a utilização de embalagens;
- Desafios logísticos mais simples: não há necessidade de viagem de retorno, nem, tão pouco, preocupações com congestionamentos ou transposições de áreas inóspitas como zonas áridas, geladas ou sujeitas a alagamentos;
- Demanda pouca mão de obra;
- Apresenta um nível de segurança maior, o que o credencia a transportar produtos inflamáveis e contaminantes;
- Baixo custo de operação;
- Independência das condições climáticas;
- E, possibilidade de servir como estoque devido ao grande volume transportado e tempo de escoamento.

E como desvantagens:

- Investimento inicial de capital de grande porte;
- Nenhuma flexibilidade de rota;
- Dificuldade de adaptação a diferentes padrões de carregamento;
- Contaminação entre produtos adjacentes.

Ainda de acordo com Vaz, Oliveira e Damasceno (2005), a participação do modal dutoviário no transporte brasileiro é de apenas 5%, enquanto nos Estados Unidos é de 20% - o que demonstra um grande potencial de crescimento com ganhos econômicos, uma vez que o modal mais utilizado no transporte terrestre é o rodoviário.

### 1.1.2. Contexto Econômico Brasileiro

Em estudos divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2010), a economia brasileira tem crescido a uma taxa alta desde 2004, conforme Tabela 1.2. Este fato é combinado a um aumento da participação da região Centro Oeste no PIB (produto interno bruto) nacional.

Tabela 1.2 – Evolução PIB Brasil e Regiões

	Valores em milhões de reais	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro- Oeste	Brasil
2004	PIB	96.012	247.043	1.083.975	337.657	176.811	1.941.498
2005	PIB	106.442	280.545	1.213.863	356.211	190.178	2.147.239
	Crescimento	10,9%	13,6%	12,0%	5,5%	7,6%	10,6%
2006	PIB	119.993	311.104	1.345.513	386.588	206.284	2.369.484
	Crescimento	12,7%	10,9%	10,8%	8,5%	8,5%	10,4%
2007	PIB	133.578	347.797	1.501.185	442.820	235.964	2.661.345
	Crescimento	11,3%	11,8%	11,6%	14,5%	14,4%	12,3%
2008	PIB	154.703	397.500	1.698.588	502.040	279.372	3.032.203
	Crescimento	15,8%	14,3%	13,1%	13,4%	18,4%	13,9%
2009	PIB	163.208	437.720	1.792.049	535.662	310.765	3.239.404
	Crescimento	5,5%	10,1%	5,5%	6,7%	11,2%	6,8%

De 2004 a 2009, a economia brasileira passou de 1,94 trilhões de reais para 3,24 trilhões de reais. Neste mesmo período, o PIB da região centro oeste passou de 176 bilhões para 310 bilhões de reais – apresentando um crescimento acima da média nacional, em especial nos últimos anos.

Considerando que o consumo de derivados de petróleo está diretamente ligado ao crescimento econômico e que o modal dutoviário é o que apresenta a maior competitividade econômica para trechos terrestres, apesar das desvantagens de necessitar um grande aporte de capital inicial e estar sujeito a contaminações entre produtos, sobressai a importância de se

maximizar o uso de dutos que abastecem regiões de grande crescimento econômico com garantias de qualidade de produto.

Para isto é necessária uma eficiente programação de escoamento na malha dutoviária, processo este que em malhas complexas é de grande dificuldade de realização sem o auxílio de ferramentas de otimização.

O uso de ferramentas de otimização faz com que o processo de tomada de decisão seja mais eficaz e rápido, além de possibilitar o uso de análise de diversos cenários (KALLRATH, 2002). Essas análises são de suma importância num cenário aonde gestores aplicam de 40% a 60% de seu tempo em atividades ligadas ao *scheduling* e *rescheduling* de atividades (IVANOV, 2010).

Não obstante a sua importância, o *scheduling* dutoviário não apresenta soluções consolidadas (BOSCHETTO, 2011). Dentro desta realidade, o presente trabalho se propõe a apresentar uma solução de otimização de programação de envio de derivados no modal dutoviário que abastece a região Centro-Oeste do Brasil, o complexo dutoviário OSBRA (Oleoduto São Paulo - Brasília). O duto tem 964 km de extensão e 164.374 m<sup>3</sup> de volume, iniciando na Refinaria do Planalto (REPLAN) e abastecendo os terminais terrestres de Ribeirão Preto, Uberaba, Uberlândia, Senador Canedo e Brasília. Objetiva-se que a solução obtida atenda a restrições operacionais reais, bem como atinja um nível de serviço máximo, minimizando atrasos ou adiantamentos no recebimento de produtos.

Na Figura 2 observa-se a malha de dutos brasileira com destaque ao OSBRA.

Jittamai (2004) aborda um problema de *scheduling* dutoviário com algumas características similares ao OSBRA. O cenário de estudo envolve um duto com uma origem e vários destinos em que cada batelada tem somente um destino final. O autor demonstra que o problema tratado é *NP-Hard*. Adicionalmente, ressalta-se que no OSBRA cada batelada bombeada na origem pode ter mais de um destino final. Assim, é possível o recebimento nas bases intermediárias por operações de sangria, ou seja, apenas uma parte da batelada é recebida evitando, desta forma, a parada dos trechos de duto a jusante. O tratamento de operações de sangria agrega complexidade ao cenário de estudo. Assim, analogamente, o problema de *scheduling* do OSBRA é um problema combinatorial de difícil resolução.

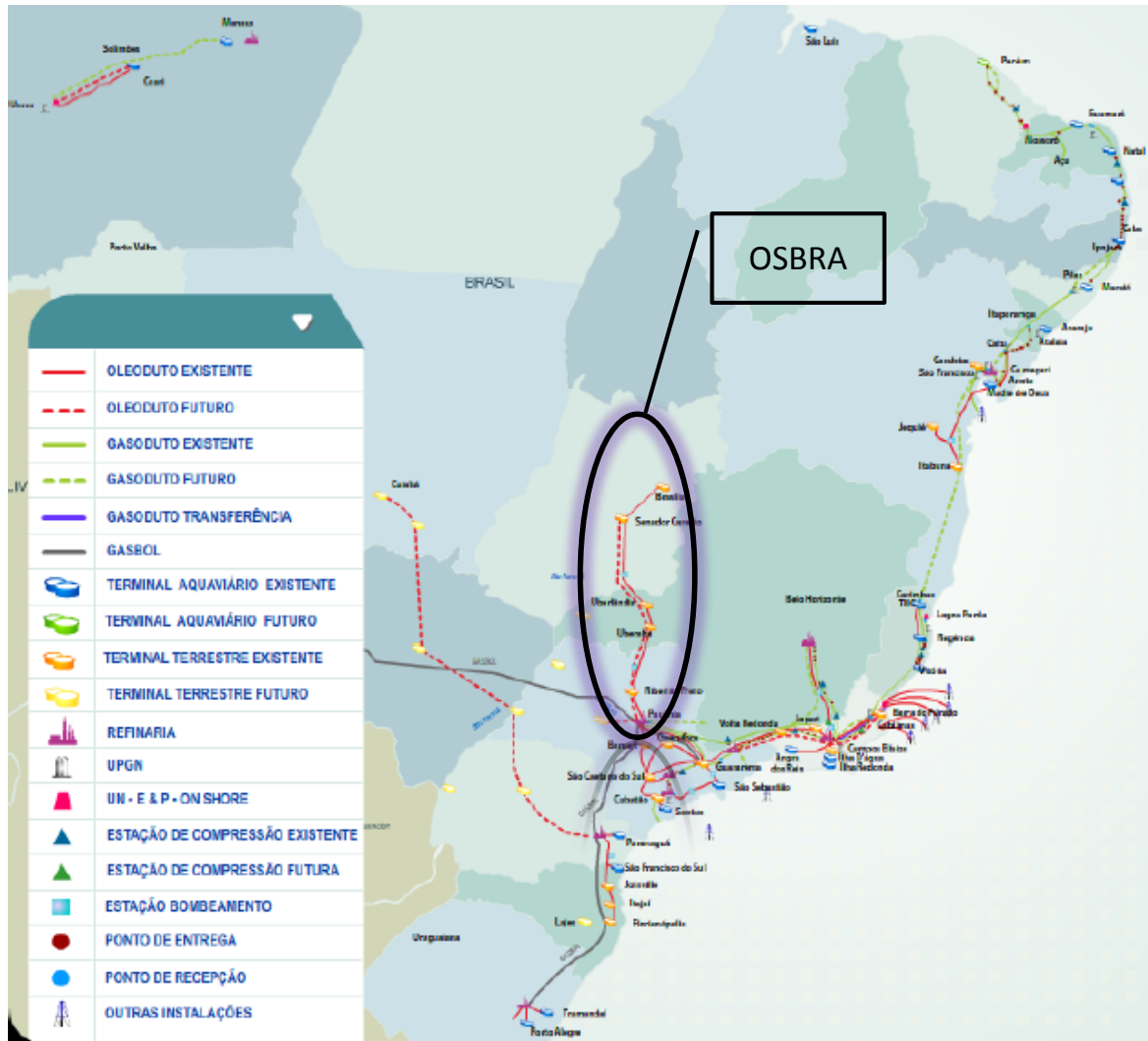


Figura 2 – Mapa de Dutos do Brasil (TRANSPETRO, 2011)

## 1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral a aplicação de modelos de programação matemática e heurística para a determinação do *scheduling* de transferência e estocagem de derivados em um duto que interliga uma refinaria e vários terminais consumidores.

A abordagem de solução criada é aplicada no estudo de um cenário real envolvendo a programação do complexo dutoviário OSBRA (Oleoduto São Paulo - Brasília).

A abordagem criada serve de base para a construção de uma ferramenta de apoio à tomada de decisão operacional do problema real.

Dentre os objetivos específicos pode-se enumerar:

- Propor um modelo baseado em programação matemática que possua características de

- simplicidade e baixo tempo de processamento permitindo a programação de um horizonte de *scheduling* de pelo menos um mês, com um máximo nível de serviço.
- Buscar evolução de trabalhos anteriores, como será discutido no capítulo 2, introduzindo restrições operacionais, tais como:
    - Registro contínuo do tempo.
    - Não interrupção do fluxo no duto principal, ou seja, recebimentos através de operação sangria<sup>1</sup> nas bases intermediárias.
    - Respeito a limites de fluxo mínimo e máximo em cada trecho de duto.
    - Respeito a bateladas mínimas de sangria e bombeio.
    - Variação da demanda no decorrer dos períodos.
    - Tratamento de bateladas de selo.
  - Integrar o modelo matemático a heurísticas que permitam o atendimento às restrições com o mínimo comprometimento do desempenho computacional.

### 1.3. METODOLOGIA

Este trabalho é classificado como pesquisa aplicada, onde um método é aplicado ao problema real de programação do escoamento dutoviário. A ferramenta desenvolvida é de apoio à tomada de decisão e através de dados quantitativos procura dar subsídios para que o usuário possa introduzir valores qualitativos e decidir qual é a melhor solução de programação do escoamento de derivados através de um duto com uma origem e múltiplos destinos, em especial o OSBRA.

Para realizar esta pesquisa, foi feito inicialmente um estudo do problema real em seguida foi realizado um amplo levantamento bibliográfico sobre trabalhos equivalentes e semelhantes, visando adquirir conhecimentos a fim de se desenvolver um modelo de otimização que alcance bons resultados para uma gama variada de cenários.

Desenvolvido este modelo, ele foi testado em alguns cenários, e por fim analisado.

---

<sup>1</sup> Operação Sangria é explicada na seção 2.4.5

## 1.4. CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições alcançadas no decorrer do trabalho estão listadas a seguir:

- Caracterização da atividade de *scheduling* do transporte de derivados para um duto com uma origem e vários destinos, com o detalhamento de uma rede real, o OSBRA, que liga a maior refinaria brasileira, a REPLAN, à região Centro-Oeste, sendo responsável pelo abastecimento desta região e de parte do interior de São Paulo e Minas.
- Levantamento bibliográfico de trabalhos acadêmicos desenvolvidos na área de otimização, planejamento e programação dutoviária, tanto de petróleo quanto de derivados.
- Desenvolvimento e pesquisa de metodologias de otimização de redes de dutos que auxiliem na tarefa de programação do transporte de petróleo e derivados.
- Desenvolvimento de um modelo de programação linear inteira mista baseada em eventos que reproduz o funcionamento e requisitos reais do duto em estudo, composto de uma origem e cinco destinos. Sendo os principais requisitos operacionais: variação das vazões em função da ocorrência de sangrias, uso de produto selo para minimizar contaminações, variação diária das demandas de acordo com a sazonalidade, bombeio contínuo sem interrupção do fluxo no duto principal, registro de tempo contínuo a fim de proporcionar maior exatidão nos tempos das operações e volumes, vazões que respeitam as faixas operacionais características de cada trecho de duto e sangrias, geração bateladas de bombeio e de sangria que respeitam um volume mínimo.
- Desenvolvimento de uma rotina de controle de execução iterativa com horizonte de tempo rolante que propicia a otimização do sistema dentro de um horizonte temporal longo, sem detrimento do desempenho computacional.
- Com a união das duas contribuições anteriores, obteve-se um sistema de auxílio à tomada de decisão que proporciona soluções otimizadas que atendem um conjunto de requisitos funcionais ainda não cobertos pela literatura de forma concomitante.

## **1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO**

Além deste capítulo introdutório, o presente trabalho está estruturado da seguinte maneira.

O Capítulo 2 traz uma descrição do sistema OSBRA e suas características operacionais. Já o Capítulo 3 faz um apanhado de trabalhos desenvolvidos na otimização dutoviária e no estudo específico de dutos com a mesma característica do OSBRA.

O Capítulo 4 descreve a evolução do modelo atual suas peculiaridades, limitações e diferenciações perante os modelos apresentados em trabalhos anteriores.

O Capítulo 5 traz a metodologia para determinação dos parâmetros do modelo, enquanto o 6 mostra e analisa os resultados experimentais da aplicação do modelo proposto a uma gama de dezoito cenários.

Finalmente o Capítulo 7 faz um apanhado das contribuições, considerações e sugestões de trabalhos futuros.





## 2. O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DUTOVIÁRIA

Neste capítulo é descrito o problema abordado na presente tese, que é a otimização da programação dutoviária de derivados de um duto com uma origem e vários destinos.

O duto analisado é o OSBRA, e o problema é semelhante ao tratado por Rejowski (2007) acrescido de algumas restrições práticas que serão a seguir descritas, juntamente com a contextualização do problema.

O OSBRA, Oleoduto São Paulo – Brasília está inserido dentro da chamada área São Paulo da PETROBRAS. Esta área é composta por duas redes de derivados, a malha de claros (a qual o OSBRA é interligado) e a malha de escuros.

É denominado claro, o derivado de petróleo com uma densidade mais baixa. Em claros podem ser citados os seguintes grupos de produtos: GLP (gás liquefeito de petróleo), nafta, gasolina, querosene e diesel, dentre outros. Cada um destes grupos de produtos pode ter mais de uma especificação de qualidades e cada especificação diferente define um derivado (produto) distinto.

Já os escuros possuem uma densidade mais alta, e nele estão os vários óleos combustíveis e combustíveis náuticos, dentre outros.

As influências entre as redes de escuros e claros são mínimas e serão desprezadas.

Como premissa deste trabalho, será considerado que o OSBRA é programado *a priori* e, posteriormente, será feita a programação do restante da malha de claros. Isto se deve ao fato de que a malha de claros possui mais interligações e, por consequência, é mais flexível para a obtenção de bons resultados. Desta forma elimina-se a influência de outras áreas no OSBRA, facilitando a sua resolução.

### 2.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO OSBRA

Na Figura 3 tem-se a caracterização do OSBRA. Nela podem-se observar as bases operacionais ou terminais terrestres, refinarias e estações de bombeio. O duto tem o seu início na Refinaria do Planalto (REPLAN), abastecendo os terminais terrestres de Ribeirão Preto, Uberaba, Uberlândia, Senador Canedo e Brasília.

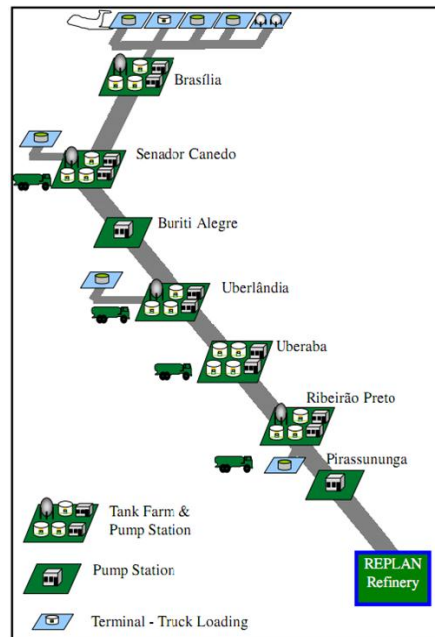


Figura 3 – Representação do OSBRA (TRANSPETRO, 2011)

Conforme a Figura 4, denomina-se o trecho REPLAN-Ribeirão Preto como OSBRA1, Ribeirão Preto-Uberaba OSBRA2, Uberaba-Uberlândia OSBRA3, Uberlândia-Senador Canedo<sup>2</sup> OSBRA4 e, finalmente, Senador Canedo-Brasília OSBRA5.

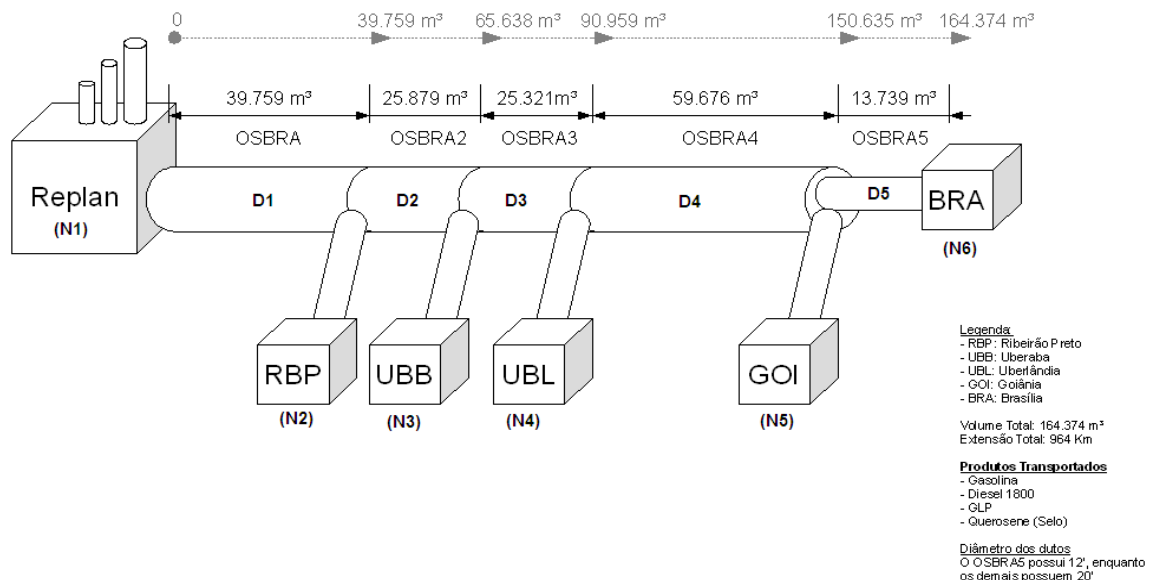


Figura 4 – Características Físicas do OSBRA (TRANSPETRO, 2011)

<sup>2</sup> Senador Canedo muitas vezes é designado como Goiânia. A base de operações da Transpetro é localizada em Senador Canedo cidade vizinha a Goiânia, que é o polo econômico regional.

Na Figura 4 têm-se os volumes de cada trecho de duto, enquanto na Tabela 2.1 encontram-se as capacidades de estocagem de cada uma das bases. É interessante observar que o volume total do duto é da mesma ordem de grandeza da capacidade de estocagem de todas as bases juntas.

Tabela 2.1 – Capacidade de Estoque por Base OSBRA (REJOWSKI, 2007)

	Diesel		Gasolina		GLP		QAV		Total	
	Tanques	Volume	Tanques	Volume	Esferas	Volume	Tanques	Volume	Tanques	Volume
Ribeirão Preto	2	30528	2	21600	2	6367	0	0	6	58495
Uberaba	2	21605	2	10208	0	0	0	0	4	31813
Uberlândia	2	30960	2	10112	3	9546	0	0	7	50618
Senador Canedo	2	80893	2	21283	7	20312	2	15772	13	138260
Brasília	3	21160	2	19785	3	9520	2	30785	10	81250
Total	11	185146	10	82988	15	45745	4	46557	40	360436

O OSBRA foi projetado para transportar toda a gama de derivados denominados claros, mas atualmente apenas dois produtos (Gasolina e Diesel) utilizam o duto. Em 2010, 8.243.375m<sup>3</sup> foram transportados, sendo 5.817.888m<sup>3</sup> de Diesel (70,6% do volume total) e 2.425.847m<sup>3</sup> de Gasolina (29,4% do volume total) – (TRANSPETRO, 2011). Ainda segundo a TRANSPETRO (2011), o último transporte de GLP ocorreu em junho de 2009, e na Tabela 2.2 pode se observar que a participação de gasolina e diesel são estáveis ao longo dos anos, com gasolina em torno de 30% e diesel 70%, enquanto a participação de outros produtos é praticamente desprezível. Nota-se, também, o crescimento de volume transportado em torno de 70% em dez anos (Tabela 2.3).

Tabela 2.2 – Participação em Bombeio OSBRA (TRANSPETRO, 2011)

Ano	Diesel	Gasolina	Gás Liquefeito	Querosene
2000	64,9%	32,6%	2,5%	0,0%
2001	70,0%	28,2%	1,5%	0,2%
2002	67,2%	30,5%	2,3%	0,0%
2003	68,9%	30,7%	0,3%	0,2%
2004	68,0%	30,4%	0,4%	1,2%
2005	68,7%	30,2%	0,2%	0,9%
2006	68,1%	31,9%	0,0%	0,0%
2007	70,3%	28,7%	1,0%	0,0%
2008	72,4%	27,3%	0,4%	0,0%
2009	72,4%	27,3%	0,3%	0,0%
2010	70,6%	29,4%	0,0%	0,0%

Tabela 2.3 – Evolução e Crescimento de Volume Transportado OSBRA (TRANSPETRO, 2011)

Ano	Diesel	Gasolina	Gás Liquefeito	QAV	Total	Cresc. ano anterior	Cresc. acumulado
2000	3.135.504	1.572.932	118.875	1.656	4.828.967		
2001	3.718.996	1.500.150	81.529	11.715	5.312.390	10,0%	10,0%
2002	4.066.172	1.848.257	137.702	0	6.052.131	13,9%	25,3%
2003	4.015.856	1.788.100	15.507	11.683	5.831.146	-3,7%	20,8%
2004	4.149.396	1.858.483	25.555	70.784	6.104.218	4,7%	26,4%
2005	4.174.032	1.835.756	12.093	52.540	6.074.421	-0,5%	25,8%
2006	4.190.237	1.962.093	0	0	6.152.330	1,3%	27,4%
2007	4.787.536	1.954.286	64.805	0	6.806.627	10,6%	41,0%
2008	5.380.223	2.028.204	27.150	0	7.435.577	9,2%	54,0%
2009	5.352.491	2.016.049	24.169	0	7.392.709	-0,6%	53,1%
2010	5.817.888	2.425.487	0	0	8.243.375	11,5%	70,7%

Apesar dos dados históricos apresentados nas Tabela 2.2 e 2.3, é provável que a partir de 2014 haja a participação de um terceiro produto no OSBRA, um Diesel de baixo teor de enxofre. Este fato decorrente de um acordo firmado entre Ministério Público Federal, ANP (Agência Nacional de Petróleo), IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), PETROBRAS e outras partes em 29 de outubro de 2008 (JUSTIÇA FEDERAL, 2008) no qual há um compromisso de inclusão gradativa nos próximos anos de tipos de diesel com uma quantidade menor de enxofre.

## 2.2. RESTRIÇÕES OPERACIONAIS E CARACTERÍSTICAS ESPERADAS DA SOLUÇÃO

Neste item são explicadas algumas características esperadas da solução desenvolvida, bem como as restrições consideradas, algumas delas não consideradas em estudos anteriores.

A solução alcançada pelo modelo deverá garantir o máximo nível de serviço em todos os órgãos do sistema OSBRA, ou seja, deverá preferencialmente trabalhar acima do nível meta de estoque, respeitando os limites físicos de armazenamento.

Esta solução será uma resposta de um modelo de otimização de movimentação, que não se propõe a determinar níveis de produção ou demanda que são dados de entrada. Portanto, para este sistema não faz sentido contabilizar custos de estoque (já que o nível de estoque é consequência da produção e demanda). Só faria sentido contabilizar custos de bombeamento se fossem considerados custos diferenciados de acordo com a horosazonalidade<sup>3</sup>, que não é aplicável no OSBRA.

Limites de vazão por trecho de duto devem ser observados. Na programação operacional, os quatro primeiros trechos da rede OSBRA não param e devem operar dentro das faixas determinadas na Tabela 2.4. Exceção faz-se ao OSBRA5 que pode parar. Contudo, quando este último trecho está em operação, também trabalha dentro de faixa especificada. Estas restrições de continuidade de fluxo devem ser respeitadas por dois motivos principais:

- i. Volume e massas envolvidas: quando se para completamente um volume e uma massa tão grande, ao retomar a operação, a energia despendida para colocar todo o sistema em operação é muito grande.
- ii. Contaminação das interfaces: quando há uma parada a interface de contaminação dos produtos aumenta sobremaneira.

---

<sup>3</sup> Tarifa de energia elétrica horosazonal é aquela que difere conforme o horário de consumo. Em algumas estações de bombeio este custo diferenciado é considerado, evitando-se operar nos horários de maior custo.

Tabela 2.4 – Faixas de Vazão OSBRA

(m <sup>3</sup> /h)	Vazão Mínima	Vazão Máxima
OSBRA1	700	1200
OSBRA2	400	1200
OSBRA3	400	1200
OSBRA4	300	850
OSBRA5	100	330

Como consequência da restrição anterior, as retiradas em cada uma das bases são realizadas na forma de sangria do fluxo e não chaveamento<sup>4</sup>, ou seja, somente uma parcela do fluxo é drenada para o terminal. E a vazão desta sangria, quando ocorrer, deverá seguir os limites apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Faixas de Vazão de Sangria OSBRA

(m <sup>3</sup> /h)	Vazão Mínima	Vazão Máxima
Ribeirão Preto	100	450
Uberaba	100	450
Uberlândia	100	450
Senador Canedo	300	850

Exceção à regra anterior mais uma vez está no último trecho, que liga Senador Canedo a Brasília. Não há sangria em Brasília e sim recebimento.

Além disto, é possível fazer bombeamentos partindo de Senador Canedo com destino a Brasília. Esta hipótese não está sendo considerada no sistema desenvolvido nesta tese, sendo a principal simplificação do modelo.

A fim de se evitar um número alto de operações de início e fim de recebimento, será respeitado um volume mínimo de batelada de sangria, bem como um intervalo mínimo entre duas sangrias adjacentes numa mesma base.

Considerando os limites de vazão nos dutos, conforme Tabela 2.5 e os volumes do oleoduto da Figura 4, verifica-se que um derivado que sai da REPLAN deve chegar a Brasília entre 8 e 21 dias. Com base neste fato, será adotado como mínimo horizonte de programação de 30 dias. Horizontes menores não traduziriam a influência da programação de bombeio dentro do horizonte do sistema.

Sabe-se que no mercado em geral, a taxa de consumo não é constante ao longo do

---

<sup>4</sup> A operação chaveamento é definida na seção 2.4.6

mês, há uma sazonalidade de demanda. Procurando seguir esta regra, pretende-se que a solução consiga seguir uma curva de demanda variável ao longo do mês.

Como todo sistema industrial, o sistema de armazenamento dos terminais necessita de manutenções. Algumas delas podem ser agendadas e, neste caso, a programação de movimentações deverá ser capaz de adaptar-se às disponibilidades de tanques para armazenamento.

Um dos grandes problemas dos dutos multiprodutos é a contaminação entre produtos (REJOWSKI e PINTO, 2002). Num duto com o volume e o tempo de residência como o OSBRA, este problema se agrava. Para minimizar este problema a Tabela 2.6 de compatibilidade será considerada no sequenciamento de produtos. O uso de produto selo entre gasolina e diesel se faz necessário e o volume típico de bateladas deste produto é em torno de 500 m<sup>3</sup>.

Tabela 2.6 – Compatibilidade de Produtos

	Querosene				
	Diesel	Gasolina	Intermediário	GLP	QAV
	(Selo)				
Diesel	ok	x	ok	x	ok
Gasolina	x	ok	ok	ok	ok
Querosene Intermediário (Selo)	ok	ok	ok	x	x
GLP	x	ok	x	ok	x
QAV	ok	ok	x	x	ok

Ainda com o intuito de minimizar contaminações, priorizam-se bateladas de bombeio com um tamanho mínimo, que deverá ser seguido pela solução.

### 2.3. LIMITES DE ESTOQUE CONSIDERADOS NAS BASES

Na operação real e no modelo proposto são considerados três tipos de limites de estoques, descritos a seguir.

#### 2.3.1. Limites Físicos

A extrapolação destes limites, como o próprio nome sugere, é impossível fisicamente. Se alguma programação sugerir a violação deles, ela de alguma forma não será seguida, quer seja por interrupção do bombeio, movimentação por outros modais ou por adiantamento ou

atraso em retiradas nas bases.

O limite físico inferior é chamado de estoque lastro e o superior limite máximo operacional.

### 2.3.2. Limites Meta

Localizados na região central da faixa de estoque, a região entre o limite de estoque meta mínimo e o limite de estoque meta máximo é a região ideal de trabalho, onde variações abruptas da demanda ou falhas no abastecimento são absorvidas sem prejuízo ao atendimento ao cliente.

### 2.3.3. Limites Desejáveis

Estes limites de estoque são níveis intermediários entre os estoques meta e os limites físicos. Procura-se não violar estes limites de estoque para evitar que os níveis se aproximem perigosamente dos limites físicos.

Os limites físicos são características do sistema, mudança nestes limites requerem mudanças nos equipamentos. Já os limites de estoque desejáveis e meta são fruto de uma política de estoques, podendo ser alterados para melhorar indicadores de nível de serviço.

Na Figura 5 pode-se observar uma disposição típica destes três tipos de limites.

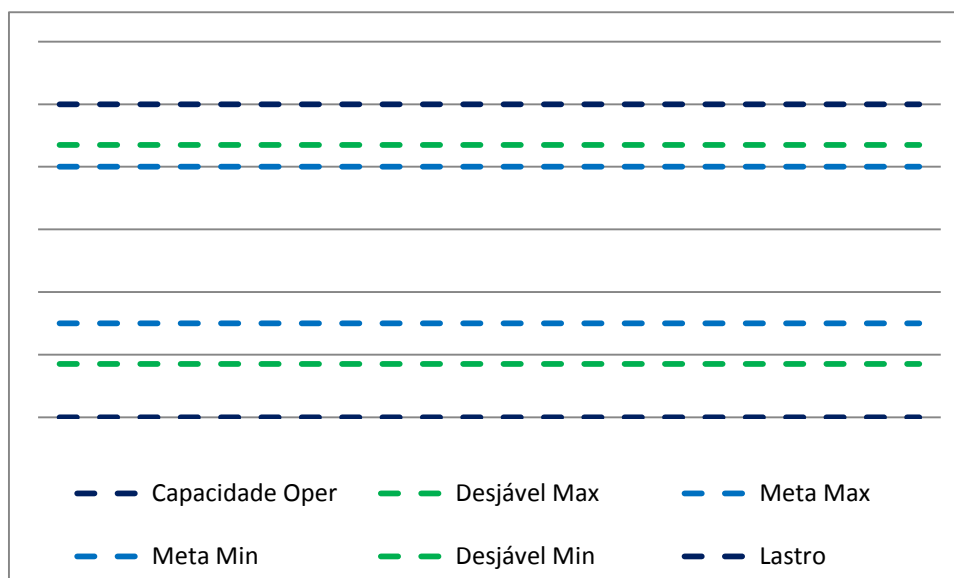


Figura 5 – Limites de Estoque Considerados



## **2.4. DEFINIÇÕES DE OPERAÇÕES TÍPICAS EM DUTOS**

Nesta subseção faz-se a definição de algumas operações características de dutos ou rede de dutos. Estas definições são necessárias para melhor compreensão do problema abordado e outros problemas correlatos e das estratégias utilizadas para resolvê-los.

### **2.4.1. Operação de Bombeio**

A operação de bombeio consiste no envio de produto a partir de uma base através do duto. Só é possível o bombeio em um duto de um único produto a partir de uma base sem que haja perda das características do produto, ou seja, não é possível bombear dois produtos concomitantemente – assim como não é possível o tráfego simultâneo, paralelo, de dois produtos no mesmo ponto do duto.

Para garantir o balanço volumétrico, ao se bombear um produto há um deslocamento dos produtos no duto e é necessário que haja recebimentos em igual volume no(s) destino(s), ao mesmo tempo em que o estoque do produto bombeado decresce na origem.

No OSBRA o bombeio é constante na origem (REPLAN) e pode ocorrer em Goiânia com direção a Brasília (no modelo de otimização proposto, só está contemplado o bombeio a partir da REPLAN).

### **2.4.2. Operação Recebimento**

Durante a operação de recebimento, o produto que está posicionado no duto, na coordenada do órgão, é recebido por este. Para haver recebimento algum produto deve estar sendo bombeado na origem.

No OSBRA, todos os órgãos, exceto REPLAN, realizam esta operação.

### 2.4.3. Passagem

Passagem consiste, como o próprio nome sugere, na operação onde uma batelada passa por um duto ao longo de um órgão, ou pelo órgão (através de seus alinhamentos), mas sem que o órgão influencie com recebimentos ou bombeios. Todos os órgãos intermediários do OSBRA podem ter operações de passagem.

### 2.4.4. Operação Pulmão

Conforme Figura 6, tem-se dois trechos de dutos AB e BC. O trecho BC tem vazão superior a AB. Deseja-se transportar uma batelada de A para C, mas para otimizar a capacidade de transporte do sistema, deve-se fazer o movimento em ambos os trechos com vazão máxima. Para tal, realiza-se uma operação pulmão, que consiste em dividir o movimento em dois:

- i. Primeiro a batelada é movimentada de A para B, sendo recebida em um tanque de B, à vazão máxima do trecho (200 uv/h).
- ii. Quando pelo menos um volume compatível com a razão das vazões é recebido em B, este inicia o bombeamento de B para C à vazão máxima do trecho (400uv/h).

Enquanto a segunda parte do pulmão (bombeio BC) não inicia, o trecho BC pode ser ocupado por outra batelada, aproveitando-se de melhor maneira, desta forma, a capacidade da rede.

No OSBRA só é possível, embora rara, a realização de operação pulmão em Goiânia (com fluxo para Brasília), mas nesta tese a mesma não está incluída.

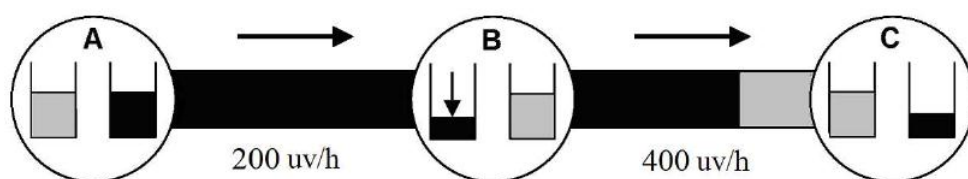


Figura 6 – Operação Pulmão

### 2.4.5. Operação Sangria

A sangria é um tipo de recebimento no qual parte do fluxo que vem no duto segue para o órgão seguinte e parte é retirada no órgão corrente. Na Figura 7, o duto tem um fluxo inicial de  $800\text{m}^3/\text{h}$ , o órgão A recebe uma sangria de  $150\text{m}^3/\text{h}$ , os restantes  $650\text{m}^3/\text{h}$  seguem para o órgão seguinte do duto. Portanto temos a montante do órgão A  $800\text{m}^3/\text{h}$  de vazão, no órgão A sangram  $150\text{m}^3/\text{h}$  e a jusante há o fluxo de  $650\text{m}^3/\text{h}$  restantes, conservando, desta forma, o balanço volumétrico.

No OSBRA, Ribeirão Preto, Uberaba e Uberlândia trabalham exclusivamente com recebimento do tipo sangria, enquanto Goiânia trabalha preferencialmente com sangria. Enquanto Brasília, por ser o último ponto do duto, faz somente o recebimento total.

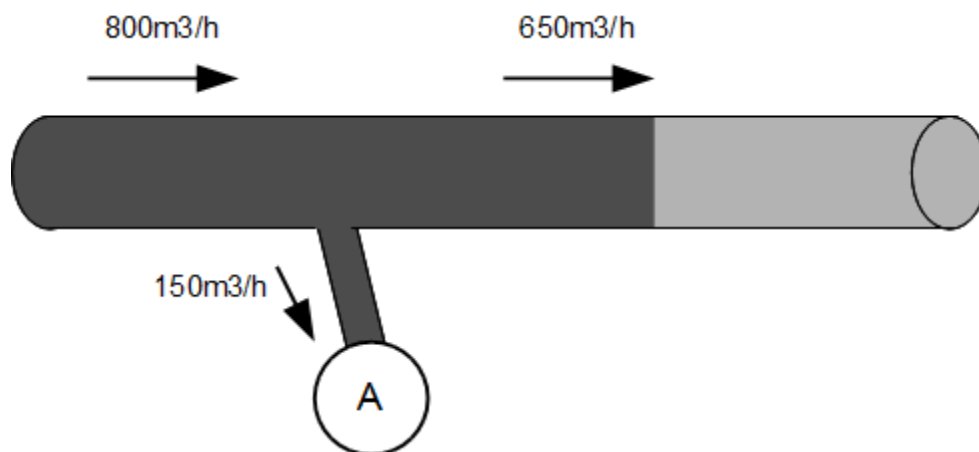


Figura 7 – Operação de Sangria

### 2.4.6. Chaveamento de Linha

O chaveamento é quando, ao contrário da sangria, um recebimento engloba todo o fluxo do duto, paralisando o fluxo a jusante, conforme representado na Figura 8.

No OSBRA, apenas Goiânia pode operar chaveando a linha, mas por questões de simplificação nesta tese esta característica ainda não está contemplada.

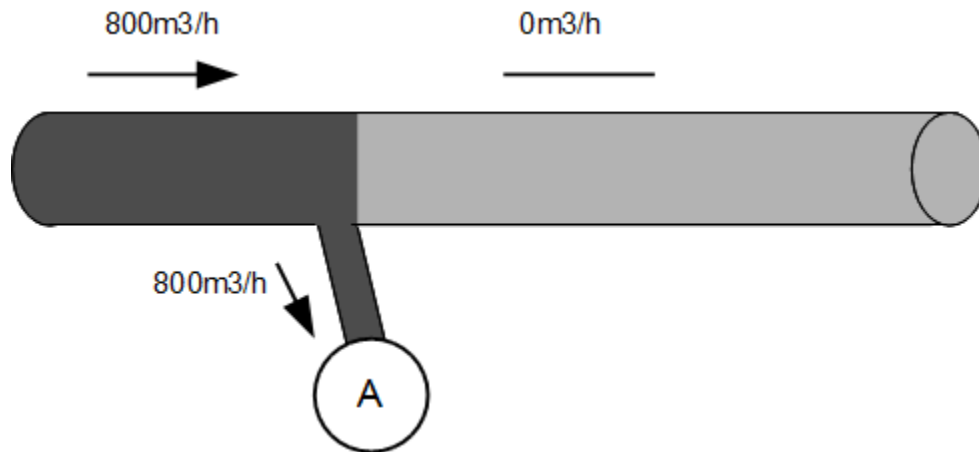


Figura 8 – Chaveamento de Linha

#### 2.4.7. Operação Reversão

A operação reversão objetiva inverter o sentido atual de um duto para operá-lo no sentido inverso. Na Figura 9 este processo pode ser observado. Na Figura 9-a, o duto está operando no sentido N8-N7, deseja-se deslocar as bateladas 1 e 2 para N7 e depois reverter o duto. Para tal inicia-se o bombeio da batelada 3, de reversão (Figura 9-b). Quando o duto está completamente cheio com a batelada de reversão (Figura 9-d), começa-se a operação no sentido inverso com o bombeio da batelada 4 que tem origem em N7 e destino N8 e a partir de então o duto segue operando no sentido N7-N8. É importante observar que a batelada 3, de reversão, sai de N8 e não chega a ser recebida em N7, apenas completa o duto e retorna para N8. Assim, a batelada 3 é uma batelada auxiliar para realizar o procedimento de reversão.

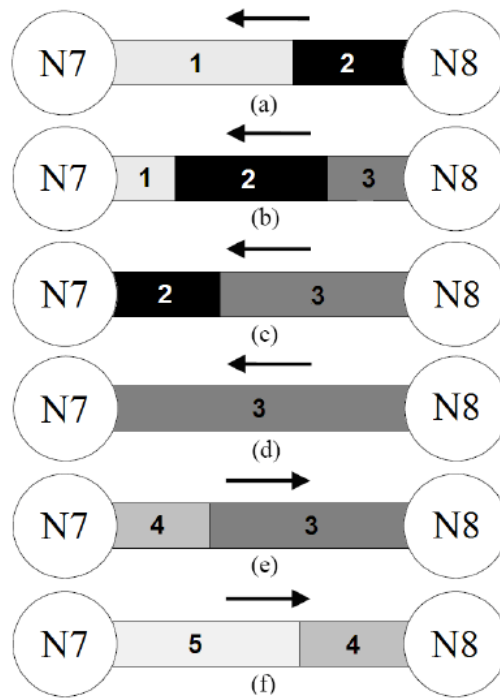


Figura 9 – Operação Reversão

No OSBRA, por ser um duto unidirecional, não ocorrem reversões.

#### 2.4.8. Injeção

A injeção é uma operação na qual o fluxo oriundo de dois trechos de dutos distintos se une, aumentando o fluxo no trecho seguinte.

Esta operação pode ser efetuada com o mesmo produto nos trechos de duto de origem, onde o ganho está em aproveitar o potencial de bombeamento das duas fontes e aumentar o fluxo a jusante. Ou então, como na Figura 10, em cada um dos dutos de origem há produtos distintos cujas características físico químicas se combinam a fim de formar um terceiro produto que segue pelo duto resultante.

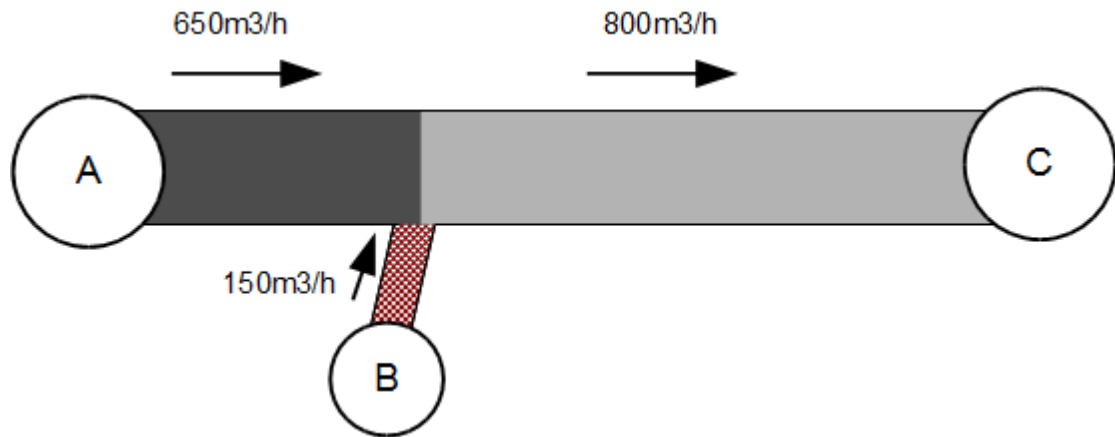


Figura 10 – Operação Injeção

Pelas características operacionais do OSBRA, não é realizada a operação de injeção nele.

#### 2.4.9. Degradação

A degradação é um processo através do qual um produto após uma movimentação<sup>5</sup> se transforma em outro. Este processo pode ser planejado devido a uma necessidade operacional ou pode ocorrer de forma indesejada devido a uma falha de planejamento ou de operação.

No caso de degradações indesejadas, normalmente um produto é contaminado, perdendo suas qualidades físico-químicas e, por consequência, ele passa a ser classificado como outro produto final, de qualidade e valor agregado inferior ou como produto intermediário, que necessita de um reprocessamento para que possa ser comercializado. Para evitar estes casos de degradação, no *scheduling* do OSBRA deve ser respeitada a Tabela 2.2 de compatibilidade entre produtos.

Muitas vezes há uma necessidade operacional e degradações são planejadas, com um produto sendo transformado em outro de características de qualidade inferior para atender a demanda. Ou um produto, em pequena quantidade, é dissolvido no volume de outro sem causar impactos na qualidade do segundo produto. Na operação do OSBRA, o querosene de transferência é utilizado como selo para evitar a contaminação entre gasolina e diesel. Ao chegar a Goiânia e Brasília este querosene é dissolvido no estoque de diesel e gasolina numa proporção de 70% para diesel e 30% para gasolina, sem causar impacto na qualidade destes

<sup>5</sup> A degradação pode ocorrer devido a outras causas, principalmente de processo e armazenagem. Contudo, para o problema de transporte, a movimentação inadequada é a causa relevante.

dois produtos.

## **2.5. ROTINA DE OPERAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DO OSBRA**

Mensalmente é reelaborado o plano de abastecimento de derivados de todo o Brasil. Neste plano consta as previsões de demanda de todo o mercado, produção em território nacional da PETROBRAS e de terceiros, importação e exportação, transferências entre bases e movimentações agregadas necessárias para atender aos mercados.

Neste plano tem-se a demanda mensal de movimentações para atender os mercados adjacentes ao OSBRA. Com esta informação os técnicos responsáveis pela programação do OSBRA estimam a ocupação do duto e sinalizam, se for o caso, a necessidade de contratação de outros modais de transporte para o próximo período.

Ao mesmo tempo, os programadores mudam o perfil da programação do duto (aumentando ou diminuindo a vazão e razão entre os tamanhos de bateladas) a fim de atender estas previsões.

A execução da programação, a realização de entregas e os reflexos nos níveis de estoque atuais e projeções futuras são monitoradas diariamente. Deste trabalho resulta a reprogramação diária do duto.

Adversidades devido a falhas na previsão ou na programação muitas vezes ocorrem. Quanto maior a antecedência de atuação para mitigá-las menor o seu impacto negativo.

As ações de mitigação normalmente seguem dois caminhos:

- Negociação com os clientes para antecipar ou atrasar a data de retirada. Normalmente quando se trata de datas próximas não há problemas. Em último caso esta negociação envolve a mudança de base de retirada.
- Contratação de outros meios de transporte para auxiliar a operação dutoviária.





### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são descritos uma série de trabalhos precursores relacionados ao transporte em dutos e demais problemas correlatos ao problema de estudo nesta tese, bem como são definidos e referenciados conceitos relativos à otimização e as técnicas de resolução e modelagem para problemas de otimização.

#### 3.1. MODELOS MATEMÁTICOS E PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO

O conceito de modelo é aplicado em muitas áreas da ciência, e corresponde a qualquer ente que represente um sistema real, podendo ser uma maquete, um modelo gráfico, ou no caso de pesquisa operacional – um modelo matemático (WILLIAMS, 1999). Como toda a representação, o modelo matemático é uma aproximação do sistema real. O quão próximo ele é da realidade depende da complexidade do sistema real bem como do custo da aproximação *versus* o resultado esperado.

Nos problemas de otimização, normalmente procura-se maximizar o lucro, o nível de serviço, confiabilidade ou outro aspecto positivo do sistema ou/e minimizar aspectos negativos, como custos, *lead time*, retrabalhos, etc. Para tal os limites, restrições, características gerais e os indicadores a se maximizar ou minimizar devem ser traduzidos na forma de equações, inequações e relações lógicas num modelo matemático. Este modelo deve representar o sistema, independentemente dos dados do cenário.

Os dados que compõem o cenário são aqueles mutáveis no tempo, um estado inicial do sistema. Ao compor-se um cenário, estes dados transformam-se nos parâmetros de entrada do modelo.

O modelo matemático, caso possua somente equações e inequações lineares e variáveis contínuas é chamado de modelo linear. Quando alguma não linearidade é inserida no modelo ele passa a ser classificado como um modelo não linear. Do mesmo modo, quando alguma descontinuidade é inserida, o modelo passa a ser classificado como inteiro, podendo ser inteiro linear ou inteiro não linear (BIEGLER e GROSSMANN, 2004).

### **3.1.1. Complexidade dos Modelos**

Um modelo matemático também é classificado de acordo com a complexidade inerente a sua resolução, podendo ser:

- Classe P: são problemas que possuem funções que conseguem ser resolvidos em tempo polinomial (SCHRIJVER, 1999).

- Classe NP: são problemas em que não se garante a solução em tempo polinomial, independentemente dos dados de entrada (número e relações entre as variáveis) (SCHRIJVER, 1999).

- Classe NP-Completo: Os NP-Completo são um subconjunto dos NP, composto pelos problemas mais difíceis desta classe, onde o tempo de resolução cresce exponencialmente com a ordem de grandeza dos dados de entrada. É provado matematicamente, que se houver um algoritmo que garanta solução em tempo polinomial para um problema NP-Completo, garante-se para todos os NP (SCHRIJVER, 1999).

### **3.1.2. Técnicas de Resolução**

Conforme a classe de complexidade e a aplicação (tempo que se dispõe para execução e importância de uma maior exatidão na resposta) diferentes técnicas de resolução podem ser usadas.

#### **3.1.2.1. Heurísticas e Metaheurísticas**

Heurísticas são atalhos na estratégia de busca, que visam diminuir o espaço de busca ou atingir uma boa solução viável (KENNEDY, EBERHART e SHI, 2001). São regras que aplicadas ao problema levam a uma solução com um esforço computacional mínimo.

As heurísticas construtivas se valem de características do problema ou regras de operação para gerar uma boa solução.

As chamadas metaheurísticas são técnicas, normalmente baseadas em estratégias de inteligência artificial, que com pequenas alterações podem ajudar a otimizar uma gama de problemas e modelos matemáticos (RIBAS, 2003).

Tanto as heurísticas quanto as metaheurísticas não garantem a solução ótima e, em alguns casos, não garantem ao menos uma solução viável. Mas na maioria das ocasiões chegam a uma solução próxima do ótimo com um tempo computacional razoável, mesmo para problemas NP (RODRIGUES, 2000).

Algumas das principais metaheurísticas da literatura aplicadas em problemas de otimização dutoviária são:

- VNS: do inglês *Variable Neighborhood Search* (busca em vizinhança variável) baseia-se na ideia de, a partir de uma solução, definir uma vizinhança (que muda a cada iteração) e fazer uma busca por melhores soluções entre esta vizinhança e a solução inicial. Caso uma solução melhor seja encontrada, ela passará a ser a nova solução inicial – este método é repetido por várias iterações até atingir algum critério de parada (SOUZA FILHO, FERREIRA FILHO e DE LIMA, 2007).

- Algoritmos Genéticos (AG): inspirado na teoria de evolução das espécies, este algoritmo consiste numa população de soluções que evolui, trocando entre si os seus genes (características da solução). As soluções (indivíduos) têm uma chance maior de perpetuar sua carga genética se apresentarem um fenótipo (função objetivo) melhor. Esta metaheurística é uma das mais testadas em vários campos da pesquisa operacional (MICHALEWICZ, 1996).

- CLP (*Constraint Logic Programming* – programação por restrições lógicas ou, programação lógica por restrições): através da tradução das restrições lógicas intrínsecas às características do modelo e da solução esperada consegue-se limitar o domínio das variáveis inteiras. Estas restrições são comumente representadas por predicados. E com esta limitação de domínio consegue-se chegar a soluções ou auxiliar outros métodos a encontrar soluções. Dependendo de como são feitas as modificações no modelo original, com a inclusão de novas restrições, nem sempre é possível se garantir a otimalidade (WILLIAMS, 1999).

- *Beam Search*: é uma heurística de busca que explora o grafo de soluções vizinhas limitando a busca aos nós mais promissores. O método de escolha deste nó é configurado de acordo com as características do problema, a profundidade desta busca também é configurável. É uma heurística aplicável em situações onde é necessária uma busca local com baixa carga computacional (SASIKUMAR *et al.*, 1997).

- Multiagentes: é uma metaheurística baseada em agentes independentes cooperativos especializados em algum aspecto ou subconjunto do problema. Através de troca de informações e regras que podem envolver vários tipos de estratégia e técnicas de inteligência artificial, os vários agentes gerenciam e chegam a bons resultados para as várias partes do problema, atingindo, desta forma, uma boa solução para o problema como um todo

(FERBER, 1999).

### 3.1.2.2. Programação Matemática

A programação matemática é uma técnica que busca a resolução exata de modelos através de métodos algébricos, podendo ser, de acordo com as características das equações, inequações e variáveis, um problema de Programação Linear (PL), Programação Linear Inteira Mista (PLIM), Programação Não Linear (PNL) ou Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM).

A PL é uma técnica de resolução de uma grande gama de problemas de otimização e alocação de recursos. Grande parte dos problemas reais pode, com alguma aproximação, ser modelado e resolvido desta forma. O método SIMPLEX de resolução garante a resolução da maioria dos problemas desta classe a um baixo custo computacional (HILLIER e LIEBERMAN, 2001).

Os problemas inteiros têm em seus métodos de solução, a resolução de uma série de problemas de PL. Grande parte dos PLIM se classifica como NP ou NP-Completo. Segundo Hillier e Lieberman (2001), os problemas inteiros (oriundos principalmente de processos de decisão, alocação de recursos e sequenciamento) têm evoluído muito nas suas técnicas de solução via PLIM, aprimorando muito o seu desempenho. A Tabela 3.1 mostra a evolução do *solver* IBM-CPLEX (IBM, 2011) a partir do ano 2000, onde se verifica um grande êxito no desenvolvimento de técnicas para solução de problemas inteiros, que são os de mais alto custo computacional.

Tabela 3.1 – Evolução do IBM – CPLEX (IBM, 2011)

Versão	Melhora de Desempenho no Tempo de Execução
CPLEX 12.2 (2010)	50% geral, 2.7X em 1.000 segundos ou mais
CPLEX 12.0 (2009)	30% geral, 2X em 1.000 segundos ou mais
CPLEX 11 (2007)	15% abaixo um minuto, 3X em 1-60 minutos, 10X em uma hora ou mais
CPLEX 10 (2006)	35% geral, 70% em “modelos particularmente difíceis”
CPLEX 9 (2003)	50% em “modelos difíceis”
CPLEX 8 (2002)	40% geral, 70% em “problemas difíceis”
CPLEX 7 (2000)	60% em “problemas inteiro misto difíceis”

Frequentemente, em outras aplicações pode-se depara com problemas de

características não lineares. Algumas destas características não lineares, representadas por meio de inequações não lineares, podem ser aproximadas por linearização, normalmente linearizações não contínuas. Em outros casos é necessário trabalhar com modelos de programação não linear (PNL) e, ao contrário dos problemas de PL, os PNL não convexos não possuem um método eficiente que garanta a solução ótima, nem o alcance de soluções factíveis (HILLIER e LIEBERMAN, 2001).

Os problemas modelados e resolvidos por PNLIM utilizam técnicas de PLIM e PNL combinadas para a sua resolução e, ao combinar-se, a complexidade de um problema PLIM com as dificuldades de convergência de um PNL, tem-se uma classe de problemas de difícil obtenção de soluções viáveis (BIEGLER e GROSSMANN, 2004).

### 3.1.3. Representação do Tempo

Mendez *et al.* (2006), conforme na Figura 11, exemplificam as diferentes formas de se representar o tempo em problemas de *scheduling*, sendo elas:

- Intervalos de tempo globais, ou tempo discreto: quando os intervalos são pré-definidos e idênticos, considera-se que todo evento tem início e fim sincronizados com as mudanças de intervalo. Ou seja, se for considerado como uma unidade de tempo discreto de quatro horas, todos os eventos e atividades de *scheduling* terão seu início e fim aproximados para o início ou fim de múltiplos de quatro horas.

- Pontos Globais de Tempo (contínuo): os intervalos de tempo têm sua duração variável, calculada pelo modelo e dependentes de cada evento.

- Eventos Unitários Específicos (contínuo): os eventos têm o seu tempo de início e fim calculados no tempo contínuo.

- *Slots* de Tempo (contínuo): os eventos de cada unidade ocorrem em *slots* calculados no tempo contínuo.

- Precedência Imediata e Geral (contínuo): são calculadas as precedências imediatas e gerais para cada um dos eventos.

Uma vantagem imediata da utilização de tempo contínuo é uma maior exatidão no cálculo dos tempos dos eventos.

Por outro lado a modelagem com tempos discretos é mais simples e intuitiva, facilitando tanto o processo de modelagem como a análise dos resultados. Supondo-se a modelagem de um mesmo problema via abordagens contínua e discreta, a modelagem de

tempo discreta tende a gerar um número de variáveis inteiras consideravelmente maior do que a contínua, mas este número de variáveis não é traduzido integralmente em desempenho computacional, uma vez que a diferença de relaxação no caso da modelagem discreta é, via de regra, menor, acelerando deste modo, a convergência de modelos PLIM (MAGATÃO, 2001).

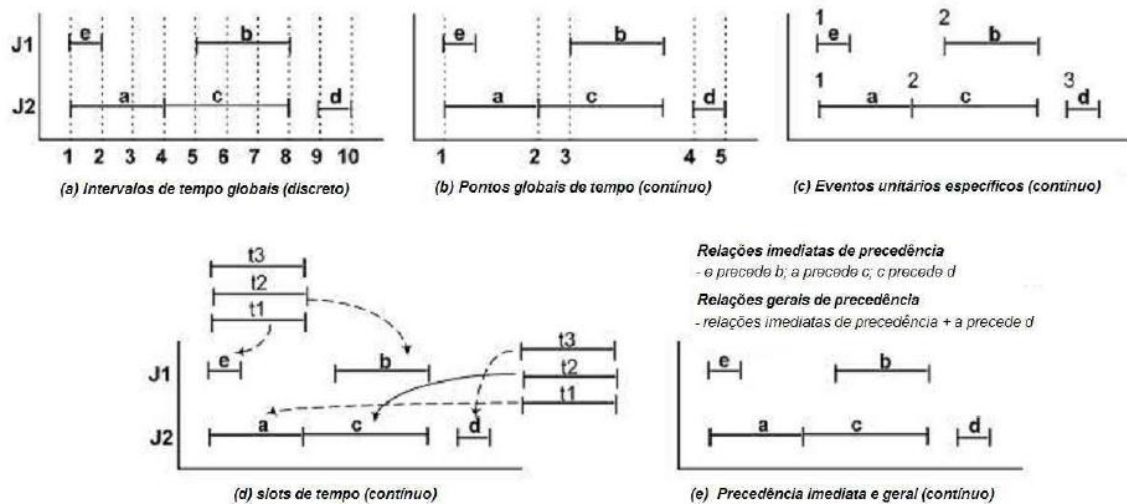


Figura 11 – Representação do Tempo (MENDEZ *et al.*, 2006)

## 3.2. PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO DUTOVIÁRIA

Nesta seção uma série de trabalhos sobre otimização de polidutos são apresentados e analisados. Dá-se um enfoque maior a dutos que transportam derivados. A seção é dividida em subseções. Esta divisão serve para que seja possível uma análise comparativa mais exata entre as diversas abordagens existentes, pois há diferenças profundas quanto às características e dificuldades dos problemas envolvidos em cada uma das classes.

### 3.2.1. Abastecimento de Refinarias

Alguns dos primeiros problemas de programação de dutos na cadeia de suprimento da indústria de petróleo versam sobre o *scheduling* do abastecimento de óleos crus para refinarias. Esses problemas geralmente envolvem a correta sintonia, a partir da chegada de navios e necessidade de petróleo das torres de destilação da refinaria, da programação do

descarregamento dos navios, da utilização do parque de tanques no porto e na refinaria, bem como do sequenciamento dos dutos e transferências.

Para a melhor compreensão deste problema é importante situar que os petróleos têm várias qualidades distintas e para a correta operação das unidades de destilação é necessário que o petróleo com as características adequadas esteja disponível a cada momento.

Um problema deste tipo foi, em 1996, dividido em dois modelos de programação linear inteira mista. O primeiro tratava do abastecimento da unidade de destilação através dos tanques da refinaria e destes tanques pelo duto – a função objetivo é minimizar o estoque dos tanques que estão em espera ao longo do horizonte de tempo. O segundo problema consiste em achar uma solução viável para atender os requisitos do primeiro problema a partir dos dados de chegada de navios e estoque no porto. O horizonte de programação tratado foi de 30 dias, divididos em períodos discretos de um dia. Foram considerados quatro tipos de óleo, sete tanques na refinaria, oito no porto e duas unidades de destilação (SHAH, 1996).

Lee *et al.* (1996) abordam esta mesma classe de problemas mas, neste caso, o problema é modelado sem envolver o duto. Considera-se possível o armazenamento de misturas de petróleo e não somente óleos crus puros nos tanques da refinaria que alimentam as unidades de destilação. Com isto é necessário que se calcule as qualidades resultantes das misturas, o que acarretaria em restrições com equações não lineares, mais especificamente bilineares resultando em um problema não linear inteiro misto. Como recurso de modelagem, os autores transformaram as equações não lineares em um conjunto de equações inteiras facilitando, desta forma, a sua resolução. No estudo de caso, foi otimizado um cenário composto de três navios, seis tanques de armazenamento no porto, quatro na refinaria e três torres de destilação. O horizonte de programação foi de quinze dias, divididos em períodos discretos de um dia.

No trabalho desenvolvido por Pinto, Joly e Moro (2000), dentre outros problemas, é abordado um da classe de alimentação de refinarias. Os autores utilizaram modelagem de tempo contínua, considerando tempo de *setup* para carga do tanque na unidade de destilação e abrangendo o *scheduling* de um duto, três tipos de óleos, seis tanques na refinaria e uma unidade de destilação, que representam a refinaria REVAP em São José dos Campos, Brasil. O horizonte de programação foi de 112 horas.

Magalhães e Shah (2003) consideram o problema de *scheduling* de crus da REFAP. O problema envolve os tanques do terminal, um duto, dois tanques da refinaria e duas unidades de destilação, conforme Figura 12. O trabalho trata restrições semelhantes às consideradas por Pinto, Joly e Moro (2000) e também trata o tempo de forma contínua – mas são acrescentadas

complexidades como a presença de duas unidades de destilação, e o *scheduling* do terminal e navios.

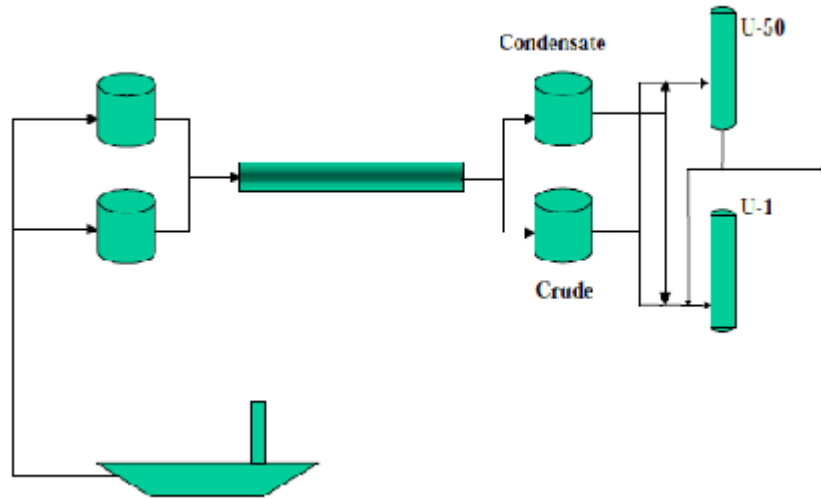


Figura 12 – Alimentação de Crus da Refap (MAGALHÃES e SHAH, 2003)

Na Tabela 3.2 pode-se observar o resumo das características dos trabalhos analisados sobre o abastecimento de refinarias.



Tabela 3.2 – Resumo dos Trabalhos: Alimentação de Refinarias

Autor	Abrangência	Técnica	Solução	Modelagem Temporal	Horizonte
Shah (1996)	navios, tanques porto, tanques refinaria, duto, alimentação destilação	Dois Modelos PLIM	Viável	Discreta	30 dias
Lee <i>et al.</i> (1996)	navios, tanques porto, tanques refinaria, duto, alimentação destilação, mistura de Petróleos	PLIM	Sub ótimo	Discreta	15 dias
Pinto, Joly e Moro (2000)	navios, tanques porto, tanques refinaria, duto, alimentação destilação	PLIM	Ótimo	Contínua	112 horas
Magalhães e Shah (2003)	navios, tanques porto, tanques refinaria, duto, alimentação destilação	PLIM	Ótimo	Contínua	96 horas

### 3.2.2. Escoamento de Derivados - Duto com Uma Origem e Um Destino

Este problema de otimização consiste em um único poliduto que liga dois pontos operacionais. A maioria dos trabalhos analisados trata dutos bidirecionais.

Os principais desafios são: escoar a produção e atender a demanda de ambos os pontos, visando minimizar o número de bateladas, e ao mesmo tempo observar restrições de contaminação entre produtos. Quando o duto é bidirecional adiciona-se, ainda, a necessidade de equacionar quando a reversão será feita e qual produto será utilizado para reverter o sentido do fluxo no duto, uma vez que esta operação consome tempo e o produto utilizado deixará a quantidade de volume do duto indisponível durante o processo de reversão.

Milidiu e Liporace (2003) estudaram a complexidade do problema de *scheduling* de um duto com restrição de interface, e provaram que este problema pertence à classe *NP-Hard*.

Magatão, Arruda e Neves Jr. (2004) otimizam o *scheduling* de um poliduto bidirecional que liga uma refinaria a um porto através de Programação Linear Inteira Mista

(PLIM). O tempo é modelado como discreto. Oito produtos são considerados, quatro enviados da Refinaria para o Porto e quatro no sentido inverso. A escolha de qual tanque é envolvido em cada operação e o custo de energia elétrica variável são outros fatores complicadores incluídos neste modelo. O horizonte de otimização é de 120 horas (cinco dias). Análises de desempenho computacional mostraram a natureza exponencial da granularização do tempo. Ao se diminuir a unidade base de tempo de 6 horas para 1 hora, o tempo de execução aumentou em mais de duzentas vezes.

Os mesmos autores voltam a abordar o mesmo problema do poliduto que liga uma refinaria a um porto – com as mesmas restrições utilizadas no trabalho anterior (MAGATÃO, ARRUDA e NEVES-JR., 2004), mas neste caso utiliza-se uma modelagem de tempo contínua com uma abordagem híbrida de busca orientada por restrições (*constraint logic programming* - CLP) e PLIM. Os resultados são comparados com PLIM e CLP puros, inclusive com um número maior de produtos (até doze). A abordagem híbrida obteve um ótimo desempenho computacional, sendo superior aos outros métodos de solução (MAGATÃO, ARRUDA e NEVES-JR., 2008) (MAGATÃO, ARRUDA e NEVES-JR, 2011).

Um poliduto bidirecional que liga dois terminais, utilizando modelagem de tempo discreta é otimizado na dissertação apresentada por Hassimotto (2007). Neste trabalho é considerada também a contaminação gerada pela interface entre produtos enquanto a escolha de tanques não faz parte do escopo. O número de produtos envolvidos é de quatro e o horizonte de programação é de uma semana. As decisões acerca da programação são formuladas através de representação disjuntiva e posteriormente transformadas em programação linear inteira mista. Em seus resultados, a otimização foi interrompida ao chegar ao tempo limite estipulado, não sendo garantida a otimalidade.

Relvas *et al.* (2006) otimizam o agendamento de um duto unidirecional real localizado em Portugal, que liga uma refinaria a um terminal. O objetivo principal é garantir um máximo nível de serviço através do atendimento à demanda diária dos clientes. Além do sequenciamento do duto, da temporização e do tamanho da batelada, o controle de estoques do parque de tanques do terminal também é tratado. Para o sequenciamento, são levadas em consideração restrições de interface entre produtos, ou seja, se o contato entre dois produtos acarreta contaminação, ele é penalizado. O tempo é modelado de forma contínua atingindo um horizonte de planejamento de um mês. Para tal, duas propostas de solução são implementadas: uma puramente PLIM e outra com uma fixação prévia da ordem das bateladas (fornecida por especialistas usuários do sistema). Esta fixação prévia acaba por simplificar o problema, reduzindo o tempo de execução do modelo em mais de dez vezes,

atingindo resultados semelhantes à abordagem puramente PLIM. Ambas as propostas, se comparadas com soluções feitas por especialistas, conseguem uma utilização de duto superior e, por consequência, um melhor nível de estoques no terminal.

Este mesmo grupo de pesquisadores volta a abordar tal problema, propondo uma arquitetura de solução descrita na Figura 13. A execução do modelo pode ser de duas formas:

- (i). com o auxílio de uma heurística de determinação de sequência de bateladas, que tem como objetivo reduzir a carga computacional com baixo impacto na qualidade da solução,
- (ii). com uma sequência livre de bateladas a ser determinada pelo modelo PLIM (esta segunda opção é indicada somente para horizontes de programação de no máximo alguns dias).

Nas duas estratégias o modelo PLIM é acionado para chegar à solução ótima de sequência, tamanho e tempos de batelada. Caso o *scheduling* resultante apresente infactibilidades, o módulo de *scheduling* reativo é acionado procurando chegar a uma nova solução não distante da original e que supere as infactibilidades (RELVAS, BARBOSA-PÓVOA e MATOS, 2009).

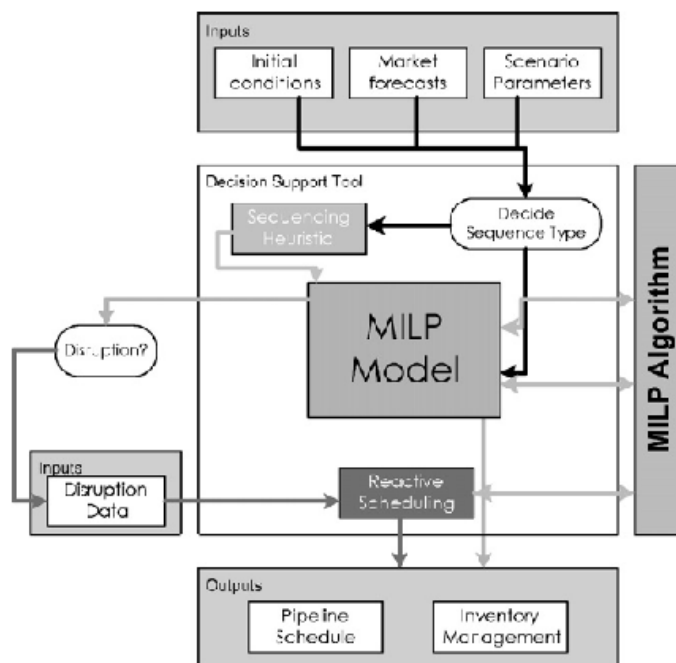


Figura 13 - Descrição da Arquitetura de Resolução (RELVA, BARBOSA-PÓVOA e MATOS, 2009)

Boschetto *et al.* (2010) tratam o mesmo problema, mas considerando uma decomposição arquitetural diferente: não utiliza uma heurística e sim um modelo MILP<sup>6</sup> para o sequenciamento e tamanho dos lotes e outro para temporização e acompanhamento exato dos níveis de estoque, conforme Figura 14. Há ainda um módulo de análise de soluções que realimenta informações de infactibilidades para uma nova iteração do sistema. Os resultados foram validados com os dados obtidos por Relvas, Barbosa-Póvoa e Matos (2009), atingindo resultados com qualidade semelhante, mas com um tempo computacional menor do que os atingidos pelo trabalho anterior (RELVAS, BARBOSA-PÓVOA e MATOS, 2009).

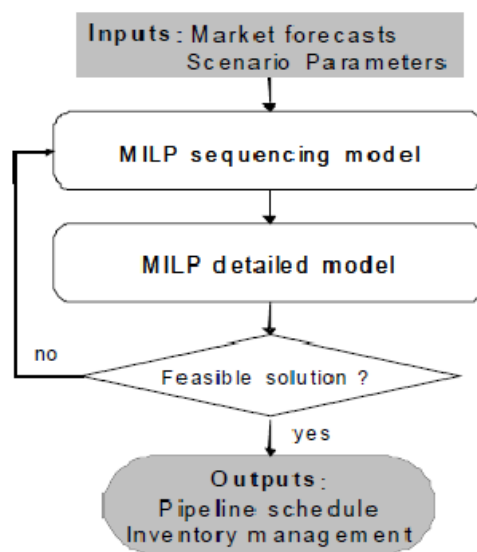


Figura 14 - Descrição da Arquitetura de Resolução  
(BOSCHETTO *et al.*, 2010)

Na Tabela 3.3 pode-se observar o resumo das características dos trabalhos analisados sobre o escoamento de derivados através de um duto com uma origem e um destino.

---

<sup>6</sup> MILP significa programação linear inteira mista, do inglês: *mixed integer linear programming*.

Tabela 3.3 – Resumo dos Trabalhos: Escoamento de Derivados em um Duto com Uma Origem e Um Destino

Autor	Abrangência	Técnica	Solução	Modelagem Temporal	Horizonte
Milidiu e Liporace (2003)	Estudo de Complexidade	-	-	-	-
Magatão, Arruda e Neves Jr. (2004)	8 produtos, duto reversível, tanques, custo de energia variável	PLIM	Ótima	Discreta	120 horas
Hassimotto (2007)	4 produtos, duto reversível, contaminação entre produtos	PLIM	Sub-ótima	Discreta	7 dias
Magatão, Arruda e Neves Jr. (2008) e Magatão, Arruda e Neves Jr. (2011)	12 produtos, duto reversível, tanques, custo de energia variável	PLIM + CLP	Ótima	Contínua	120 horas
Relvas <i>et al.</i> (2006)	duto unidirecional, 6 produtos, tanques, contaminação entre produtos	PLIM	Sub-ótima	Contínua	30 dias
Relvas, Barbosa-Póvoa e Matos (2009)	duto unidirecional, 6 produtos, tanques, contaminação entre produtos, <i>Scheduling</i> reativo	PLIM + Heurística + Realimentação	Sub-ótima	Contínua	Até 6 meses
Boschetto <i>et al.</i> (2010)	duto unidirecional, 6 produtos, tanques, contaminação entre produtos, <i>Scheduling</i> reativo	PLIM + PLIM + Realimentação	Sub-ótima	Contínua	30 dias

### 3.2.3. Escoamento de Derivados - Rede de Dutos

Nesta subseção são analisados problemas de otimização de redes de dutos. A dificuldade para resolução desta classe de problemas é elevada, pois além da complexidade encontrada nos problemas de um só duto, ainda há o fato de que os dutos podem ser compartilhados por duas ou mais rotas<sup>7</sup>, havendo grande concorrência de recursos. As modelagens, via de regra, não possuem como premissa tentar atingir a otimalidade, sendo normalmente utilizadas heurísticas, metaheurísticas, técnicas de decomposição do problema ou simplificações para que soluções de boa qualidade possam ser atingidas em tempos computacionais não proibitivos.

Camponogara (1995), em sua dissertação, estudou a rede de dutos da PETROBRAS da área de São Paulo (Figura 15). Primeiramente propôs um modelo PLIM, com o tempo dividido em períodos discretos e seu reflexo nos dutos, ou seja, cada duto foi fracionado em volumes equivalentes à uma hora de bombeio. Devido as dificuldades de se obter soluções, foi escolhida uma abordagem heurística, com o problema total sendo dividido em três subproblemas: geração dos *jobs*, escolha das rotas e a programação em si. Estes componentes foram integrados a um time assíncrono (multiagentes), atingindo resultados satisfatórios. Com um tempo de execução de cerca de nove horas (com máquinas daquela época), foram conseguidas programações para 120h, com desabastecimento a partir da centésima hora em alguns pontos. No entanto o perfil de programação obtido não é totalmente aderente à operação real. O grande mérito foi a vanguarda no tratamento do problema, a proposta de uma modelagem em três subproblemas e o alcance de soluções viáveis.

---

<sup>7</sup> Rota é o conjunto ordenado de arcos (no caso dutoviário, trechos de dutos) que é utilizado para o transporte entre uma origem e um destino. Entre a mesma origem e o mesmo destino pode haver mais de uma rota, que utilize arcos diferentes e até modais diferentes.



este tipo de problema pertence à classe *NP-Hard* e ainda propõe um algoritmo de solução de grafos genérico e prova a redução da complexidade com a aplicação deste algoritmo.

Na Figura 16 tem-se uma rede dutoviária composta de duas refinarias, cinco terminais e nove dutos (sendo um bidirecional). Há três tipos de produtos considerados. Este problema é modelado com tempo discreto utilizando algoritmos genéticos para se obter soluções. O cromossomo é uma matriz representando qual produto é bombeado em cada instante de tempo em cada um dos nove dutos, sendo que o duto bidirecional tem duas origens possíveis. Logo o cromossomo é uma matriz de dez origens por  $n$  períodos – e os valores de cada campo são inteiros 0, 1, 2 ou 3 (cada número representando um produto e zero o não bombeamento). Com 12.000 gerações de 21 indivíduos, soluciona-se um problema com 15 períodos de tempo (DE LA CRUZ *et al.*, 2003).

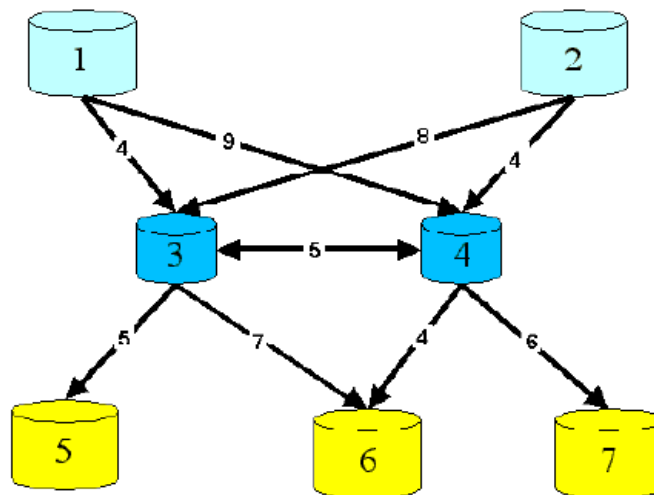


Figura 16 – Rede de Dutos Hipotética (DE LA CRUZ *et al.*, 2003)

Este mesmo problema da Figura 16, é tratado novamente por De la Cruz *et al.* (2005), mas desta vez os autores, além da abordagem por algoritmos genéticos (chamada no artigo de MOEA – *Multi Objective Evolutionary Algorithm*), fazem uma implementação em PLIM e uma híbrida PLIM + MOEA, onde todo resultado inteiro viável do PLIM é introduzido na população do MOEA para acelerar a convergência. A comparação entre os resultados obtidos pelos três métodos mostrou a abordagem híbrida com os melhores resultados, seguida pela modelagem PLIM e por último a MOEA pura.

Uma ferramenta de simulação e avaliação de *scheduling* para uma rede de dutos é proposta por Sánchez, Arreche e Ortega-Mier (2006). Ferramenta esta desenvolvida em *Visual Basic*, permite diferentes vazões para um mesmo duto e penaliza contaminações por interface,



estouro de capacidades e falta de produtos.

Alves (2007), em sua dissertação de mestrado desenvolve um algoritmo genético para a resolução do problema de otimização do *scheduling* de uma rede simplificada de escuros. A rede estudada é a da malha do estado de São Paulo, conforme Figura 17. As principais simplificações adotadas foram: eliminação no duplo sentido de fluxo dos dutos, eliminação do terminal de Guararema, não utilização de degradações e misturas, utilização de tancagem agregada e não unitária, descarte do conceito de rota, relaxação da restrição de resfriamento de produto no duto e consideração de vazão igual e constante para todos os produtos num mesmo duto. Foram consideradas restrições de capacidade de tancagem mínima e máxima, bem como o atendimento a demanda. O tempo foi discretizado em intervalos de quatro horas, enquanto os dutos foram divididos em volumes equivalentes a quatro horas de bombeio. O horizonte de programação foi de 14 dias. Utilizou-se uma população de 150 indivíduos, sendo encerrada a busca após 2.500 gerações.

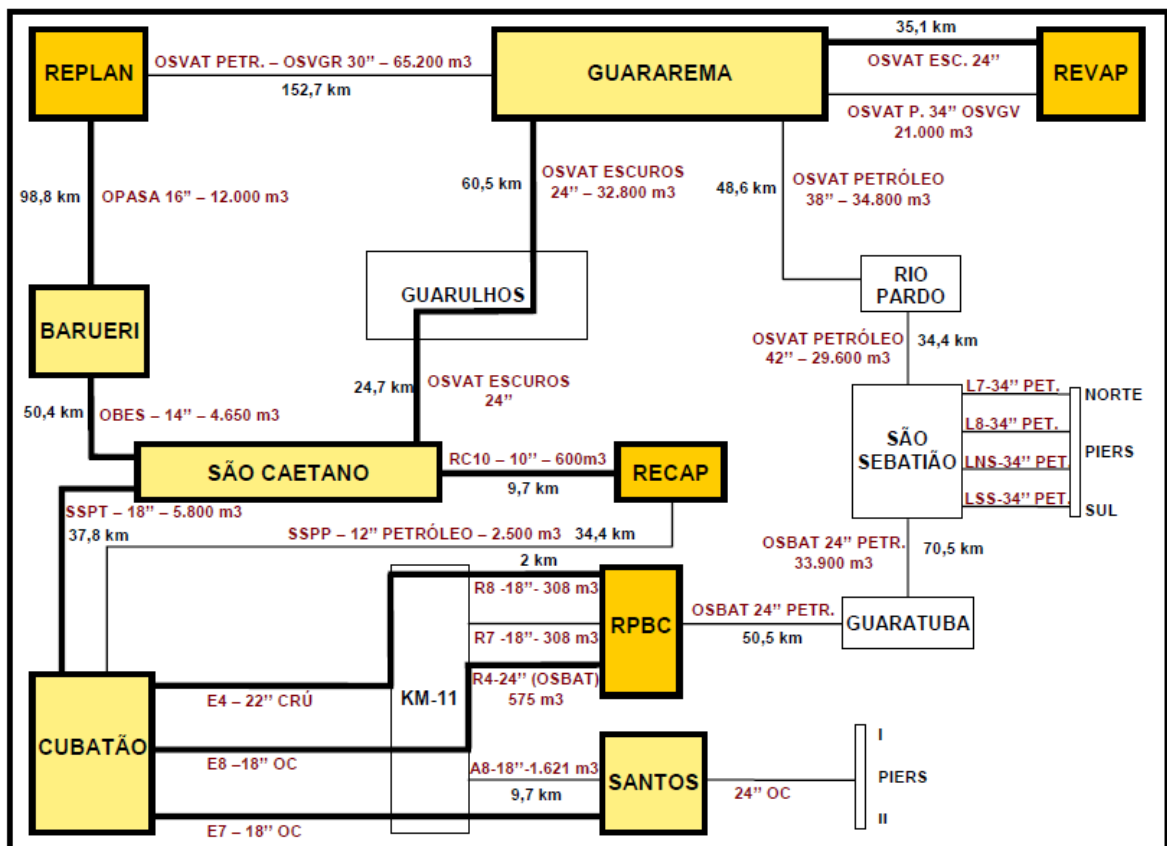


Figura 17 – Rede de Escuros da Área de São Paulo (ALVES, 2007)

Marcellino, Omar e Moura (2007) trataram o problema de otimização de uma rede de dutos, mais especificamente a da malha de claros da região de São Paulo (Figura 15), usando

a técnica de satisfação de restrições distribuídas, que é uma técnica baseada em multiagentes. O problema em foco foi o de planejamento de escoamento e não o *scheduling* completo, enquanto o horizonte de programação foi de uma semana.

Ciré (2008) abordou o mesmo problema, mas focando na segunda parte do *scheduling*, que é o escalonamento das bateladas. Para tal propôs duas técnicas de programação por restrições e aplicou a cinco instâncias reais, cada instância sendo composta de 30 dutos, cerca de 30 produtos, 14 órgãos e em torno de 200 tanques. O horizonte de *scheduling* tratado, tal qual o trabalho citado anteriormente (MARCELLINO, OMAR e MOURA, 2007), foi de uma semana, sendo um trabalho o complemento do outro, fechando o ciclo de *scheduling*. Uma descrição da solução em duas partes e a explicação detalhada de cada uma das restrições respeitadas é encontrada no trabalho de Lopes *et al.* (2010).

Felizari (2009) em sua tese descreve um sistema de apoio à decisão também para a rede de claros da região de São Paulo (Figura 15). Para tal ele divide o problema em três módulos: alocação, sequenciamento e temporização, conforme Figura 18. O trabalho do autor é focado nos módulos de sequenciamento e temporização. A modelagem de ambos é feita através de uma abordagem híbrida de programação por restrições e programação linear inteira mista. O tempo é tratado de forma contínua, num horizonte de trinta dias. Várias restrições operacionais são consideradas tais como horossazonalidade, troca de turno, uso apenas de rotas homologadas, número máximo de recebimentos e bombeios por local, operação pulmão, reversão, dentre outros.

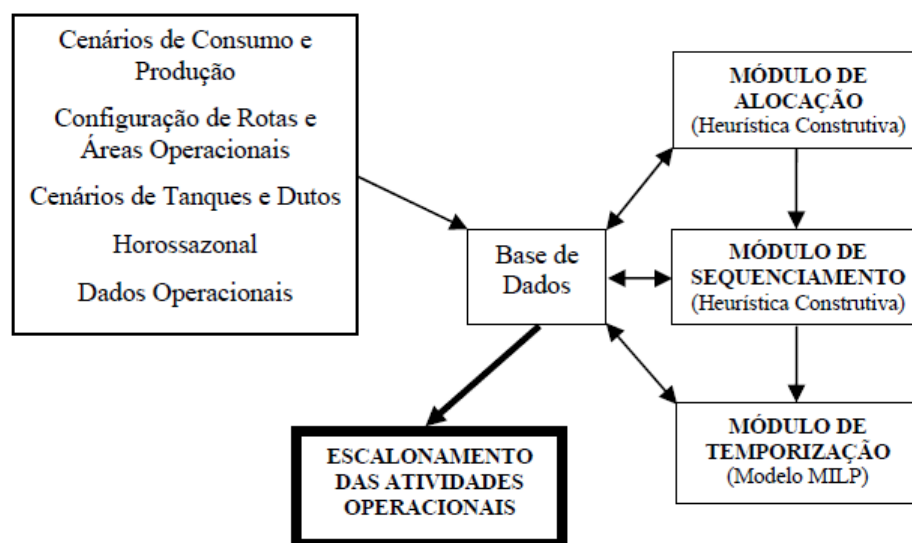


Figura 18 – Diagrama de Resolução da Rede de Claros (FELIZARI, 2009)

Cafaro e Cerdá (2010) propõem soluções para três exemplos de redes, conforme Figura 19, Figura 20 e Figura 21. Para o segundo e terceiro exemplos, nota-se a presença de mais de uma refinaria e o modo de operar destes exemplos diferem das demais redes apresentadas nesta subseção, pois a segunda e a terceira refinarias trabalham injetando produtos na corrente de produtos que está se deslocando. As restrições para o correto funcionamento da injeção foram formuladas em um modelo PLIM, tendo resolvido problemas com horizontes de sete a dez dias.

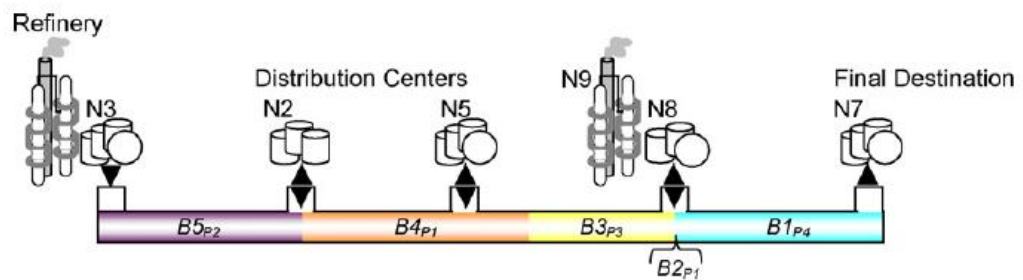


Figura 19 – Rede 1 (CAFARO e CERDÁ, 2010)

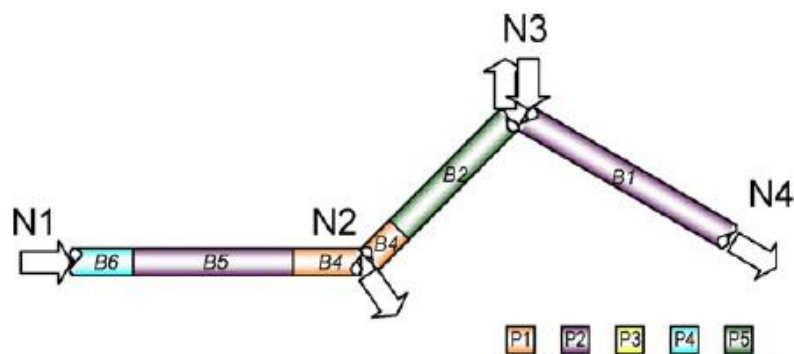


Figura 20 - Rede 2 (CAFARO e CERDÁ, 2010)

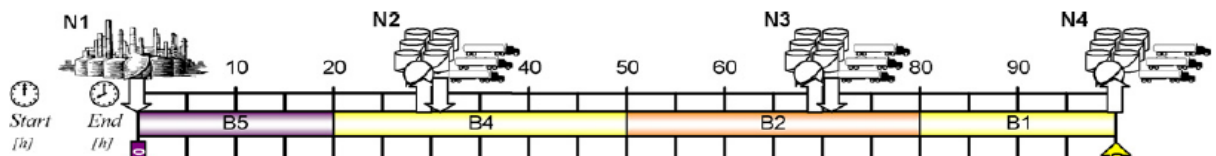


Figura 21 - Rede 3 (CAFARO e CERDÁ, 2010)

Boschetto, Magatão e Neves Jr. (2010) tratam o problema de *scheduling* da malha de claros da área São Paulo (Figura 15), trabalhada por vários autores supracitados, englobando

30 dutos, 4 refinarias, 2 terminais aquaviários, 2 clientes finais e 6 terminais terrestres, além de mais de uma dezena de produtos. Os autores dividem o problema em três: planejamento, alocação/sequenciamento e temporização- conforme Figura 22. Todos os subproblemas são modelados em PLIM. Em Boschetto, Magatão e Neves Jr. (2010), o modelo de alocação e sequenciamento são detalhados. Apresentam-se os resultados de volumes exatos de cada batelada, com a respectiva rota, bem como a sequência das mesmas. Boschetto (2011), em sua tese de doutorado, descreve os três modelos propostos, bem como resultados atingidos em cenários reais. O horizonte de *scheduling* destes cenários é de trinta dias, e o tempo é tratado de modo contínuo.

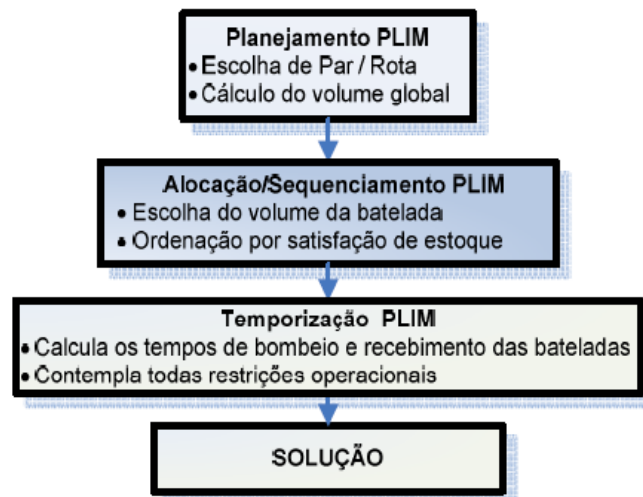


Figura 22 – Diagrama de Solução Rede de Dutos  
(BOSCHETTO, MAGATÃO e NEVES-JR, 2010)

Na Tabela 3.4, tem-se um resumo dos trabalhos que focam o problema de rede de dutos, descritos nesta subseção.

Tabela 3.4 – Resumo dos Trabalhos: Rede de Dutos Derivados

(Continua)					
Autor	Abrangência	Técnica	Solução	Modelagem Temporal	Horizonte
Camponogara (1995)	Rede de Dutos Claros Área SP	Decomposição do Problema + Multiagentes	Factível nas primeiras 100h	Discreta	120h
Crane, Wainwright e Schoenefeld (1999)	Rede com dutos idênticos, dois produtos, capacidades de estocagem iguais	Algoritmo Genético	Sub-ótima	Discreta	-
Braconi (2002)	Rede de Dutos Claros Área SP - sem considerar limite superior de estoque	Decomposição do Problema + PL + PLIM	Sub-ótima	Discreta	5 dias
Braconi (2002)	Rede de Dutos Escuros Área SP - sem considerar limite superior de estoque	Decomposição do Problema + PL + PLIM	Sub-ótima	Discreta	30 dias
Pessoa (2003)	Estudo de Complexidade	Algoritmo Resolução de Grafos	-	-	-
De La Cruz <i>et al.</i> (2003)	3 produtos, rede hipotética	Algoritmo Genético	Sub-ótima	Discreta	15 períodos
De La Cruz <i>et al.</i> (2005)	3 produtos, rede hipotética	PLIM + Algoritmo Evolutivo	Sub-ótima	Discreta	15 períodos
Sánchez, Arreche e Ortega-Mier (2006)	Ferramenta de simulação	Visual Basic	-	Contínua	-
Alves (2007)	Rede de Dutos Escuros Área SP	Algoritmo Genético	Sub-ótima	Discreta	14 dias
Marcellino, Omar e Moura (2007)	Planejamento Rede de Dutos Claros Área SP	Multiagentes	Sub-ótima	Contínua	7 dias
Ciré (2008)	<i>Scheduling</i> a partir do Planejamento da Rede de Dutos Claros Área SP	CLP	Sub-ótima	Contínua	7 dias
Felizari (2009)	Rede de Dutos Claros Área SP	Decomposição Problema + Heurística + CLP + PLIM	Sub-ótima	Contínua	30 dias

(Continuação)

Autor	Abrangência	Técnica	Solução	Modelagem Temporal	Horizonte
Cafaro e Cerdá (2010)	Redes hipotéticas	PLIM	Ótima	Contínua	7 a 10 dias
Boschetto, Magatão e Neves Jr. (2010) e Boschetto (2011)	Rede de Dutos Claros Área SP	Decomposição Problema + PLIM	Sub-ótima	Contínua	30 dias

### 3.2.4. Escoamento de Derivados - Uma Origem e Vários Destinos

Nesta subseção, trabalhos envolvendo redes de dutos com apenas uma origem e vários destinos são analisados. O foco da presente tese está em problemas deste tipo.

Sasikumar *et al.* (1997) apresentam um trabalho pioneiro, onde através de heurísticas de *beam search* tratam um problema real de *scheduling* de um conjunto de dutos sequenciais que ligam uma refinaria a três terminais, onde quatro tipos de derivados são consumidos. São respeitadas as restrições de incompatibilidade entre produtos, além das de produção, demanda e limites de estoque. Os movimentos que violam as restrições são proibidos na busca. O horizonte de programação é de um mês e tem-se como objetivo achar soluções viáveis.

Rejowski e Pinto em uma série de trabalhos (REJOWSKI e PINTO, 2002), (REJOWSKI e PINTO, 2003a) e (REJOWSKI e PINTO, 2003b) propõem um modelo PLIM o qual retrata um duto genérico com uma origem e vários destinos, conforme Figura 23. Também levam em consideração restrições de incompatibilidade entre produtos, limites de produção, demanda e estoque. Cada trecho de duto é dividido em partes iguais que equivalem a uma unidade de tempo. Este modelo é aplicado a diferentes cenários do OSBRA, com horizonte de programação de 75 horas, dividido em 15 unidades de tempo de 5 horas cada, 4 produtos e 5 destinos. Os cenários são otimizados atingindo bons resultados, no caso de maior sucesso com apenas 4,7% de distância da otimalidade.

Posteriormente, ao incluir cortes na matriz de restrições em decorrência da determinação da quantidade máxima de recebimentos que cada base terá ao longo do horizonte foi possível reduzir o tempo computacional em 70% sem detrimento do resultado (REJOWSKI e PINTO, 2004).

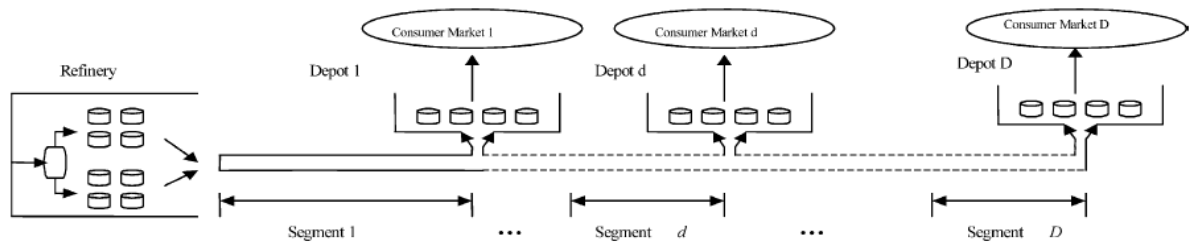


Figura 23 – Duto Genérico (REJOWSKI e PINTO, 2002)

Jittamai (2004) desenvolve um estudo sobre um problema semelhante, consistindo de um duto com uma origem e vários destinos (cada batelada tem somente um destino) que transporta diferentes petróleos para diferentes destinos. Após provar que esta classe de problemas é *NP-Hard*, o autor propõe uma heurística (algoritmo de fluxo reverso) para a resolução do mesmo, e ainda faz uma adaptação desta heurística para tratar problemas com múltiplas origens.

Cafaro e Cerdá (2004) modelam o problema de um duto com uma origem e vários destinos com o tempo de modo contínuo. Desta forma conseguem maior exatidão na formação das bateladas de origem e ainda uma redução do número de variáveis inteiras. O modelo em PLIM calcula qual a vazão a ser praticada na origem, a sequência de bateladas e o volume de cada uma das sangrias. Este modelo foi aplicado a dois exemplos, um hipotético e outro um caso real do OSBRA. Para o caso do OSBRA o horizonte de programação foi de 75 horas e quatro produtos. Dando continuidade a este trabalho, Cafaro e Cerdá (2005) propõem o desdobramento em vários períodos do modelo, ou seja, estende-se o horizonte de programação através de sucessivas otimizações, chegando-se, desta forma, a um horizonte de um mês – mais compatível com a realidade, pois em programações com períodos menores os efeitos das decisões de *scheduling* não chegam a exercer a total influência nos depósitos ao final do duto.

Rejowski e Pinto (2005) voltam a abordar este problema, mas, desta feita, se valem de uma modelagem de tempo contínua e introduzem considerações do comportamento hidráulico do duto. Aplicam o modelo ao OSBRA, obtendo o *scheduling* para um horizonte de 150 horas com quatro produtos. Esta mesma abordagem foi posteriormente detalhada em Rejowski (2007) e comparada com os resultados alcançados por Rejowski e Pinto (2003b) (tempo discretizado), mostrando-se superior não apenas em qualidade da solução como também em diminuição do esforço computacional.

Este problema de otimização do *scheduling* do OSBRA também foi modelado com tempo discretizado e resolvido através de algoritmos genéticos. O algoritmo trabalha com cinco produtos e um horizonte de programação de uma semana. Os resultados alcançados foram comparados com os obtidos manualmente pela equipe de programação da PETROBRAS e mostraram-se superiores do ponto de vista de nível de serviço e custos de estoque (SANGINETO, 2006).

Souza Filho, Ferreira Filho e De Lima (2007) abordaram este mesmo problema, acrescentando um custo maior de bombeamento no horário de pico de consumo de energia elétrica. O modelo foi desenvolvido na metaheurística VNS e o tempo discretizado em intervalos de três horas. Foram desenvolvidas cinco abordagens de vizinhança, sendo que em três destas abordagens o modelo conseguiu alcançar soluções viáveis.

Rejowski e Pinto (2008) desenvolvem um novo modelo para o OSBRA, considerando variações nas vazões devido ao comportamento de inércia hidráulica o que resulta na inclusão de restrições não lineares, sendo necessária a utilização de PNLIM. A formulação deste modelo é comparada com a do modelo PLIM desenvolvido em trabalho anterior (REJOWSKI e PINTO, 2005) e é provado que a formulação PLIM é um caso particular do modelo PNLIM.

MirHassani e Fani Jahromi (2011) comparam duas modelagens PLIM para dutos de uma origem e vários destinos, uma com divisão temporal discreta e outra contínua. Aplicam ambos os modelos em um problema teórico para obter um *scheduling* de 90 horas de horizonte. O modelo contínuo mostra-se superior em desempenho, atingindo a solução ótima em poucos segundos, enquanto o modelo com tempo discretizado tem sua execução interrompida após uma hora de processamento, atingindo apenas uma solução viável. Um cenário real de um mês de *scheduling* para o duto que liga Teerã a Mashhad, com duas sangrias intermediárias e que transporta quatro produtos, é submetido ao modelo contínuo, o qual atinge o resultado ótimo com baixo custo computacional.

Gleizes *et al.* (2010) e Cafaro *et al.* (2010) apresentam um modelo de simulação em Arena que descreve a evolução do sistema OSBRA como um todo: escoamento das bateladas, recebimentos e variações de estoque. Estes trabalhos são úteis na validação e visualização dos resultados obtidos de otimizadores, bem como na visualização de programações geradas manualmente.

A Tabela 3.5 apresenta um resumo das obras a respeito do problema de otimização dutoviária para uma origem e vários destinos.

Conforme Tabela 3.6, observando as características gerais dos modelos propostos para esta classe de problemas, verifica-se que em nenhum dos trabalhos há o atendimento



concomitante de todos os requisitos operacionais do sistema real, tais como:

- (i). não interrupção do fluxo do duto principal;
- (ii). horizonte de programação mínimo de 30 dias;
- (iii). variação diária da demanda;
- (iv). registro de tempo contínuo;
- (v). respeito às faixas de vazão em cada trecho de duto e nas sangrias;
- (vi). respeito aos volumes de batelada mínimo de bombeio e sangria, dentre outros;
- (vii). não contaminação de produtos adjacentes (uso de batelada selo).

Desta forma, é relevante o fato da presente tese descrever um modelo que fornece resultados que atendem a estes requisitos operacionais.

Tabela 3.5 – Resumo dos Trabalhos: Uma Origem Vários Destinos

Autor	Abrangência	Técnica	Solução	Modelagem Temporal	Horizonte
Sasikumar et al. (1997)	3 destinos, 4 produtos	Beam Search	Viável	Discreta	30 dias
Rejowski e Pinto (2002); Rejowski e Pinto (2003a) e Rejowski e Pinto (2003b)	5 destinos, 4 produtos	PLIM	Sub-ótimo	Discreta	75 horas
Rejowski e Pinto (2004)	5 destinos, 4 produtos	PLIM	Sub-ótimo	Discreta	75 horas
Jittamai (2004)	Apenas formulação e estudo de complexidade, com uma origem, vários destinos.	Heurística Fluxo Reverso	Viável	Discreta	-
Cafaro e Cerdá (2004)	5 destinos, 4 produtos	PLIM	Ótimo	Contínua	75 horas
Cafaro e Cerdá (2005)	5 destinos, 4 produtos	PLIM + Deslocamento do Horizonte	Sub-ótimo	Contínua	30 dias
Rejowski e Pinto (2005) e Rejowski (2007)	5 destinos, 4 produtos	PLIM	Ótimo	Contínua	150 horas
Sanginetto (2006)	5 destinos, 4 produtos	Algoritmo Genético	Sub-ótimo	Discreta	7 dias
Souza Filho, Ferreira Filho e De Lima (2007)	5 destinos, 4 produtos	VNS	Viável	Discreta	7 dias
Rejowski e Pinto (2008)	5 destinos, 4 produtos, variação de vazão	PNLIM	Sub-ótimo	Contínua	150 horas
MirHassani e Fani Jahromi (2011)	3 destinos, 4 produtos	PLIM	Ótimo	Contínua	30 dias
Gleizes <i>et al.</i> (2010) e Cafaro <i>et al.</i> (2010)	5 destinos, 4 produtos - Modelo de Simulação	Arena	-	-	-

Tabela 3.6 – Aderência dos Trabalhos aos Requisitos Operacionais

	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)	(vi)	(vii)
Sasikumar et al. (1997)	não	√	não	não	não	√	não
Rejowski e Pinto (2002); Rejowski e Pinto (2003a); Rejowski e Pinto (2003b) e Rejowski e Pinto (2004)	não	não	não	não	não	√	√
Jittamai (2004)	não	não	não	não	Trecho de duto	√	não
Cafaro e Cerdá (2004)	não	não	não	√	não	√	não
Cafaro e Cerdá (2005)	não	√	não	√	não	√	não
Rejowski e Pinto (2005) e Rejowski (2007)	não	não	não	√	Trecho de duto	√	√
Sangineto (2006)	não	não	não	não	não	não	não
Souza Filho, Ferreira Filho e De Lima (2007)	não	não	não	não	não	não	não
Rejowski e Pinto (2008)	não	não	não	√	Trecho de duto	√	√
MirHassani e Fani Jahromi (2011)	não	√	não	√	Trecho de duto	√	não

onde:

- (i) não interrupção do fluxo do duto principal.
- (ii) horizonte de programação mínimo de 30 dias.
- (iii) variação diária da demanda.
- (iv) registro de tempo contínuo.
- (v) respeito às faixas de vazão em cada trecho de duto e nas sangrias.
- (vi) respeito aos volumes de batelada mínimo de bombeio e sangria.
- (vii) não contaminação de produtos adjacentes (uso de batelada selo).



## 4. OTIMIZADOR DO *SCHEDULING* DO OSBRA

Neste capítulo é descrita a abordagem utilizada nesta tese para otimização do *scheduling* do OSBRA.

Conforme descrito na seção 1.2, a proposta para solução do OSBRA procura conciliar desempenho computacional com uma série de requisitos funcionais, sendo os mais importantes: não interrupção do bombeamento na origem; vazões variando de acordo com o número de sangrias em atividade; todas as vazões, em cada trecho de duto e em cada sangria respeitando uma faixa de operação, com valor mínimo e máximo; demanda variável ao decorrer do período; uso de produto selo para separar as bateladas.

### 4.1. LIMITAÇÕES DA MODELAGEM PROPOSTA

Considerando as características da operação real do OSBRA e a abrangência da abordagem proposta, chega-se a algumas limitações que deverão ser tratadas em trabalhos posteriores, sendo:

- Falta de testes de validação para a variação da capacidade de estoques nas bases;
- Limite do número de produtos bombeados (o modelo atual comporta somente dois);
- Não previsão no modelo do bombeio de gasolina para Brasília a partir de Goiânia;
- Impactos não lineares decorrentes da inércia hidráulica de desempenho de bombas.

Outras restrições, presentes em outras redes de dutos, não são consideradas por não serem aplicáveis:

- Limite de tempo de permanência em duto devido a resfriamento;
- Impactos de bombeamento em horário de pico devido a horosazonalidade do custo de energia elétrica;
- Transferência em pulmão;
- Reversão de dutos, entre outros.

## 4.2. ESTRATÉGIA ADOTADA

Assim como Cafaro e Cerdá (2005), esta abordagem objetiva, através de uma otimização de horizonte de programação de curta duração, chegar a um tempo de programação adequado para um duto como este, que é de pelo menos trinta dias. Ou seja, executa-se a otimização com o horizonte se deslocando no tempo e o resultado de um modelo servindo como dado de entrada para o seguinte (Figura 24).

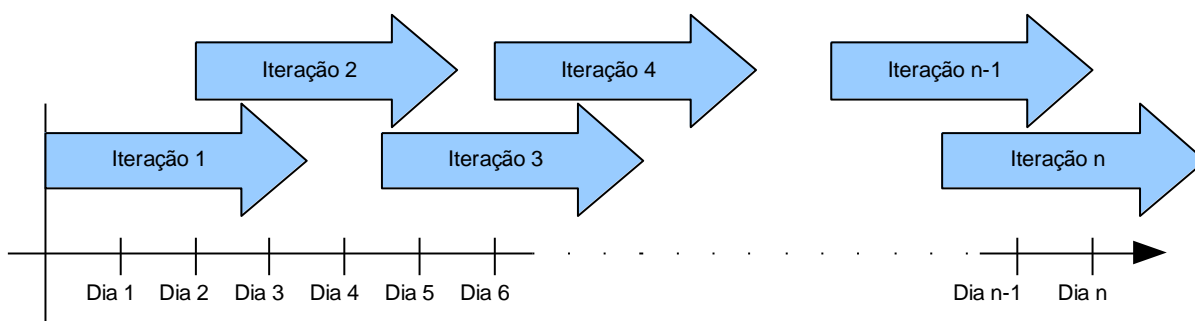


Figura 24 – Representação do modelo com horizonte rolante no tempo

Já a otimização com o horizonte curto utiliza um modelo de programação linear inteira mista. Para o melhor entendimento desta estratégia de modelagem adotada, é necessário compreender os conceitos de batelada, sangria e evento.

No OSBRA grandes bateladas são bombeadas na origem, volumes na ordem de 40.000 a 120.000 m<sup>3</sup> são comuns e, considerando uma vazão de 1.000 m<sup>3</sup>/h, chega-se a bateladas que podem ficar cinco dias sendo bombeadas. Portanto, além dos tempos de início e fim de bombeio na origem outros tempos são necessários para controle exato do fluxo no duto. Para tal, todos os tempos de eventos são controlados, conforme Figura 25, sendo um evento disparado por qualquer início ou fim de sangria em qualquer um dos terminais – ou seja – na abordagem proposta evento é toda ação que provoque variação nas vazões.

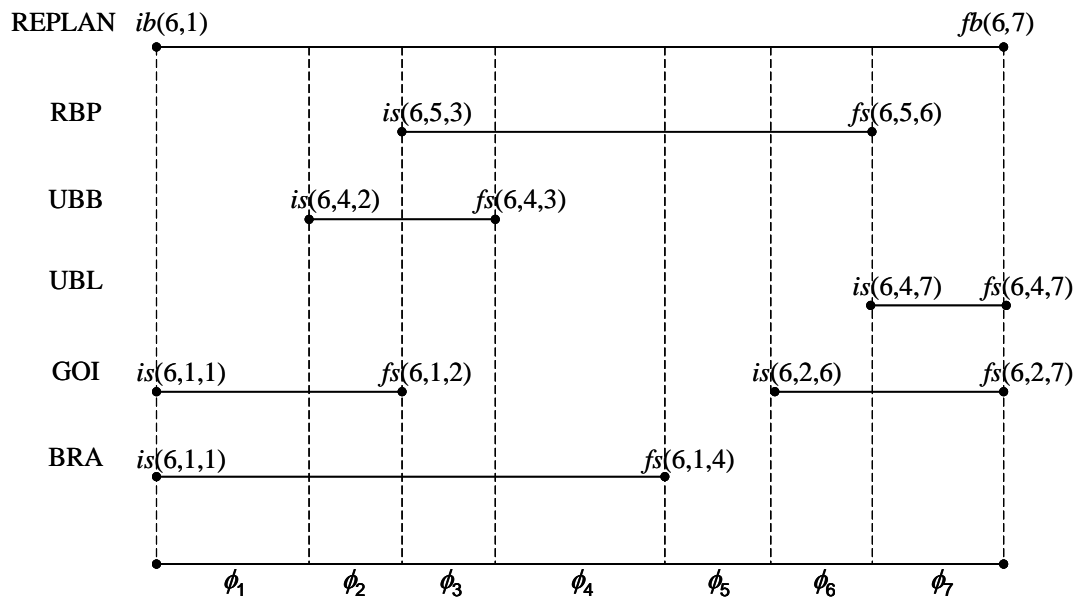


Figura 25 – Representação da Modelagem por Eventos<sup>8</sup>

Durante o bombeio de uma batelada na origem (entre  $ib(6,1)$  e  $fb(6,7)$ , que significa tempo que vai do início do evento 1 da batelada 6 até o fim do evento 7 da batelada 6) várias sangrias podem ocorrer. Não há nenhuma limitação para que mais de uma sangria ocorra ao mesmo tempo. Por exemplo, na Figura 25, durante o evento 2 ( $\phi_2$ ), o bombeio na origem, a sangria da batelada 4 em Uberaba (UBB), a sangria da batelada 1 em Goiânia (GOI) e a sangria da batelada 1 em Brasília (BRA) ocorrem. Neste exemplo, o volume bombeado na origem (REPLAN) deve ser igual ao volume sangrado em Uberaba e Goiânia adicionado ao volume recebido em Brasília. Adicionalmente, a vazão de bombeio em REPLAN deve igualar-se ao somatório das vazões em Uberaba, Goiânia e Brasília. De fato, na abordagem proposta, para todo evento ( $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_7$ ), o somatório das sangrias é igual ao bombeio na origem para volumes e vazões.

<sup>8</sup> Onde  $ib$ : início de bombeio;  $fb$ : fim de bombeio;  $is$ : início de sangria;  $fs$ : fim de sangria

### 4.3. A HEURÍSTICA ITERATIVA

Conforme explicitado no item 4.2, devido à necessidade de se realizar um *scheduling* com horizonte de programação de 30 dias e à complexidade computacional, optou-se por realizar um processo iterativo de solução. Assim, a otimização de curto prazo (modelo matemático) é executada durante  $n$  iterações, até que se cubra o horizonte de programação desejado. A saída da iteração anterior ( $n-1$ ) serve como entrada da posterior ( $n$ ), rolando-se, desta forma, o horizonte temporal de uma iteração para outra.

A lógica deste procedimento heurístico consiste em quatro atividades principais: determinar o volume total a ser enviado por produto e por consequência a vazão média; determinar o número de ciclos; calcular as faixas de tamanho de lote; e, controlar o horizonte total de scheduling.

Para o cálculo do volume total a ser enviado por produto (Figura 26), são seguidos os seguintes passos:

1. estima-se o que ficará de produto em duto ao final do horizonte. Considera-se que a participação de estoque em duto será a mesma participação por produto da demanda atual. Por exemplo, supondo-se uma demanda de 70% de diesel e 30% de gasolina, o total do estoque em duto tende a seguir estes percentuais;
2. considera-se que os estoques que ficarão nas bases ao final do horizonte serão iguais à soma do volume médio entre o estoque mínimo desejável e a capacidade operacional por órgão e produto. Com esta informação e a anterior, têm-se o estoque total ao final do período;
3. o estoque no início do horizonte é dado pela soma do estoque em duto e estoque nos órgãos por produto;
4. o volume total por produto a ser enviado é a soma entre o estoque ao final do período e a demanda, subtraído o estoque do início do horizonte.



```

Rotina Calculos_Globais_Heuristica{

Para todo produto p{
  Estoque_FimDuto(p) = Vol_Tot_Duto * Demanda_total(p)/Demanda_total;
  Para todo órgão o{
    Est_FimOrgao(p) = 0;
    Est_FimOrgao(p) = Est_FimOrgao(p) + (EstMinDes(o,p)+Cap(o,p))/2;
  }
  Estoque_Fim(p) = Estoque_FimDuto(p)+ Est_FimOrgao(p);
  Estoque_Ini(p) = Estoque_IniDuto(p)+ Est_IniOrgao(p);
  Vol_Env(p) = Demanda_total(p) + Estoque_Fim(p) - Estoque_Ini(p)
}

Vazao_min(origem)= (Vol_Env / Horizonte) * (1 - var_vaz);
Vazao_max(origem)= (Vol_Env / Horizonte) * (1 + var_vaz);

Para todo produto p{
  Lot_min(p) = (Vol_Env(p) / Num_Ciclos) * (1 - var_lot);
  Lot_max(p) = (Vol_Env(p) / Num_Ciclos) * (1 + var_lot);
}

}

```

Figura 26 – Pseudocódigo dos Cálculos Globais da Heurística

O cálculo da vazão média ao longo do horizonte de programação é feito em função do volume total enviado de todos os produtos e do tamanho do horizonte. Os limites superiores e inferiores da vazão são dados em função de uma variação arbitrada, conforme representado na Figura 26.

O número de ciclos corresponde ao número de conjuntos de bateladas. No caso de dois produtos, um ciclo é um conjunto composto por uma batelada de diesel, seguida de uma de selo, mais uma de gasolina e outra de selo.

O número de ciclos é o menor possível que mantenha o nível de estoques nas bases, pois quanto menor o número de ciclos, maior o tamanho das bateladas e menor o volume de contaminações. Conforme a demanda dos cenários (descrita na seção 5.2, Tabela 5.5) os órgãos possuem autonomia mínima média entre 7,33 e 9,73 dias, o que leva a determinação de cinco ciclos por período, o que resulta em um intervalo médio de seis dias entre os ciclos, sujeito a variações maiores nos últimos órgãos.

Já as faixas de tamanho de bateladas são determinadas em função do volume total enviado do produto, do número de ciclos e de um coeficiente de variação (Figura 26).

Finalmente, o controle de execução e de tempo total do horizonte é ilustrado no pseudocódigo da Figura 27. E consiste, além do gerenciamento do tempo global de otimização, também na gestão da passagem de informações entre uma iteração e outra, cuja lógica será apresentada na próxima seção.

```

Procedimento_Iterativo() {
    Tempo_Atual = 0;
    Horizonte = horizonte total de programação;
    t = tempo de sobreposição entre otimizações sucessivas, sendo menor que o tempo de execução de qualquer otimização;

    Enquanto (Tempo_Atual < Horizonte) {

        Se (Tempo_Atual = 0) {
            Dados_Intermediários = Otimização(Dados_iniciais, Tempo_Atual);
            Tempo_Atual = Tempo_Fim_Otimização - t;
        };

        Se Não{
            Dados_Intermediários = Otimização(Dados_Intermediários, Tempo_Atual);
            Tempo_Atual = Tempo_Fim_Otimização - t;
        };

        Fim Se

    };

    Solução = Dados_Intermediários;
};

```

Figura 27 – Pseudocódigo do Controle do Horizonte de Tempo da Heurística Iterativa

#### 4.4. MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE CURTO PRAZO

O modelo de otimização, que é chamado pelo procedimento iterativo, é composto de três módulos: Pré-Processamento, Modelo de Programação Linear Inteira Mista e Pós-Processamento, conforme ilustrado na Figura 28 e descrito a seguir.

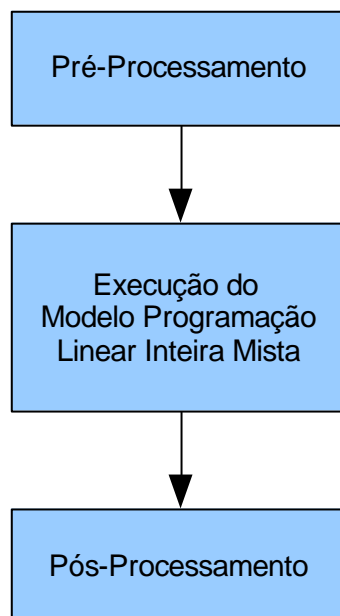


Figura 28 – Fluxograma do Procedimento de Otimização de Curto Prazo

#### 4.4.1. Pré e Pós-Processamentos

O pré-processamento como ilustrado na Figura 29, lê os dados de entrada da otimização e, a partir deles, calcula e gera tanto os parâmetros quanto os conjuntos utilizados no modelo e descritos na seção 4.4.2.

Esta rotina de pré-processamento foi concebida para ser executada em tempo computacional desprezível, portanto suas subrotinas de criação e cálculo de parâmetros e conjuntos são simples e de rápida execução. Dentre elas destacam-se duas que geram parâmetros que norteiam a lógica do modelo matemático, que são a de sequenciamento e a de determinação de limites de vazão na origem e tamanho de lotes, sendo descritas na sequência.

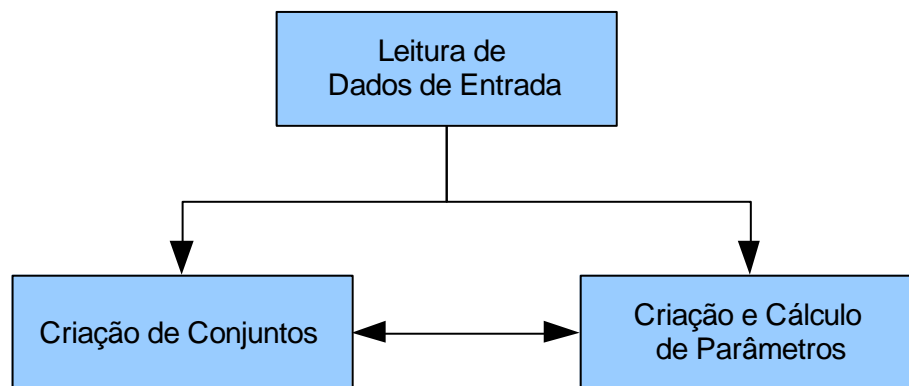


Figura 29 – Fluxograma do Pré-Processamento da Otimização

##### 4.4.1.1. Rotina de Sequenciamento de Bateladas

Esta rotina consiste em identificar a última batelada que estava sendo bombeada na iteração anterior e determinar qual deverá ser a nova sequência de bateladas.

Conforme o pseudocódigo da Figura 30, deseja-se obter a sequência da Figura 31. A última batelada bombeada pode ser gasolina, diesel ou produto selo.

Se for gasolina, a próxima batelada também será gasolina (complemento da batelada anterior), a seguinte selo e depois diesel.

Se for diesel, a lógica é a mesma: diesel, selo e gasolina.

Já se a última foi selo, verifica-se a anterior. Se a penúltima foi gasolina, a próxima será diesel, então selo e gasolina; se a penúltima foi diesel, seguindo a mesma lógica, seguem gasolina, selo e diesel.

Caso, em trabalhos futuros, resolva-se inserir mais produtos nesta rotina estarão as transformações significativas, em conjunto com a determinação de lotes mínimos e máximos.

```

Rotina Sequencia_Batelada{

  N_Ultima = Número da última batelada no duto;
  Ult_Prod = Estoque_Duto(N_Ultima).produto;
  Seleciona Caso (Ult_Prod ){
    Caso = Diesel{
      Bat_Prod(N_Ultima + 1) = Diesel;
      Bat_Prod(N_Ultima + 2) = Selo;
      Bat_Prod(N_Ultima + 3) = Gasolina;
    }
    Caso = Gasolina{
      Bat_Prod(N_Ultima + 1) = Gasolina;
      Bat_Prod(N_Ultima + 2) = Selo;
      Bat_Prod(N_Ultima + 3) = Diesel;
    }
    Caso Não{
      Se (Estoque_Duto(N_Ultima - 1).produto = Diesel){
        Bat_Prod(N_Ultima + 1) = Gasolina;
        Bat_Prod(N_Ultima + 2) = Selo;
        Bat_Prod(N_Ultima + 3) = Diesel;
      }
      Se Não{
        Bat_Prod(N_Ultima + 1) = Diesel;
        Bat_Prod(N_Ultima + 2) = Selo;
        Bat_Prod(N_Ultima + 3) = Gasolina;
      }
    }
  }
}

```

Figura 30 – Pseudocódigo da Rotina de Sequenciamento de Bateladas

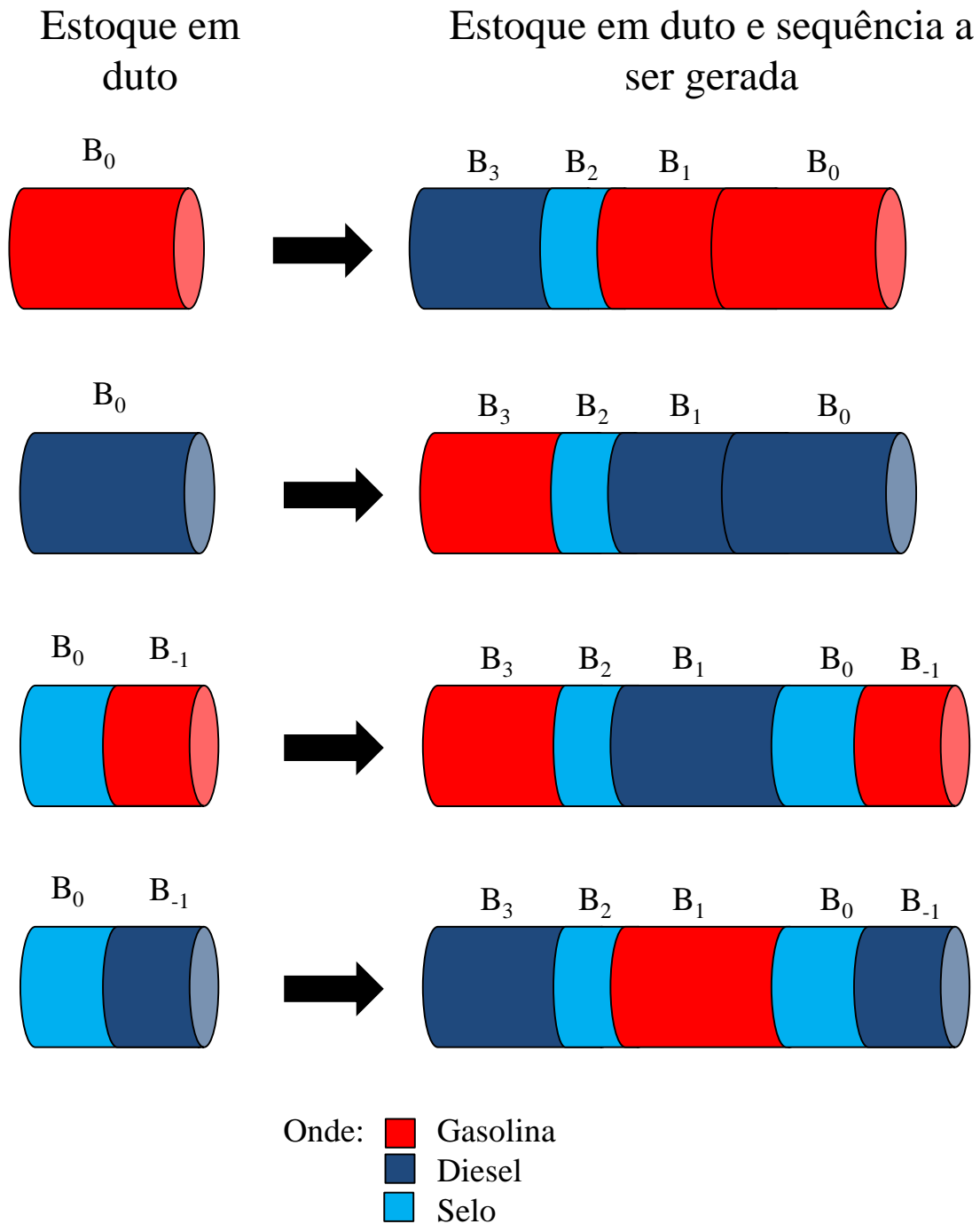


Figura 31 – Representação da Sequência de Bateladas

#### 4.4.1.2. Rotina de Cálculo do Tamanho dos Lotes em Cada Iteração

Esta rotina, descrita na Figura 32, com base nas faixas de tamanho de lote determinadas na heurística principal (seção 4.3, representado na Figura 26).

Quando a batelada for a primeira da iteração, deve ser considerado, caso ela seja

complemento da anterior, o volume já bombeado desta batelada na iteração anterior.

Além disso, em todos os casos, considera-se, também, a influência dos limites de tempo do horizonte de programação, multiplicando-se o tempo restante do horizonte pela vazão.

```

Rotina Calculo_limites_Iteracao{
  Para toda batelada b da iteração{
    Se b é primeira batelada da iteração{
      Se Vol_já_bombeado(b) < Lot_min(p) {
        Vol_min_bat(b) = min(Lot_min(p) - Vol_já_bombeado(b); Horiz_it * Vazao_min; (Horiz - T_atual) *
Vazao_min);
        Vol_max_bat(b) = min(Lot_max(p) - Vol_já_bombeado(b); Horiz_it * Vazao_max; (Horiz - T_atual) *
Vazao_max);
      }
      Se não{
        Vol_min_bat(b) = 0;
        Volume = min(Lot_max(p) - Vol_já_bombeado(b); Horiz_it * Vazao_max; (Horiz - T_atual) * Vazao_max);
        Vol_max_bat(b) = max(Volume; 0);
      }
    }
    Se não{
      Vol_min_bat(b) = min(Lot_min(p); Horiz_it * Vazao_min; (Horiz - T_atual) * Vazao_min);
      Vol_max_bat(b) = min(Lot_max(p); Horiz_it * Vazao_max; (Horiz - T_atual) * Vazao_max);
    }
    {
      Se p = Selo{
        Vol_min_bat(b) = Lot_min_TR;
        Vol_max_bat(b) = Lot_max_TR;
      }
    }
  }
}

```

Figura 32 – Rotina de Cálculo dos Limites de Volume de Cada Batelada

#### 4.4.1.3. Pós-Processamento

O pós-processamento tem como função a gravação dos resultados obtidos no modelo matemático.

Alguns cálculos são necessários, como, por exemplo, a determinação de volumes de entrada em dutos intermediários uma vez que o modelo determina tempos e volumes de bombes na origem, tempos e volumes totais de recebimentos e tempos e volumes de sangrias. A exemplificação de saídas do pós-processamento é realizada *a posteriori* na seção de resultados.

#### 4.4.2. Parâmetros, Variáveis e Conjuntos do Modelo Matemático

A partir da estratégia adotada, ilustrada na Figura 25, chegou-se ao modelo matemático em PLIM que traduz o problema abordado. Na Tabela 4.1 e Tabela 4.2 têm-se a

listagem dos parâmetros e conjuntos de parâmetros utilizados no modelo, enquanto na Tabela 4.3 e Tabela 4.4 têm-se a listagem das variáveis binárias e contínuas.

É importante ressaltar que somente as variáveis ativas são criadas pela modelagem descrita a seguir, ou seja, somente a combinação de índices pertinente ao cenário de estudo do problema têm variáveis associadas. Evitando, desta forma, a criação excessiva de variáveis, conforme descrito na seção 4.4.4.

Tabela 4.1 – Parâmetros Utilizados no Modelo Matemático

Parâmetros	
$a_1$	Fator de ponderação da função objetivo, componente estoque meta.
$a_2$	Fator de ponderação da função objetivo, componente estoque desejável.
$a_3$	Fator de ponderação da função objetivo, componente limites operacionais.
$a_4$	Fator de ponderação da função objetivo, componente diferença entre estoque máximo e mínimo.
$Cap_{o,p,dia}$	Capacidade do produto $p$ no órgão $o$ no período $dia$ (m3).
$Capr_{o,p,dia}$	Capacidade de Referência do produto $p$ no órgão $o$ no período $dia$ (m3).
$CEduto_b$	Coordenada inicial da batelada $b$ (estoque duto) (m3).
$Dem_{o,p,dia}$	Demanda do produto $p$ no órgão $o$ no período $dia$ (m3).
$E_{max_{o,p}}$	Estoque máximo desejável do produto $p$ no órgão $o$ (m3).
$E_{meta_{o,p}}$	Estoque meta por órgão $o$ e produto $p$ (m3).
$E_{min_{o,p}}$	Estoque mínimo desejável do produto $p$ no órgão $o$ (m3).
$est_{o,p}^{inic}$	Estoque inicial do produto $p$ no órgão $o$ (m3).
$flagv_b^{\min}$	1, se o complemento da batelada que está no duto deve ser bombeado, ou se a batelada é selo, o que indica que não deverá haver mudança nas sangrias.
$Init$	Início do horizonte (h).
$Lastro_{o,p}$	Estoque mínimo operacional por órgão $o$ e produto $p$ (m3).
$lots^{\max}$	Volume máximo (lote máximo) de sangria (m3).
$lots_{o,p}^{\min}$	Volume mínimo (lote mínimo) de sangria de $p$ no órgão $o$ (m3).
$M$	Big-M.
$Nod$	Órgão imediatamente posterior ao duto $d$ .
$PctSelo_{px,p}$	Percentual do produto selo $px$ que é transformado no produto $p$ (%).
$Tempo_b^{\max}$	Tempo máximo para bombear a batelada $b$ (h).
$Toler$	Tolerância de valor zero.
$vaz_{d,p}^{\max}$	Vazão máxima de bombeio de $p$ no duto $d$ (m3/h).
$vaz_{d,p}^{\min}$	Vazão mínima de bombeio de $p$ no duto $d$ (m3/h).
$vazS_{o,p}^{\max}$	Vazão máxima de sangria de $p$ no órgão $o$ (m3/h).
$vazS_{o,p}^{\min}$	Vazão mínima de sangria de $p$ no órgão $o$ (m3/h).
$Vbatd_{b,d}$	Volume inicial da batelada $b$ no duto $d$ (m3).
$vol_b^{\max}$	Volume máximo de bombeio da batelada $b$ (m3).
$vol_b^{\min}$	Volume mínimo de bombeio da batelada $b$ (m3).
$volE_{min}$	Volume mínimo de bombeio em um evento (m3).
$VDuto_d$	Coordenada do duto $d$ (m3).



Tabela 4.2 – Conjuntos Utilizados no Modelo

Conjuntos de Parâmetros	
$BBDe$	Conjunto de tuplas: bateladas que estão sendo bombeadas $b'$ , bateladas que sofrem influência deste bombeio $b$ , duto $d$ onde está o início de $b$ e eventos $e$ que ocorrem durante o bombeio de $b'$ .
$BBe$	Conjunto de tuplas: bateladas que estão sendo bombeadas $b'$ , bateladas que sofrem influência deste bombeio $b$ e eventos $e$ que ocorrem durante o bombeio de $b'$ .
$B_{bomb}$	Conjunto de bateladas $b$ presentes na iteração.
$BBPOe$	Conjunto de tuplas: bateladas que estão sendo bombeadas $b'$ , bateladas que sofrem influência deste bombeio $b$ , produto $p$ de $b$ , órgão $o$ por onde $b$ está passando e eventos $e$ que ocorrem durante o bombeio de $b'$ .
$BDe$	Conjunto de tuplas: bateladas que estão sendo bombeadas $b'$ , dutos $d$ onde estão o início das bateladas que sofrem influência de $b'$ e eventos $e$ que ocorrem durante o bombeio de $b'$ .
$Bdut$	Conjunto de Bateladas $b$ que se encontram no duto no início da iteração.
$Be$	Conjunto de duplas: bateladas que estão sendo bombeadas $b'$ e seus eventos $e$ .
$BeH$	Conjunto de tuplas: bateladas que estão sendo bombeadas $b'$ , seus eventos $e$ e os dias $dia$ que este evento ocorre.
$BP$	Conjunto de duplas formadas pela batelada $b$ e o seu respectivo produto $p$ .
$Dias$	Conjunto de dias $dia$ que compõem o horizonte de programação.
$OP$	Conjunto de duplas órgãos $o$ e produtos $p$ que podem ser armazenados em $o$ .
$OPb$	Conjunto de duplas órgãos $o$ e produtos $p$ que possuem peso especial no componente de função objetivo $VMetami_{o,p}$ .
$OPg$	Conjunto de duplas órgãos $o$ e produtos $p$ que possuem peso especial no componente de função objetivo $VMetama_{o,p}$ .

Tabela 4.3 – Variáveis Binárias Utilizadas no Modelo

Variáveis Binárias	
$BombE_{b,e}$	1, se a batelada $b$ é bombeada no evento $e$
$FEdia_{b',e,dia}$	1, se a batelada $b'$ finaliza o evento de bombeio $e$ , no dia $dia$ .
$SangE_{b',b,d,e}$	1, se a batelada $b$ sangra no duto $d$ durante o bombeio da batelada $b'$ no evento $e$ .

Tabela 4.4 – Variáveis Contínuas Utilizadas no Modelo Matemático

Variáveis Contínuas	
$Coord_{b',b,e}$	Coordenada da batelada $b$ durante o bombeio da batelada $b'$ no evento $e$ ( $m^3$ ).
$dif_p$	Diferença entre o maior e o menor nível de estoque normalizado por produto $p$ .
$est_{o,p}^{fim}$	Indicador de estoque final do produto $p$ no órgão $o$ . Valor normalizado.
$esti_{o,p,dia}$	Estoque mínimo diário por órgão $o$ , produto $p$ e período $dia$ ( $m^3$ ).
$ests_{o,p,dia}$	Estoque máximo diário por órgão $o$ , produto $p$ e período $dia$ ( $m^3$ ).
$fb_{b,e}$	Final de bombeio da batelada $b$ no evento $e$ (h).
$fb^H$	Tempo final (máximo) do horizonte na iteração (h).
$fs_{b',b,d,e}$	Final de sangria da batelada $b$ no duto $d$ durante o bombeio da batelada $b'$ no evento $e$ (h).
$ib_{b,e}$	Início de bombeio da batelada $b$ no evento $e$ (h).
$is_{b',b,d,e}$	Início de sangria da batelada $b$ no duto $d$ durante o bombeio da batelada $b'$ no evento $e$ (h).
$maestabs_p$	Estoque máximo normalizado absoluto do produto $p$ .
$maest_{o,p}$	Estoque máximo normalizado por órgão $o$ e produto $p$ .
$miestabs_p$	Estoque mínimo normalizado absoluto do produto $p$ .
$miest_{o,p}$	Estoque mínimo normalizado por órgão $o$ e produto $p$ .
$VBombE_{b,e}$	Volume bombeado da batelada $b$ no evento $e$ ( $m^3$ ).
$vcap_{o,p}$	Volume de violação de capacidade operacional máxima por órgão $o$ e produto $p$ ( $m^3$ ).
$Vcp$	Violação máxima da capacidade superior de estoque operacional. Valor normalizado.
$vest\_max_{o,p}$	Volume de violação do estoque máximo desejável por órgão $o$ e produto $p$ ( $m^3$ ).
$vest\_min_{o,p}$	Volume de violação do estoque mínimo desejável por órgão $o$ e produto $p$ ( $m^3$ ).
$Vlast$	Violação máxima do estoque de lastro. Valor normalizado.
$vlastro_{o,p}$	Volume de violação do estoque de lastro por órgão $o$ e produto $p$ ( $m^3$ ).
$vma$	Violação máxima do estoque máximo desejável. Valor normalizado.
$VMetama_{o,p}$	Violação acima do estoque meta por órgão $o$ e produto $p$ ( $m^3$ ).
$VMetami_{o,p}$	Violação abaixo do estoque meta por órgão $o$ e produto $p$ ( $m^3$ ).
$vmi$	Violação máxima do estoque mínimo desejável. Valor normalizado.
$VSangdia_{b',b,p,o,e,dia}$	Volume sangrado da batelada $b$ , produto $p$ , no órgão $o$ , durante o bombeio da batelada $b'$ , evento $e$ , no período $dia$ ( $m^3$ ).
$VSangE_{b',b,d,e}$	Volume de sangria da batelada $b$ no duto $d$ durante o bombeio da batelada $b'$ no evento $e$ ( $m^3$ ).
$VSng_{b,e}$	Volume da Batelada de Sangria que viola os limites de Volume das Sangrias ( $m^3$ ).

#### 4.4.3. Função Objetivo

Apesar de a função objetivo ser composta por vários componentes, todos eles são complementares e visam manter o estoque dentro da faixa operacional – maximizando o nível de serviço. Os seguintes fatores estão presentes na função objetivo minimizar: as violações em relação aos estoques meta mínimos ( $VMetami_{o,p}$ ) e máximos ( $VMetama_{o,p}$ ); as violações máximas de estoque mínimo  $vmi$  e máximo  $vma$  desejáveis; as violações de capacidade operacional  $Vcp$  e de volume mínimo de estoque de lastro  $Vlast$ ; a diferença entre o maior e o menor nível normalizado de estoque  $dif_p$ , além da relaxação da restrição de tamanho de volume de bombeio  $Vsng_{b,e}$ . As subsecções 1 a 4.4.3.4 detalham cada um destes fatores.

$$\begin{aligned}
 & \alpha_1 \cdot \left( \sum_{op \in OPg} VMetama_{o,p} + 4 \cdot \sum_{op \in OPg} VMetama_{o,p} \right) + \\
 & + \alpha_1 \cdot \left( \sum_{op \in OPb} VMetami_{o,p} + 4 \cdot \sum_{op \in OPb} VMetami_{o,p} \right) + \\
 \min & + \alpha_2 \cdot (vma + vmi) + \alpha_3 \cdot (Vcp + Vlast) \\
 & + \alpha_4 \cdot \sum_{p \in P} dif_p + \\
 & + \beta \cdot \sum_{be \in Be} Vsng_{b,e}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Em linhas gerais, a função objetivo em si é ponderada pelos fatores  $\alpha$ , enquanto o fator  $\beta$  pondera a penalização por violação nos limites de volume de bombeio.

O fator  $\beta$  tem um peso significativamente menor do que os fatores  $\alpha$ , uma vez que este componente tem como função permitir a obtenção de soluções factíveis intermediárias, que converjam para a solução ótima.

Como a resolução do cenário completo é feita através da resolução iterativa de vários modelos com um horizonte de programação curto compatível com o compromisso de se atingir uma boa solução factível dentro de um tempo computacional aceitável; todos os componentes da função objetivo procuram manter os níveis de estoque numa faixa operacional que possibilite a resolução da próxima iteração e, desta forma, atingir um nível de serviço máximo para a solução como um todo.

A seguir tem-se a descrição e significado de cada um dos componentes da função objetivo, evidenciando como cada um deles contribui para a manutenção dos estoques dentro de uma faixa operacional que minimizem a possibilidade de falta ou excesso de produtos em

estoque para a atual e para as próximas iterações.

#### 4.4.3.1. $VMetami_{o,p}$ e $VMetama_{o,p}$

A minimização destes dois componentes tende a penalizar soluções que violem o nível de estoque meta, tanto infringindo o mínimo quanto ultrapassando o máximo. A interpretação gráfica deste componente é observada na Figura 33, onde o ângulo da penalidade é dado pelo valor de  $\alpha_l$ . Assim, conforme a Figura 33, se o estoque estiver abaixo da faixa de valores delimitada pelo meta mínimo e máximo, a penalidade associada à função objetivo (função de minimização) é elevada. À medida que os valores de estoque se aproximam dos valores meta desejados, a penalidade é decrementada. Enquanto o nível do estoque estiver dentro da faixa de estoque meta mínimo e máximo, não há penalidade associada. No caso do valor de estocagem sair da faixa de valores meta estabelecidos, novamente uma penalidade é aplicada.

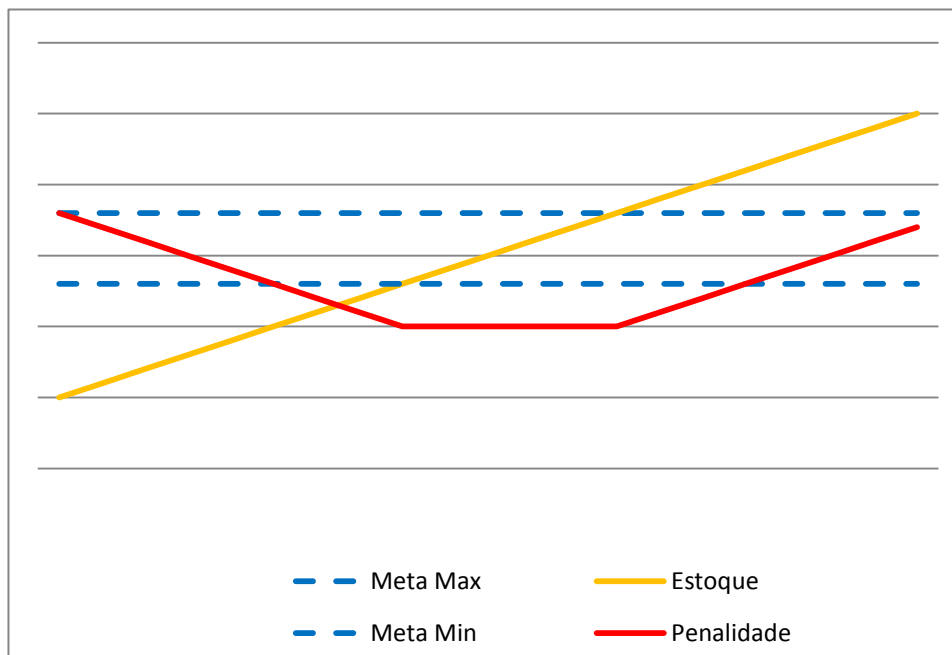


Figura 33 – Representação Gráfica Aproximada da Penalidade por Violação de Estoque Meta

Além disto, foi constituído um grupo de duplas locais / produtos mais susceptíveis a violações de atendimento de nível de serviço e para este grupo foi atribuído um peso maior neste quesito. No modelo atual, a configuração padrão possui peso maior para evitar violação  $VMetama_{o,p}$  de gasolina em Goiânia e para evitar  $VMetami_{o,p}$ , de gasolina em Brasília e Uberlândia.

Todos os componentes da função objetivo são normalizados. E essa dupla ( $VMetama_{o,p}$  e  $VMetami_{o,p}$ ) é a única que considera os desvios por órgão e produto, os demais só consideram os desvios máximos normalizados.

#### 4.4.3.2. $vmi$ e $vma$

Estas duas variáveis quando minimizadas penalizam soluções que não respeitam o estoque desejável, penalizando o volume máximo normalizado de todos os órgãos e produtos que excede o estoque desejável. O comportamento da penalização é ilustrado na Figura 34, onde a inclinação da curva de penalidade é determinada por  $\alpha_2$ .

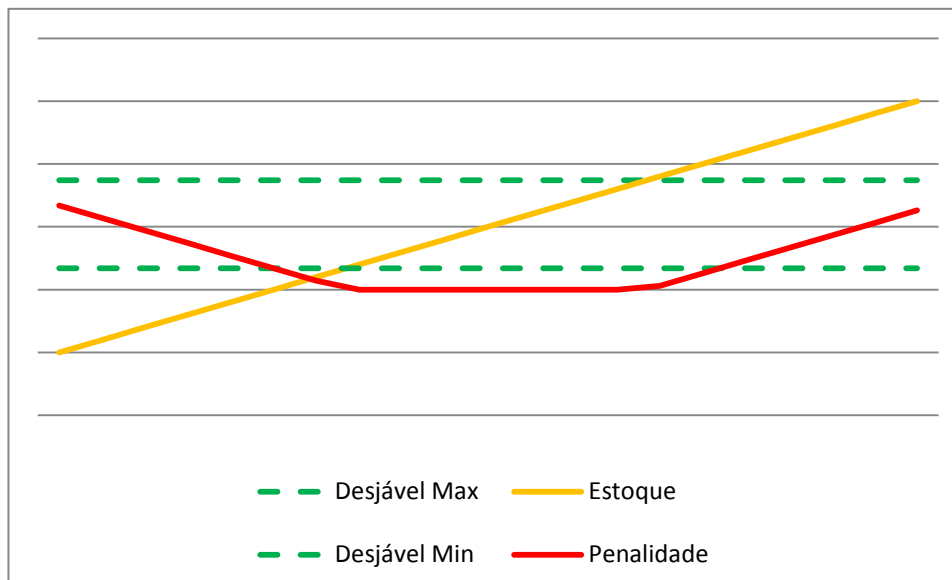


Figura 34 – Representação Gráfica Aproximada da Penalidade por Violação de Estoque Desejável

#### 4.4.3.3. $Vcp$ e $Vlast$

Complementando os componentes anteriores, esta dupla penaliza soluções que ultrapassam os limites operacionais de estoque máximo ( $Vcp$ ) e de lastro ( $Vlast$ ). O comportamento da penalização é ilustrado na Figura 35, sendo o ângulo da curva de penalidade dado por  $\alpha_3$ .

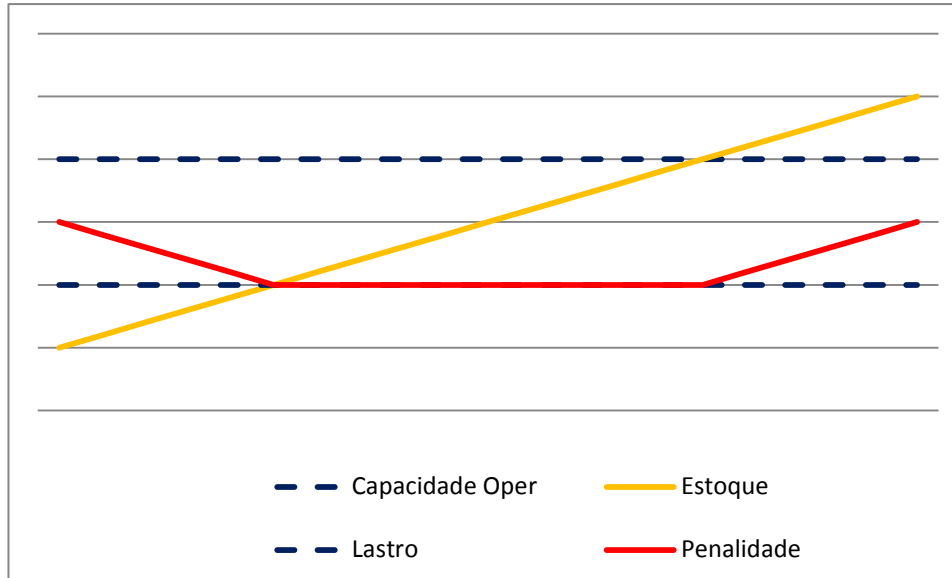


Figura 35 – Representação Gráfica Aproximada da Penalidade por Violação de Estoque de Lastro e Capacidade Operacional

A composição aproximada da ação destes componentes da função objetivo é explicitada na Figura 36. Nesta figura é possível notar que eles se complementam, aumentando a penalização da função objetivo na medida em que o estoque se afasta das faixas de controle. Um estoque que se distancia do estoque desejável é penalizado em função de  $\alpha_1$ , já um que ultrapassa o estoque meta é penalizado em função da soma de  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , enquanto quando se ultrapassa os limites operacionais é em função da soma de  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  que a penalização ocorre.

Esta composição é aproximada uma vez que o componente de  $\alpha_1$  é considerado por órgão e produto, enquanto os de  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  são os desvios máximos de todos os órgãos e produtos.

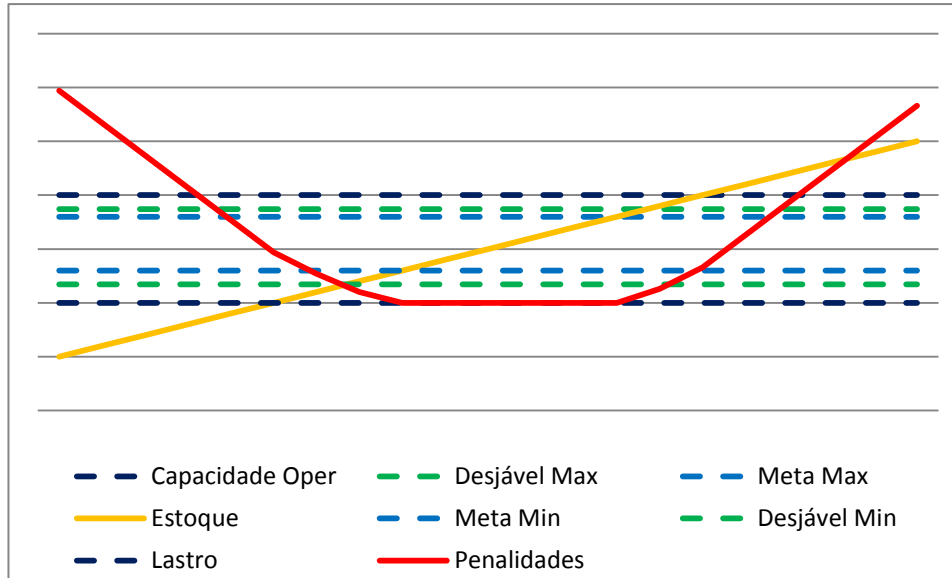


Figura 36 – Representação Gráfica Aproximada da Soma das Penalidades por Violação de Estoque

#### 4.4.3.4. *difp*

Complementando os três componentes anteriores a minimização deste fator tende a deixar os valores máximos e mínimos de estoque normalizados por produto os mais próximos possíveis, ou seja, assim como os outros penaliza os níveis de estoque que se afastam das faixas centrais de estoque desejável.

#### 4.4.4. Restrições

Na sequência detalham-se as restrições (4.2) a (4.79) do modelo matemático proposto.

A soma dos volumes bombeados em todos os eventos deve ser maior que o volume mínimo de bombeio da batelada  $b$ .

$$\sum_{e \in E_b} VBombE_{b,e} \geq vol_b^{\min} \quad \forall b \in B_{bomb} \quad (4.2)$$

A soma dos volumes bombeados em todos os eventos deve ser menor do que o volume máximo de bombeio da batelada  $b$ . Juntamente com a restrição anterior, garantem que os parâmetros de volume mínimo de batelada e volume máximo de batelada sejam respeitados.

$$\sum_{e \in E_b} VBombE_{b,e} \leq vol_b^{\max} \quad \forall b \in B_{bomb} \quad (4.3)$$

O volume bombeado em cada evento é menor do que o volume máximo da batelada  $b$ . Esta restrição já está contemplada na anterior, mas com a introdução dela são gerados cortes adicionais que facilitam a convergência do modelo PLIM.

$$VBombE_{b,e} \leq vol_b^{\max} \quad \forall (b,e) \in Be \quad (4.4)$$

O volume bombeado em cada evento é menor do que o volume máximo da batelada  $b$ , multiplicado pela variável binária, a qual indica a existência de bombeio da batelada  $b$  no evento  $e$ . Ou seja, força-se que o volume bombeado nos eventos de bombeio não utilizados pelo modelo (eventos fictícios) seja igual a zero.

$$VBombE_{b,e} \leq vol_b^{\max} \cdot BombE_{b,e} \quad \forall (b,e) \in Be \quad (4.5)$$

O volume bombeado em cada evento somado a variável de relaxação do volume de bombeio é maior do que o volume mínimo de bombeio por evento, multiplicado pela variável binária que indica a existência de bombeio da batelada  $b$  no evento  $e$ . Ou seja, quando houver o bombeio da batelada  $b$  no evento  $e$ , ele será maior do que o mínimo valor de bombeio por evento, se não a variável  $Vsng_{b,e}$  terá um valor que penalizará a função objetivo. Esta variável de relaxação é necessária para evitar infactibilidades no último trecho de duto por volume mínimo.

$$VBombE_{b,e} + Vsng_{b,e} \geq volE^{\min} \cdot BombE_{b,e} \quad \forall (b,e) \in Be \quad (4.6)$$

As restrições (4.7) e (4.8) se relacionam com o parâmetro  $flagv_b^{\min}$ , o qual indica se o complemento da batelada que está no duto deve ser bombeado no evento  $e$  ( $flagv_b^{\min} = 1$ ).

$$\sum_{e \in E_b} BombE_{b,e} \geq flagv_b^{\min} \quad \forall b \in B_{bomb} \quad (4.7)$$

$$BombE_{b,e} \leq flagv_b^{\min} \quad \forall b \in B_{bomb}, b > Bat_{inicial} \quad (4.8)$$



As restrições (4.9) e (4.10) relacionam a variável binária que indica a existência de bombeio na origem da batelada  $b'$  no evento  $e$ , com as variáveis binárias que indicam a existência de sangria durante este mesmo bombeio da batelada  $b'$  no evento  $e$ . A restrição (4.9) indica que quando houver bombeio, deverá haver uma ou mais sangrias, enquanto a restrição (4.10) garante que quando não houver bombeio não poderá haver nenhuma sangria – sempre se referenciando à mesma batelada  $b'$  na origem sendo bombeada no evento  $e$ .

$$BombE_{b',e} \leq \sum_{b \in B_{sang}} \sum_{d \in D} SangE_{b',b,d,e} \quad \forall (b',e) \in Be \quad (4.9)$$

$$SangE_{b',b,d,e} \leq BombE_{b',e} \quad \forall (b',b,d,e) \in BBDe \quad (4.10)$$

O somatório do número de sangrias da batelada  $b$ , no duto  $d$ , durante o bombeio da batelada  $b'$  no evento  $e$  é menor ou igual a 1 (se há o bombeio de  $b'$  no evento  $e$  senão é igual a zero). Esta restrição vem de encontro ao próprio conceito de evento, se ocorrer uma segunda sangria da mesma batelada no mesmo duto, isto quer dizer que a primeira acabou, logo houve mudança de evento.

$$\sum_{b \in B_{sang}} SangE_{b',b,d,e} \leq BombE_{b',e} \quad \forall (b',d,e) \in BDe \quad (4.11)$$

A restrição (4.12) estabelece que quando o primeiro evento de bombeio de uma batelada não ocorre, os demais eventos também não ocorrerão. Enquanto a restrição (4.13) estabelece que haja bombeio da batelada inicial, em todos os seus eventos.

$$BombE_{b',e} \leq BombE_{b',e-1} \quad \forall (b',e) \in Be, b' > Bat_{inicial} \quad (4.12)$$

$$BombE_{b',e} \geq BombE_{b',e-1} \quad \forall (b',e) \in Be, b' = Bat_{inicial} \quad (4.13)$$

A restrição (4.14) estabelece que o volume de sangria da batelada  $b$  no duto  $d$ , durante o bombeio da batelada  $b'$  no evento  $e$  seja maior do que um parâmetro de limite mínimo por produto  $p$  e órgão  $o$ , se isto não ocorrer a variável  $Vsng_{b',e}$  assumirá o valor desta violação que será penalizada na função objetivo.

Enquanto a restrição (4.15) estabelece o limite máximo de volume para estes volumes de sangria, delimitando estas variáveis com o auxílio da inequação (4.16) que estabelece um limite mínimo.

$$VSangE_{b',b,d,e} + Vsng_{b',e} \geq lots_{o,p}^{\min} \cdot SangE_{b',b,d,e} \quad \forall (b',b,d,e) \in BBDe, p \in P, o = No_d \quad (4.14)$$

$$VSangE_{b',b,d,e} \leq lots^{\max} \cdot SangE_{b',b,d,e} \quad \forall (b',b,d,e) \in BBDe, p \in P \quad (4.15)$$

$$VSangE_{b',b,d,e} \geq toler \cdot SangE_{b',b,d,e} \quad \forall (b',b,d,e) \in BBDe, p \in P \quad (4.16)$$

#### 4.4.4.1. Restrições de Coordenadas de Bateladas.

Esta série de restrições procura vincular a localização (coordenada) de cada uma das bateladas ao longo dos eventos e é baseada em trabalhos anteriores como Relvas *et al.* (2006). Através da Figura 37, exemplifica-se esta lógica.

A última batelada em duto recebe as coordenadas do estoque em duto (no caso do exemplo OSBRA da Figura 37, coordenada 164.374).

$$Coord_{b',b,e} = CEDuto_b \quad \forall (b',b,e) \in BBe \mid b' = NumUltEduto \quad (4.17)$$

Para o primeiro evento, a coordenada da batelada de bombeio  $b$ , será igual ao volume bombeado neste evento 1.

$$Coord_{b,b,e} = VBombE_{b,e} \quad \forall (b,b,e) \in BBe \mid e = 1 \quad (4.18)$$

Para os demais eventos, a coordenada desta batelada  $b$ , deve ser igual à coordenada dela ao final do evento anterior somando-se o volume bombeado no evento  $e$ , deduzindo-se os efeitos das sangrias ocorridas durante este evento  $e$ , desta batelada  $b$ .

$$Coord_{b,b,e} = Coord_{b,b,e-1} + VBombE_{b,e} - \sum_{d \in D} VSangE_{b,b,d,e} \quad \forall (b,b,e) \in BBe \mid e > 1 \quad (4.19)$$

Para as demais bateladas:

A coordenada da batelada  $b$ , no primeiro evento do bombeio da batelada  $b'$ , deve ser igual à coordenada anterior da batelada  $b$  (coordenada de  $b$  no último evento do bombeio de  $b'-1$ ) somada à coordenada da batelada de bombeio  $b'$  no evento  $1$ , diminuindo-se os efeitos das sangrias das bateladas  $b''$  durante este evento  $1$  (com  $b''$  sendo todas as bateladas

posteriores a  $b$  e a própria  $b$ ).

$$Coord_{b',b,e} = Coord_{b'-1,b,ne_{b'-1}} + Coord_{b',b',e} - \sum_{\substack{b'' \in B \\ b \leq b' < b''}} \sum_{d \in D} VSangE_{b',b'',d,e} \quad (4.20)$$

$\forall (b',b,e) \in BB_e, (b'-1,b,ne_{b'-1}) \in BB_e, (b',b',d,e) \in BBDe \mid e = 1$

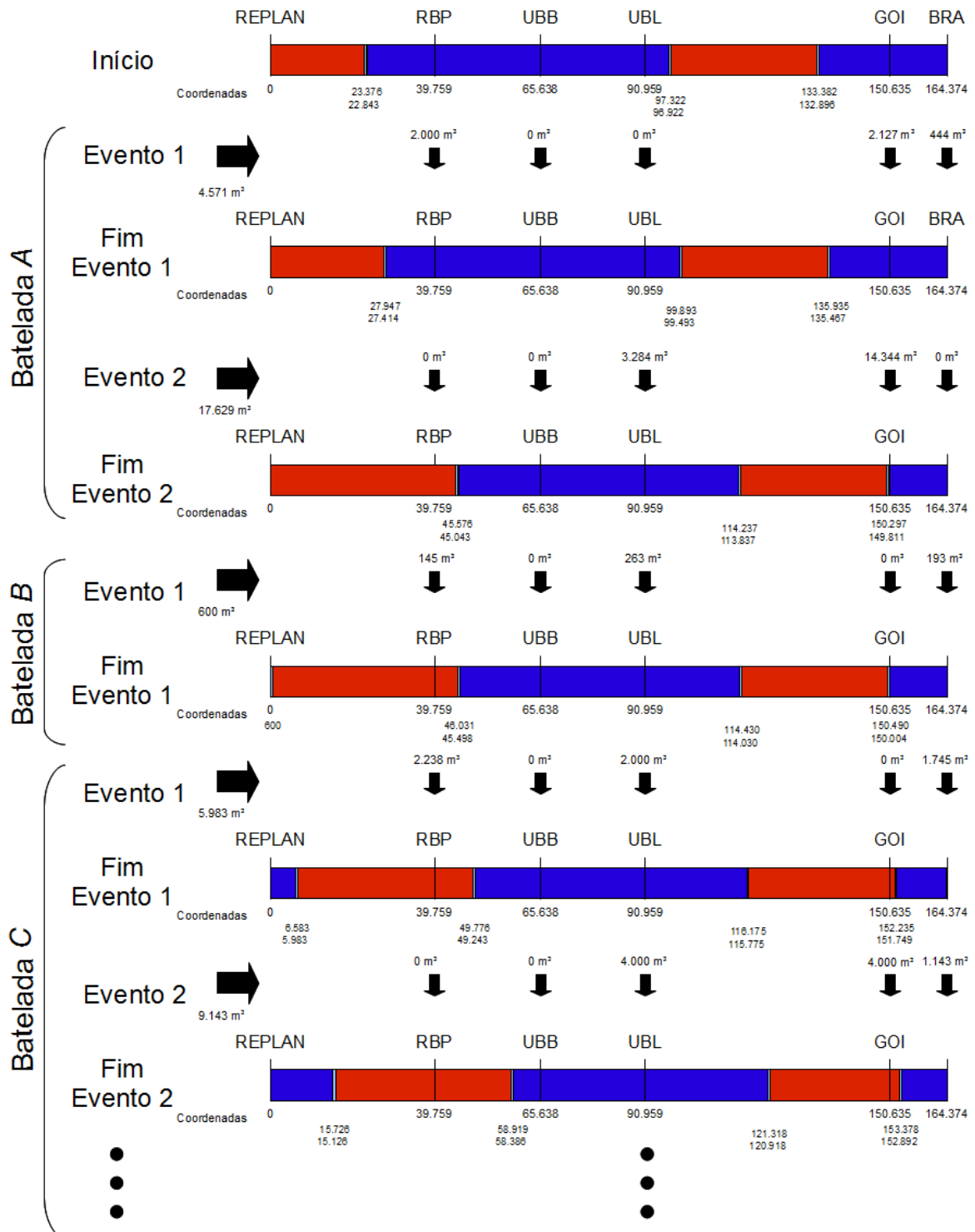


Figura 37 – Exemplo de Eventos e seus Impactos nas Coordenadas das Bateladas em Duto

A coordenada da batelada  $b$ , nos demais eventos do bombeio da batelada  $b'$ , deve ser igual à coordenada da batelada  $b$  no evento anterior somado o volume bombeado na origem da batelada de bombeio  $b'$  no evento  $e$ , diminuindo-se os efeitos das sangrias das bateladas  $b''$  durante este evento  $e$  (com  $b''$  sendo todas as bateladas posteriores a  $b$  e a própria  $b$ ).

$$\begin{aligned}
 Coord_{b',b,e} &= Coord_{b',b,e-1} + VBombE_{b',e} - \sum_{\substack{b'' \in B \\ b \leq b'' \leq b'}} \sum_{d \in D} VSangE_{b',b'',d,e} \\
 \forall (b',b,e) \in BBe, (b',b'',d,e) \in BBDe, (b',e) \in Be \mid e > 1
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

#### 4.4.4.2. Restrições Relacionadas à Ocorrência de Sangria

No primeiro evento não é possível haver sangria da batelada de bombeio. Contudo, no primeiro evento, a batelada de bombeio pode influenciar outras sangrias. Considerando-se um caso típico de batelada de bombeio com volume que equivale ao volume de vários trechos de duto, após algum tempo de bombeio, esta batelada já estará alcançando pontos de sangria nos órgãos. Mas, se sangrias ocorrerem, então um novo evento será configurado.

$$SangE_{b,b,d,e} = 0 \quad \forall (b,b,d,e) \in BBDe \mid e = 1 \tag{4.22}$$

No primeiro evento, tem-se como referência as coordenadas do último evento do bombeio anterior.

As restrições (4.23), (4.24), (4.25) e (4.26) garantem que apenas as bateladas que estavam em posição de serem sangradas ao final do evento anterior possam ser sangradas no evento corrente. As restrições (4.23) e (4.25) garantem que a “cabeça” da batelada está ou sobre o ponto de sangria ou já o tenha ultrapassado, enquanto as restrições (4.24) e (4.26) garantem que a “cauda” da batelada ainda não ultrapassou o ponto de sangria. Seguindo o exemplo da Figura 37, em GOI só poderão sangrar bateladas com a cabeça com coordenada igual ou superior a 150.635 e cauda inferior com coordenada inferior a este mesmo número, ou seja, somente a batelada que estiver passando pela base poderá sangrar nela.

$$\begin{aligned} \text{Coord}_{b',b,ne_{b'}} &\geq \text{VDuto}_d \cdot \text{SangE}_{b'+1,b,d,e} \\ \forall (b'+1,b,d,e) \in \text{BBDe}, (b',b,ne_{b'}) \in \text{BBE} \mid e=1 \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} \text{Coord}_{b',b,ne_{b'}} &\leq \text{VDuto}_d \cdot \text{SangE}_{b'+1,b-1,d,e} + \text{VDuto}_{|D|} \cdot (1 - \text{SangE}_{b'+1,b-1,d,e}) \\ \forall (b'+1,b-1,d,e) \in \text{BBDe}, (b',b,ne_{b'}) \in \text{BBE} \mid e=1 \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\text{Coord}_{b',b,e-1} \geq \text{VDuto}_d \cdot \text{SangE}_{b',b,d,e} \quad \forall (b',b,d,e) \in \text{BBDe}, (b',b,e-1) \in \text{BBE} \mid e > 1 \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} \text{Coord}_{b',b,e-1} &\leq \text{VDuto}_d \cdot \text{SangE}_{b',b-1,d,e} + \text{VDuto}_{|D|} \cdot (1 - \text{SangE}_{b',b-1,d,e}) \\ \forall (b',b-1,d,e) \in \text{BBDe}, (b',b,e-1) \in \text{BBE} \mid e > 1 \end{aligned} \quad (4.26)$$

#### 4.4.4.3. Restrições Relacionadas ao Volume das Sangrias

O volume da sangria deve ser no máximo a diferença entre a coordenada do duto e a coordenada da próxima batelada. A inequação (4.27) refere-se ao primeiro evento de bombeio, logo as coordenadas devem corresponder ao último evento de bombeio da batelada de bombeio anterior e a inequação (4.28) refere-se aos demais eventos de bombeio.

$$\begin{aligned} \text{VSangE}_{b',b,d,e} &\leq \text{VDuto}_d - \text{Coord}_{b'-1,b+1,ne_{b'-1}} + \text{VDuto}_{|D|} \cdot (1 - \text{SangE}_{b',b,d,e}) \\ \forall (b',b,d,e) \in \text{BBDe}, (b'-1,b+1,ne_{b'-1}) \in \text{BBE} \mid e=1 \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$\begin{aligned} \text{VSangE}_{b',b,d,e} &\leq \text{VDuto}_d - \text{Coord}_{b',b+1,e-1} + \text{VDuto}_{|D|} \cdot (1 - \text{SangE}_{b',b,d,e}) \\ \forall (b',b,d,e) \in \text{BBDe}, (b',b+1,e-1) \in \text{BBE} \mid e > 1 \end{aligned} \quad (4.28)$$

O somatório do volume sangrado da batelada  $b$ , durante o evento  $e$  no bombeio de  $b'$ , deve ser menor ou igual ao volume inicial de  $b$  nos dutos.

$$\sum_{(b',d,e) \in \text{BDe}} \text{VSangE}_{b',b,d,e} \leq \sum_{d \in D} \text{Vbatd}_{b,d} \quad \forall b \in B_{dut} \quad (4.29)$$

Para todos os bombeios  $b$  de origem. O somatório do volume sangrado de todas as bateladas  $b'$ , em todos os dutos  $d$ , durante todos os eventos  $e$ ; deve ser menor ou igual ao somatório dos volumes bombeados em todos os eventos  $e$  para esta batelada  $b$ .

$$\sum_{(b,d,e) \in BDe} VSangE_{b',b,d,e} \leq \sum_{e \in E} VBombE_{b,e} \quad \forall b \in B_{bomb} \quad (4.30)$$

Para todo o evento  $e$ , em todos os bombeios  $b$ , o somatório do volume do todas as sangrias, deve ser igual ao volume deste evento  $e$ , neste bombeio da batelada  $b$ .

$$VBombE_{b,e} = \sum_{(b',b,d,e) \in BBDe} VSangE_{b',b,d,e} \quad \forall (b,e) \in Be \quad (4.31)$$

A quantidade de deslocamento da batelada  $b$  ( $VDuto - Coord - VSangE$ ) é maior ou igual à quantidade de  $b'' \leq b$  que sangra nos órgãos seguintes. Mais uma vez quando se trata o primeiro evento, deve-se referenciar o último bombeio da batelada de bombeio anterior.

$$VDuto_d - Coord_{b'-1,b+1,ne_{b'-1}} - VSangE_{b',b,d,e} \geq \sum_{\substack{(b',b'',d',e) \in BBDe \\ b'' \leq b}} \sum_{\substack{d' > d}} VSangE_{b',b'',d',e} - VDuto_{|D|} \cdot (1 - SangE_{b',b,d,e}) \quad (4.32)$$

$$\forall (b',b,d,e) \in BBDe, (b'-1,b+1,ne_{b'-1}) \in BBe \mid e=1, D = last\_duto$$

$$VDuto_d - Coord_{b',b+1,e-1} - VSangE_{b',b,d,e} \geq \sum_{\substack{(b',b'',d',e) \in BBDe \\ b'' \leq b}} \sum_{\substack{d' > d}} VSangE_{b',b'',d',e} - VDuto_{|D|} \cdot (1 - SangE_{b',b,d,e}) \quad (4.33)$$

$$\forall (b',b,d,e) \in BBDe, (b',b+1,e-1) \in BBe \mid e > 1, D = last\_duto$$

A quantidade de deslocamento da batelada  $b$  é igual à quantidade de sangria nos dutos posteriores.

$$Coord_{b',b,e} - Coord_{b'-1,b,ne_{b'-1}} = \sum_{\substack{(b',b'',d,e) \in BBDe \\ b'' < b}} VSangE_{b',b'',d,e} \quad (4.34)$$

$$\forall (b',b,e) \in BBe, (b'-1,b,ne_{b'-1}) \in BBe \mid e=1$$

$$Coord_{b',b,e} - Coord_{b',b,e-1} = \sum_{\substack{(b',b'',d,e) \in BBDe \\ b'' < b}} VSangE_{b',b'',d,e} \quad (4.35)$$

$$\forall (b',b,e) \in BBe, (b',b,e-1) \in BBe \mid e > 1$$

O volume sangrado de uma batelada  $b$ , de um produto  $p$  num órgão  $o$ , em um período  $dia$  durante um evento  $e$  de bombeio de uma batelada  $b'$ , será o volume total da sangria

referente a esta batelada  $b$  neste órgão  $o$  durante o evento  $e$  de bombeio da batelada  $b'$  que é finalizado neste período  $dia$ .

A variável binária  $FEdia$  é referente ao dia do horizonte de programação no qual ocorre a sangria, sendo definida pelas equações (4.51), (4.52) e (4.53) explicadas na página 105.

$$VSangdia_{b',b,p,o,e,dia} \geq VSangE_{b',b,Ndut(o),e} - (VDuto_D \cdot (1 - FEdia_{b',e,dia}))$$

$$\forall (b',b,p,o,e) \in BBPOe, \forall (b',e,dia) \in BeH \quad (4.36)$$

$$VSangdia_{b',b,p,o,e,dia} \leq VSangE_{b',b,Ndut(o),e} + (VDuto_D \cdot (1 - FEdia_{b',e,dia})) + toler$$

$$\forall (b',b,p,o,e) \in BBPOe, \forall (b',e,dia) \in BeH \quad (4.37)$$

$$VSangdia_{b',b,p,o,e,dia} \leq VSangE_{b',b,Ndut(o),e} \cdot FEdia_{b',e,dia}$$

$$\forall (b',b,p,o,e) \in BBPOe, \forall (b',e,dia) \in BeH \quad (4.38)$$

#### 4.4.4.4. Restrições Relacionadas a Vazões e Sangrias

As vazões mínimas e máximas por duto  $d$  e produto  $p$ , devem estar dentro da faixa dos parâmetros de vazão máxima ( $vaz_{d,p}^{\max}$ ) e mínima ( $vaz_{d,p}^{\min}$ ).

$$VBombE_{b',e} - \sum_{b \in B_{sang}} \sum_{d' \in D, d' < d} VSangE_{b',b,d',e} \leq vaz_{d,p}^{\max} \cdot (fb_{b',e} - ib_{b',e})$$

$$\forall (b',e) \in Be, p \in P, d \in D \quad (4.39)$$

$$VBombE_{b',e} - \sum_{b \in B_{sang}} \sum_{d' \in D, d' > d} VSangE_{b',b,d',e} \geq vaz_{d,p}^{\min} \cdot (fb_{b',e} - ib_{b',e})$$

$$\forall (b',e) \in Be, p \in P, d \in D \mid d < last\_duto \quad (4.40)$$

Se houver um bombeio de  $b'$  no evento  $e$ , deverá haver pelo menos uma sangria em um dos dois últimos trechos. Na prática não é permitido que os dutos parem, exceto no último trecho e a restrição (4.41) garante isto, pois força que haja sangria em pelo menos um dos dois últimos pontos.

$$\sum_{b \in B_{sang}} \sum_{d \in D, d \geq |D|-1} SangE_{b',b,d,e} \geq BombE_{b',e} \quad \forall (b',e) \in Be \quad (4.41)$$

#### 4.4.4.5. Restrições de Relacionamento Temporal

O início do primeiro evento de bombeio da primeira batelada deve ocorrer no instante de tempo *init* (inicial do modelo). Como o modelo é executado várias vezes, deslocando-se o horizonte de tempo, o *init* é o tempo final da execução anterior do modelo. Para a primeira execução utiliza-se, por convenção, *init* = 0. Desta forma, o parâmetro *init* atua como um indicador do ponto de início do horizonte rolante de *scheduling*.

$$ib_{b',e} = init \quad \forall (b',e) \in Be \mid b' = nBatInic, e = 1 \quad (4.42)$$

O tempo final de bombeio do último evento de uma batelada *b* deverá respeitar o valor do parâmetro de tempo máximo calculado para o bombeio desta batelada *b*.

$$fb_{b,ne_b} \leq Tempo_b^{\max} \quad \forall b \in B_{bomb} \quad (4.43)$$

A duração de todo evento é limitada pela razão entre o volume bombeado e as vazões mínima e máxima no primeiro trecho de duto.

$$ib_{b,e} + \frac{VBombE_{b,e}}{vaz_{d,p}^{\max}} \leq fb_{b,e} \leq ib_{b,e} + \frac{VBombE_{b,e}}{vaz_{d,p}^{\min}} \quad (4.44)$$

$$\forall (b,e) \in Be, (b,p) \in BP, d = first(D)$$

De maneira similar, a duração de cada sangria está relacionada à razão entre o volume sangrado e as vazões máxima e mínima para aquela sangria, (4.45) e (4.46).

$$fs_{b',b,d,e} \geq is_{b',b,d,e} + \frac{VSangE_{b',b,d,e}}{\sum_{o,p} (vaz_{o,p}^{\max} - M \cdot (1 - SangE_{b',b,d,e}))} \quad (4.45)$$

$$\forall (b',b,d,e) \in BBDe, (b,p) \in BP, o = No_d$$

$$fs_{b',b,d,e} \leq is_{b',b,d,e} + \frac{VSangE_{b',b,d,e}}{\sum_{o,p} (vaz_{o,p}^{\min} + M \cdot (1 - SangE_{b',b,d,e}))} \quad (4.46)$$

$$\forall (b',b,d,e) \in BBDe, (b,p) \in BP, o = No_d$$

O tempo de início do primeiro evento de bombeio de uma batelada *b* coincide com o



final do último evento de bombeio da batelada anterior ( $b-1$ ).

$$ib_{b,e} = fb_{b-1,ne_{b-1}} \quad \forall (b,e) \in Be, e=1 \quad (4.47)$$

Para os demais eventos, o tempo de início do evento de bombeio de uma batelada  $b$  é igual ao tempo de final de bombeio do evento anterior da mesma batelada  $b$ .

$$ib_{b,e} = fb_{b,e-1} \quad \forall (b,e) \in Be, e > 1 \quad (4.48)$$

O início da sangria de uma batelada  $b$  em um duto  $d$  durante o evento  $e$  de bombeio da batelada  $b'$  deve ser igual ao início do evento (4.49) – assim como o final da sangria deve ser igual ao final do evento de bombeio na origem (4.50).

$$is_{b',b,d,e} = ib_{b',e} \quad (4.49)$$

$$\forall (b',b,d,e) \in BBDe$$

$$fs_{b',b,d,e} = fb_{b',e} \quad (4.50)$$

$$\forall (b',b,d,e) \in BBDe$$

O final de um evento  $e$  de bombeio de uma batelada  $b'$  só ocorrerá em um período  $dia$  (4.51). E fim deste  $dia$  será após a hora de fim do evento  $e$  do bombeio da batelada  $b'$  (4.52), bem como, o início deste  $dia$  será anterior à hora de fim do evento  $e$  do bombeio da batelada  $b'$  (4.53).

$$\sum_{b',e,dia} FE_{dia_{b',e,dia}} \leq BombE_{b',e} \quad (4.51)$$

$$\forall (b',e,dia) \in BeH$$

$$fb_{b',e} \leq \left[ \sum_{b',e,dia} (FE_{dia_{b',e,dia}} \cdot (dia \cdot 24)) \right] + M \cdot (1 - BombE_{b',e}) \quad (4.52)$$

$$\forall (b',e,dia) \in BeH$$

$$fb_{b',e} \geq \left[ \sum_{b',e,dia} (FE_{dia_{b',e,dia}} \cdot ((dia - 1) \cdot 24)) \right] - M \cdot (1 - BombE_{b',e}) \quad (4.53)$$

$$\forall (b',e,dia) \in BeH$$

#### 4.4.4.6. Restrições de Controle de Estoque nas Bases

O estoque inferior do primeiro dia para um determinado órgão e produto deve ser o estoque inicial deduzido a demanda do primeiro dia (4.54). Para os demais dias, considera-se o estoque inferior do dia anterior, deduzida a demanda do dia atual, somados os volumes sangrados do produto em questão e a parte relativa ao sangramento de selo para este produto neste órgão, no dia anterior (4.55).

$$esti_{o,p,dia} = est_{o,p}^{inic} - Dem_{o,p,dia} \quad \forall (o, p) \in OP, dia = 1 \quad (4.54)$$

$$esti_{o,p,dia} = esti_{o,p,dia-1} - Dem_{o,p,dia} + \sum_{b',b,p,o,e} VSangdia_{b',b,p,o,e,dia-1} + \sum_{b',b,px,o,e} (PctSelo_{px,p} \cdot VSangdia_{b',b,px,o,e,dia-1}) \quad \forall (o, p) \in OP, dia > 1 \quad (4.55)$$

Já o estoque superior do primeiro dia é o estoque inicial para este órgão e produto, somando-se os volumes de sangria relativos a este produto e órgão para este dia, além da parcela do volume da sangria do produto selo relativa a este órgão, produto e dia (4.56). Para os demais dias, além de se considerar a demanda para este produto e órgão do dia anterior, ao invés de se considerar o estoque inicial, considera-se o estoque superior do dia anterior (4.57).

$$ests_{o,p,dia} = est_{o,p}^{inic} + \sum_{b',b,p,o,e} VSangdia_{b',b,p,o,e,dia} + \sum_{b',b,px,o,e} (PctSelo_{px,p} \cdot VSangdia_{b',b,px,o,e,dia}) \quad \forall (o, p) \in OP, dia = 1 \quad (4.56)$$

$$ests_{o,p,dia} = ests_{o,p,dia-1} - Dem_{o,p,dia-1} + \sum_{b',b,p,o,e} VSangdia_{b',b,p,o,e,dia} + \sum_{b',b,px,o,e} (PctSelo_{px,p} \cdot VSangdia_{b',b,px,o,e,dia}) \quad \forall (o, p) \in OP, dia > 1 \quad (4.57)$$

A restrição (4.58) trata a violação de estoque operacional mínimo, enquanto a (4.59) aborda a violação de estoque operacional máximo.

$$esti_{o,p,dia} + vlastro_{o,p} \geq Lastro_{o,p} \quad \forall (o, p) \in OP, \forall dia \quad (4.58)$$

$$ests_{o,p,dia} - vcap_{o,p} \geq Cap_{o,p,dia} \quad \forall (o, p) \in OP, \forall dia \quad (4.59)$$

As inequações (4.60) e (4.61) abordam respectivamente as violações de estoque meta mínimo e máximo.

$$esti_{o,p,dia} + vest\_min_{o,p} \geq E\ min_{o,p} \quad \forall (o,p) \in OP, \forall dia \quad (4.60)$$

$$ests_{o,p,dia} - vest\_max_{o,p} \geq E\ max_{o,p,dia} \quad \forall (o,p) \in OP, \forall dia \quad (4.61)$$

As inequação (4.62) e (4.63) determinam, respectivamente o estoque mínimo e o estoque máximo normalizado para todos os órgãos  $o$  e produtos  $p$ .

$$maest_{o,p} \geq \left( \frac{ests_{o,p,dia}}{Cap_{o,p,dia}} \right) \quad \forall (o,p) \in OP, dia \in Dias \quad (4.62)$$

$$miest_{o,p} \leq \left( \frac{esti_{o,p,dia}}{Cap_{o,p,dia}} \right) \quad \forall (o,p) \in OP, dia \in Dias \quad (4.63)$$

Nas restrições (4.64) e (4.65) aparecem, respectivamente, as variáveis  $miestabs_p$  e  $maestabs_p$  que indicam os valores mínimos e máximos normalizados de estoque por produto dentro do conjunto de todos os órgãos. Enquanto a inequação (4.66) relaciona a diferença ( $dif_p$ ) entre estes estoques máximos e mínimos absolutos para cada produto  $p$ .

$$miestabs_p \leq miest_{o,p} \quad \forall (o,p) \in OP \quad (4.64)$$

$$maestabs_p \geq maest_{o,p} \quad \forall (o,p) \in OP \quad (4.65)$$

$$dif_p \geq maestabs_p - miestabs_p \quad \forall p \quad (4.66)$$

#### 4.4.4.7. Restrições Relativas às Bateladas de Selo.

As restrições abaixo são condições específicas a serem observadas durante o bombeio de bateladas selo. Neste caso, uma quantidade pequena (~400 a 600 m<sup>3</sup>) de um produto especial (Diesel Transferência) é bombeado na REPLAN. Assim, um evento de pequena duração é gerado durante o bombeio do selo e, neste evento, descontinuidades das sangrias que vinham ocorrendo nos demais órgãos podem vir a acontecer e, portanto, devem ser evitadas. Por outro lado, sangrias podem tender a acontecer somente durante o bombeio da batelada selo, condição que também deve ser evitada.

As restrições (4.67), (4.68) e (4.69) forçam que, se houver bombeio de selo no evento  $e$ , se houve sangrias no evento  $e-1$ , deve também haver sangrias no evento  $e$ . Ou seja, deve haver continuidade de sangrias que já vinham ocorrendo.

O caso da existência (continuação) de sangrias no evento  $e+1$ , também é verificado. Assim, se houver bombeio de selo no evento  $e$ , se existirem sangrias no evento  $e+1$ , deve também haver a continuidade destas sangrias no evento  $e$ .

$$BombE_{b',e} = flagv_{b'}^{\min} \quad \forall (b',e) \in Be; (b',p) \in BP \quad | p = Selo \quad (4.67)$$

$$\begin{aligned} SangE_{b',b,d,e} &\geq SangE_{bx,b,d,ne(bx)} + BombE_{bx,ne(bx)} - 1 \\ \forall (bx,b,d,ne(bx)) \in BBDe; \quad (b',b,d,e) \in BBDe \quad | e = 1; \quad (b',p) \in BP \quad | p = Selo; \quad (4.68) \\ b' &= bx + 1; \quad \left( (flagv_{b'}^{\min} = 1) \circ (vol_{b'}^{\min} > 0) \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SangE_{b',b,d,e} &\leq SangE_{bx,b,d,ne(bx)} - BombE_{bx,ne(bx)} + 1 \\ \forall (bx,b,d,ne(bx)) \in BBDe; \quad (b',b,d,e) \in BBDe \quad | e = 1; \quad (b',p) \in BP \quad | p = Selo; \quad (4.69) \\ b' &= bx + 1; \quad \left( (flagv_{b'}^{\min} = 1) \circ (vol_{b'}^{\min} > 0) \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SangE_{b',b,d,e} &\geq SangE_{b'',b,d,e} + BombE_{b'',e} - 1 \\ \forall (bx,b,d,ne(bx)) \in BBDe; \quad (b',b,d,e) \in BBDe \quad | e = 1; \quad (b'',b,d,e) \in BBDe \quad | e = 1; \quad (4.70) \\ (b',p) \in BP \quad | p = Selo; \quad b' &= bx + 1; b' = b'' - 1; \quad \left( (flagv_{b'}^{\min} = 1) \circ (vol_{b'}^{\min} = 0) \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SangE_{b',b,d,e} &\leq SangE_{b'',b,d,e} - BombE_{b'',e} + 1 \\ \forall (bx,b,d,ne(bx)) \in BBDe; \quad (b',b,d,e) \in BBDe \quad | e = 1; \quad (b'',b,d,e) \in BBDe \quad | e = 1; \quad (4.71) \\ (b',p) \in BP \quad | p = Selo; \quad b' &= bx + 1; b' = b'' - 1; \quad \left( (flagv_{b'}^{\min} = 1) \circ (vol_{b'}^{\min} = 0) \right) \end{aligned}$$

As restrições (4.72) e (4.73) estabelecem que não deve existir sangria do produto selo nos primeiros três trechos de dutos e que, portanto, os volumes de sangria do produto selo nestes primeiros três trechos também será zero. Ou seja, só haverá sangria do produto selo nos dois últimos trechos, nas bases de Goiânia e Brasília.

$$VSangE_{b',b,d,e} \leq SangE_{b',b,d,e} \quad \forall (b',b,d,e) \in BBDe, p = Selo, d < 4 \quad (4.72)$$

$$SangE_{b',b,d,e} \leq 0 \quad \forall (b',b,d,e) \in BBDe, p = Selo, d < 4 \quad (4.73)$$

#### 4.4.4.8. Restrições Auxiliares dos Componentes de Estoque da Função Objetivo

As restrições (4.74) e (4.75) relacionam as variáveis de violação de estoque meta desejável. Sendo na (4.74) a violação abaixo do estoque meta e na (4.75) a violação acima, neste caso considerando-se como faixa aceitável até o estoque máximo.

$$VMetami_{o,p} \geq \left( \frac{EMeta_{o,p}}{Capr_{o,p}} \right) - miest_{o,p} \quad \forall (o, p) \in OP \quad (4.74)$$

$$VMetama_{o,p} \leq maest_{o,p} - Emax_{o,p} \quad \forall (o, p) \in OP \quad (4.75)$$

As restrições abaixo normalizam o máximo dos demais componentes de controle de estoque da função objetivo. Sendo que a (4.76) normaliza o máximo da violação do estoque mínimo de lastro. A inequação (4.77) normaliza o máximo de violação da capacidade de estoque. Enquanto as (4.78) e (4.79) normalizam, respectivamente, o máximo de violação das faixas mínimas e máximas de estoque.

$$vlast \geq \left( \frac{vlastro_{o,p}}{Capr_{o,p}} \right) \quad \forall (o, p) \in OP \quad (4.76)$$

$$vcp \geq \left( \frac{vcap_{o,p}}{Capr_{o,p}} \right) \quad \forall (o, p) \in OP \quad (4.77)$$

$$vmi \geq \left( \frac{vest_{\min_{o,p}}}{Capr_{o,p}} \right) \quad \forall (o, p) \in OP \quad (4.78)$$

$$vma \geq \left( \frac{vest_{\max_{o,p}}}{Capr_{o,p}} \right) \quad \forall (o, p) \in OP \quad (4.79)$$

#### 4.4.5. Resumo dos Relacionamentos no Modelo

A lógica desta série de restrições que regem o modelo PLIM para o problema em análise parte do conceito descrito na Figura 25. Realiza-se uma modelagem baseada em eventos, onde a partir de eventos de bombeio na origem, se relacionam: variáveis de sangria, vazão, volumes e coordenadas de bateladas ao longo de todo o sistema. A Figura 38 ilustra as

relações entre variáveis do modelo PLIM elaborado por meio das expressões (4.1) a (4.79).

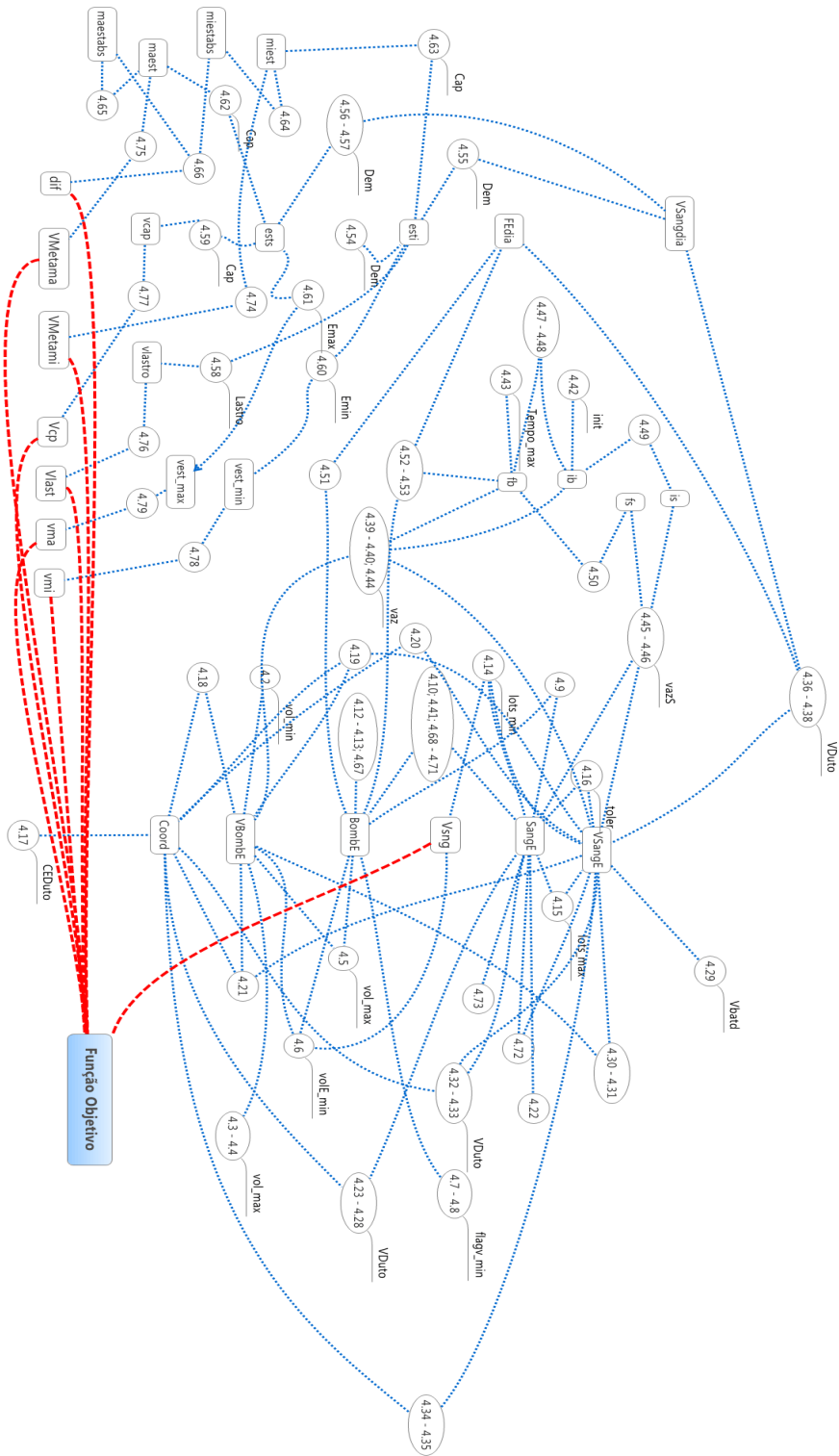


Figura 38 – Relações entre as Variáveis no Modelo PLIM

## 5. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Neste capítulo é explicada a métrica para avaliação da solução completa; são analisados os cenários testados; bem como são descritos os procedimentos e o processo de determinação dos parâmetros de otimização e os pesos da função objetivo.

### 5.1. AVALIAÇÃO DA SOLUÇÃO COMPLETA

Para avaliar a solução completa buscou-se uma métrica para avaliar o Nível de Serviço ao cliente.

Segundo Correa, Giansesi e Caon (2001), nível de serviço ao cliente é composto pelos aspectos que influenciam a relação entre fornecedor e cliente. Dependendo da aplicabilidade de cada operação utilizam-se alguns ou todos os aspectos a seguir:

Disponibilidade de produto para pronta entrega;

*Lead Time* ou prazo de entrega do produto contado a partir do recebimento do pedido até a entrega efetiva do produto acabado;

Confiabilidade da data de entrega informada ao cliente;

Flexibilidade de entrega, facilidade do fornecedor em modificar quantidades e datas a partir das necessidades do cliente.

Tanto Stevenson (2001) quanto Correa, Giansesi e Caon (2001) afirmam que é necessário determinar o correto nível de serviço que se deseja atingir, pois um alto nível tem como consequência um alto custo, e este correto nível de serviço depende, além do custo, de outras características da operação como as relacionadas com as especificidades do cliente, do produto e da cadeia de suprimentos como um todo.

A indústria de petróleo, por ser considerada uma atividade essencial para todas as outras cadeias industriais, tem a obrigação social e jurídica de manter o nível de serviços ao cliente no mais alto patamar possível. Portanto o nível pretendido é o máximo, independentemente dos custos associados.

Em um documento interno da PETROBRAS para definição de requisitos de um sistema de movimentação de derivados, foi definido que é primordial que toda a demanda e escoamento devam ser atendidos no período de uma semana e que é desejável o atendimento dos requisitos diariamente, mas sendo admitida alguma tolerância em alguns casos

(PETROBRAS; UTFPR; UNICAMP, 2007).

Considerando os aspectos listados por Correa, Giansesi e Caon (2001) e norteado pelo documento de requisitos de um sistema correlato (PETROBRAS; UTFPR; UNICAMP, 2007), estipulou-se uma métrica de medição do nível de serviço composta de dois componentes:

- Nível de Serviço em Função da Demanda Atendida (Disponibilidade de Produtos para o Cliente / Confiabilidade da data de entrega). Mede a quantidade de demanda atendida, quando atendida com atraso haverá impacto para o cliente. Abaixo, na Tabela 5.1 têm-se as faixas de nível de serviço dos volumes de demanda atendidos adotada na avaliação da solução.

Tabela 5.1 – Disponibilidade de Produtos / Confiabilidade Data de Entrega – Nível de Serviço em Função da Demanda Atendida

Nível de Serviço	Descrição	Justificativa
100%	Volume atendido no momento da necessidade (VD1).	Pleno atendimento a demanda do cliente.
70%	Volume atendido com até dois dias de atraso (VD2).	Há um pequeno transtorno ao cliente que deverá atrasar sua retirada, requer uma negociação prévia, mas o estoque do cliente deverá absorver a variação.
30%	Volume atendido com mais de dois dias e até seis dias de atraso (VD3).	Causa transtornos ao cliente, uma negociação deverá ser encaminhada para que ou a retirada seja feita com atraso (caso haja estoque para absorver) ou outro modal seja utilizado para o transporte.
0%	Volume não atendido ou atendido com mais de seis dias de atraso (VD4).	Difícilmente o cliente terá estoques reguladores para absorver este atraso, provavelmente outro modal deverá ser utilizado para suprir esta demanda, extrapola o limite definido.

- Nível de Serviço em Função do Limite Superior de Estoque (Confiabilidade da data de entrega). Neste caso avalia-se o excesso de estoque planejado, em casos onde se projeta um estoque acima da capacidade física, haverá uma negociação com o cliente a fim de que ele retire o seu pedido em um período anterior. Na Tabela 5.2 têm-se as faixas de nível de serviço em função dos dias em que há violação de estoque ou não.



Tabela 5.2 – Confiabilidade da Data de Entrega – Nível de Serviço em Função do Limite Superior de Estoque

Nível de Serviço	Descrição	Justificativa
100%	Dias sem violação do estoque máximo ( <i>DE1</i> ).	Pleno atendimento.
70%	Dias em que se viola com pequenos volumes corrigidos em até 48 h ( <i>DE2</i> ).	Há um pequeno transtorno ao cliente que deverá adiantar sua retirada em até dois dias, requer uma negociação prévia, mas normalmente há espaço na capacidade de estoque do cliente.
30%	Dias em que se projeta uma violação de estoque considerável de dois dias e até seis dias ( <i>DE3</i> ).	Causa transtornos ao cliente, uma negociação deverá ser encaminhada para que ou a retirada seja adiantada (caso haja espaço em estoque para absorver) ou outro modal deverá ser utilizado para transferir o produto para outra base.
0%	Dias em que o estoque é violado e permanecerá acima dos limites por mais de seis dias. ( <i>DE4</i> ).	Difícilmente o cliente terá espaço em estoque para receber este excedente, provavelmente um transporte por outro modal deverá ser providenciado para aliviar esta base, extrapola o limite definido.

Desta forma, a avaliação da solução completa é representada pelas equações abaixo.

$$NS_{Dem} = \left( \frac{(1 \cdot VD1 + 0,7 \cdot VD2 + 0,3 \cdot VD3)}{(VD1 + VD2 + VD3 + VD4)} \right) \quad (5.1)$$

$$NS_{Est} = \left( \frac{(1 \cdot DE1 + 0,7 \cdot DE2 + 0,3 \cdot DE3)}{(DE1 + DE2 + DE3 + DE4)} \right) \quad (5.2)$$

$$NS = \left( \frac{(NS_{Dem} + NS_{Est})}{2} \right) \quad (5.3)$$

Onde:

$NS_{Dem}$ : Nível de serviço em função da demanda atendida;

$VD1$ : Volume de demanda atendida dentro do prazo exato;

$VD2$ : Volume de demanda atendida com até dois dias de atraso;

$VD3$ : Volume de demanda atendida com atraso entre dois e seis dias;

$VD4$ : Volume de demanda não atendida ou atendida com atraso superior a seis

dias;

$NS_{Est}$ : Nível de serviço em função do limite superior de estoque;

$DE1$ : Número de dias em que não há violação de estoques;

$DE2$ : Número de dias em que se viola com pequenos volumes corrigidos em até 48 h;

$DE3$ : Número de dias em que se projeta uma violação de estoque considerável de dois dias e até seis dias;

$DE4$ : Número de dias em que o estoque é violado e permanecerá acima dos limites por mais de seis dias.

$NS$ : Nível de serviço da solução total.

É importante ressaltar que esta métrica tem como principal objetivo elencar as soluções entre si, comparar uma com a outra, e não dar um grau de valor ou importância.

## 5.2. CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS

Para a avaliação do modelo proposto foram aplicados cenários referentes a seis períodos distintos, cada um com duração de um mês. Estes cenários refletem as variações sazonais típicas de ciclos de safra e entre safra (alto e baixo consumo de diesel) e períodos normais e de férias (baixo e alto consumo de gasolina), resultando em flutuações não somente no consumo total dos produtos do sistema, como também no perfil base a base.

Estes cenários possuem demandas, produções e estoques baseados em períodos reais. As condições iniciais de dutos foram aproximadas com base nas informações disponíveis, podendo haver erros.

Não foram fornecidos pela PETROBRAS cenários com previsão de manutenção de tanques. O processo de geração de cenários e a escolha dos períodos propícios para a manutenção de equipamentos é uma tarefa técnica de alta complexidade e fora do escopo deste trabalho. A inclusão de manutenções de forma arbitrária, sem este estudo, desqualificaria a análise dos resultados. Portanto não foram gerados e testados cenários com manutenção de tanques, sendo esta uma limitação e sugestão de testes para trabalhos futuros.

Cada um destes períodos, designados como 1, 2, 3, 4, 5 e 6 equivalem a meses, e para cada um dos períodos foram criados três cenários:

- a. Demanda linear, sem variação diária ou semanal de consumo;

- b. Demanda variando segundo média diária histórica. Com base no histórico, variou-se a demanda proposta dia a dia, base a base.
- c. Demanda variando diariamente segundo um perfil médio sazonal ao longo do mês (segunda quinzena com um consumo 10% maior do que na primeira) e ao longo da semana (Tabela 5.3).

A inclusão da demanda variável introduz um desafio adicional para o modelo matemático.

Desta forma totalizam-se dezoito cenários com características e níveis de dificuldade distintos para serem avaliados.

Tabela 5.3 – Sazonalidade de Demanda Semanal para os Cenários *c*

Dia da Semana	Participação no Consumo
Domingo	0,00%
Segunda	21,43%
Terça	16,43%
Quarta	18,57%
Quinta	16,43%
Sexta	21,43%
Sábado	5,71%

Um dos aspectos que torna a resolução de um cenário mais difícil é uma demanda maior, pois faz com que o sistema trabalhe mais próximo de seu limite operacional tanto nos aspectos de capacidade de estoque, como tamanho de lotes e vazões (Tabela 5.4 e Figura 39). Outros aspectos como o estado inicial do sistema (estoques nas bases e em duto) e variações de consumo entre as bases e os produtos (Figura 40) também são muito relevantes e demandam uma análise mais profunda.

Desta forma deduz-se que os cenários com uma variação de demanda total positiva possuem uma tendência de possuírem um grau de dificuldade maior na obtenção de soluções, da mesma forma os que têm uma demanda menor tendem a serem mais fáceis.

Tabela 5.4 – Variações de Demanda nos Cenários

Cenário	Participação Diesel	Participação Gasolina	Variação Demanda Diesel*	Variação Demanda Gasolina*	Variação Demanda Total*
1a	69,41%	30,59%	-6,47%	11,72%	-1,57%
1b	69,30%	30,70%	-5,52%	13,45%	-0,41%
1c	69,41%	30,59%	-6,47%	11,72%	-1,57%
2a	72,45%	27,55%	-9,83%	-7,06%	-9,08%
2b	70,37%	29,63%	-5,80%	7,49%	-2,22%
2c	72,45%	27,55%	-9,83%	-7,06%	-9,08%
3a	73,72%	26,28%	-5,48%	-8,69%	-6,35%
3b	74,04%	25,96%	-1,93%	-6,80%	-3,24%
3c	73,72%	26,28%	-5,48%	-8,69%	-6,35%
4a	74,61%	25,39%	4,23%	-3,86%	2,05%
4b	74,06%	25,94%	2,27%	-2,92%	0,87%
4c	74,61%	25,39%	4,23%	-3,86%	2,05%
5a	73,66%	26,34%	9,18%	5,81%	8,27%
5b	74,73%	25,27%	7,49%	-1,46%	5,08%
5c	73,66%	26,34%	9,18%	5,81%	8,27%
6a	74,97%	25,03%	6,21%	-3,86%	3,50%
6b	74,11%	25,89%	7,82%	2,09%	6,28%
6c	74,96%	25,04%	6,21%	-3,85%	3,50%

\*A variação da demanda refere-se ao desvio em relação à média das demandas para aquele produto nos cenários analisados.

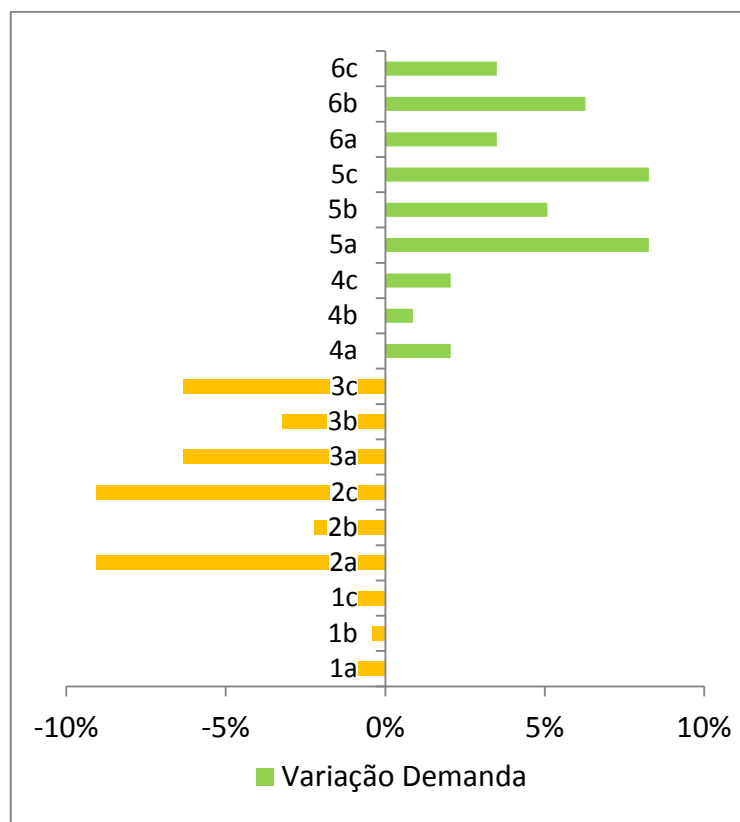


Figura 39 – Variação da Demanda nos Cenários

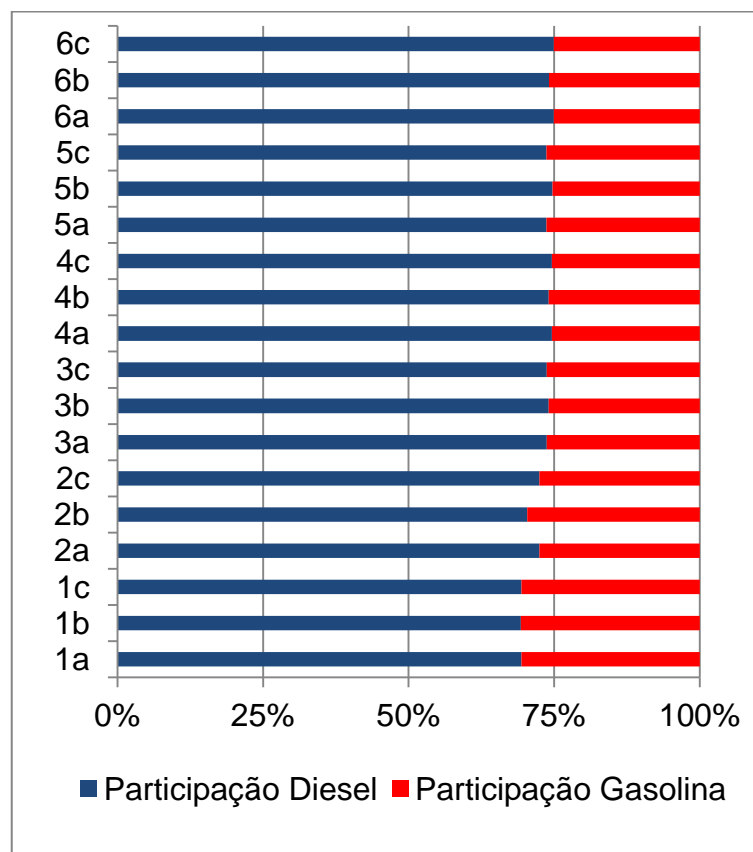


Figura 40 – Participação de Diesel e Gasolina nos Cenários

Outro aspecto que contribui para a complexidade de um cenário é a quantidade de dias que a capacidade de estoque pode suprir a demanda, ou seja, o número máximo de dias que um ponto poderia ficar sem suprimento caso tivesse sido abastecido até o estoque máximo. Considerando-se a demanda mensal de cada cenário e a capacidade de estoque de cada base (Tabela 2.1), obtêm-se o número de dias que a capacidade de estoques é capaz de suprir a demanda média (Tabela 5.5). É importante observar que para os cenários onde há variação diária (terminações *b* e *c*), durante o período de vigência do cenário haverá dias onde a situação será mais rigorosa.

Tabela 5.5 – Número de Dias que a Capacidade de Estoque Supriria a Demanda Média.

Cen.	Ribeirão Preto		Uberaba		Uberlândia		Goiânia		Brasília	
	Gasol	Diesel	Gasol	Diesel	Gasol	Diesel	Gasol	Diesel	Gasol	Diesel
1a	23,92	11,83	28,77	20,93	13,63	9,60	9,16	12,54	8,29	10,93
1b	27,94	11,58	28,47	23,99	12,16	10,34	9,25	11,74	7,77	10,79
1c	23,91	11,83	28,75	20,93	13,63	9,60	9,16	12,54	8,29	10,93
2a	30,86	10,29	34,03	22,34	15,16	10,80	10,30	12,77	9,73	10,40
2b	25,65	9,45	27,51	21,69	12,63	10,89	8,97	12,13	8,66	10,03
2c	30,86	10,29	34,02	22,34	15,16	10,80	10,30	12,77	9,73	10,40
3a	33,48	8,45	35,16	21,61	14,93	10,91	11,00	13,55	10,22	10,75
3b	40,68	8,30	35,24	21,27	14,28	10,73	11,25	12,32	9,09	11,62
3c	33,48	8,45	35,17	21,61	14,92	10,91	11,00	13,56	10,22	10,75
4a	34,11	7,33	34,03	20,25	14,45	10,32	10,30	11,29	8,73	9,92
4b	35,04	7,51	34,03	20,08	13,33	10,27	10,12	11,54	8,81	10,39
4c	34,11	7,33	34,02	20,26	14,45	10,32	10,30	11,29	8,73	9,92
5a	30,44	7,89	31,64	19,14	13,63	9,60	9,70	10,90	8,29	9,94
5b	33,87	7,82	34,18	19,81	14,04	9,79	10,04	10,95	9,24	10,83
5c	30,44	7,89	31,64	19,14	13,63	9,60	9,70	10,90	8,29	9,94
6a	33,48	8,23	35,16	19,14	13,63	9,32	11,00	11,40	9,15	10,41
6b	31,50	7,56	34,13	19,29	13,95	9,62	9,84	11,48	8,76	9,95
6c	33,48	8,23	35,15	19,14	13,63	9,32	11,00	11,40	9,15	10,41

Sob este aspecto o primeiro fator a dificultar a resolução de um cenário é o baixo número de dias de autonomia de estoque para determinado produto, o que pode ser complicado com um maior número de locais e produtos distintos com este mesmo tipo de restrição disputando os recursos, uma vez que há limitações de vazão e sangrias simultâneas.

### **5.3. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE OTIMIZAÇÃO**

O projeto dos experimentos é crucial para se atingir os objetivos desejados, segundo Freitas Filho (2001) o primeiro e principal aspecto a se observar é o bom senso. A partir do bom senso deve-se projetar o experimento para se garantir as respostas com o esforço necessário.

Os parâmetros que se necessitam determinar são os pesos dos componentes da função objetivo e as configurações de execução.

Quando vários parâmetros ou fatores devem ser determinados em um experimento, este experimento é do tipo fatorial. Há algumas maneiras de se projetar e realizar este tipo de experimento (MONTGOMERY, 2008).

Se os fatores são todos independentes entre si, deve-se realizar a variação de cada um dos fatores e analisá-la também de forma independente.

Já se todos são dependentes entre si deve-se realizar todas as combinações das variações de fatores ou, através de métodos estatísticos, uma parcela destas combinações que represente a totalidade. Neste caso o experimento é classificado como fracionado e os seus resultados estão sujeitos a uma margem de erro.

Ou ainda, divide-se o experimento em grupos de parâmetros conforme suas correlações e, dentro de cada grupo, resolve-se de acordo com o descrito no parágrafo anterior (MONTGOMERY, 2008).

Por possuírem uma independência entre si, dois grupos de experimentos foram executados para determinar respectivamente estes dois conjuntos de parâmetros, descritos a seguir.

#### **5.3.1. Parâmetros da Função Objetivo**

Conforme descrito na seção 4.4.3, a função objetivo é composta de vários componentes cujo objetivo é manter o estoque dentro de uma faixa operacional que possibilite que a atual e a próxima iteração atinjam soluções sem falta ou excesso de produtos, a fim de se obter um máximo nível de serviço para a solução como um todo.

O objetivo é minimizar os seguintes componentes:

- $VMetami_{o,p}$  e  $VMetama_{o,p}$ : Violações abaixo do valor de meta de estoque mínimo e acima do valor de estoque meta máximo respectivamente, por órgão e produto. Estes componentes são ponderados por  $\alpha_1$ ;

- $vma$  e  $vmi$ : Violações máximas de estoque máximo e estoque mínimo, respectivamente, ponderados por  $\alpha_2$ ;

- $Vcp$  e  $Vlast$ : Violações máximas da capacidade de estoque e do nível de lastro, ponderadas pelo fator  $\alpha_3$ ;

- $dif_p$ : Diferença entre o maior e o menor estoque normalizado por produto  $p$ , ponderado pelo fator  $\alpha_4$ .

Foi planejado um conjunto de experimentos para determinar estatisticamente qual a melhor configuração dos parâmetros ( $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  e  $\alpha_4$ ). Considerou-se que cada um dos cinco parâmetros pode assumir um valor baixo ou um alto.

Este tipo de experimento é classificado como  $2^k$  fatorial, onde o número de experimentos para cobrir todas as combinações é 2 elevado à  $k$  parâmetros (MONTGOMERY, 2008). Considerando-se cinco fatores, o número total de experimentos é trinta e dois. Utilizando-se do bom senso (FREITAS FILHO, 2001), foi decidido que todas as trinta e duas combinações seriam testadas a fim de se aumentar a precisão da resposta.

Na seção 5.2 há uma descrição das características de cada cenário disponível para testes, e dentre aqueles cenários, optou-se pelo cenário *6a* para executar os testes por tratar-se de um cenário dentro do grupo dos difíceis para a obtenção de soluções.

Na configuração dos parâmetros de execução optou-se por uma configuração que garantisse factibilidade em grande parte das execuções. Para tal escolheu-se o enfoque em factibilidade no *solver cplex* e o tempo de execução máximo por iteração de 180s.

Considerou-se, também, que cada um dos parâmetros poderia receber um valor baixo ou um valor alto, para baixo utilizou-se o valor de 100 e para alto, o valor de 1.000.

Desta forma, numeraram-se as soluções obtidas de acordo com a Tabela 5.6.



Tabela 5.6 – Definição dos Experimentos para Obtenção dos Parâmetros da Função Objetivo

$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	Solução
Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	<i>SolFO_00</i>
Baixo	Baixo	Baixo	Alto	<i>SolFO_01</i>
Baixo	Baixo	Alto	Baixo	<i>SolFO_02</i>
Baixo	Baixo	Alto	Alto	<i>SolFO_03</i>
Baixo	Alto	Baixo	Baixo	<i>SolFO_04</i>
Baixo	Alto	Baixo	Alto	<i>SolFO_05</i>
Baixo	Alto	Alto	Baixo	<i>SolFO_06</i>
Baixo	Alto	Alto	Alto	<i>SolFO_07</i>
Alto	Baixo	Baixo	Baixo	<i>SolFO_08</i>
Alto	Baixo	Baixo	Alto	<i>SolFO_09</i>
Alto	Baixo	Alto	Baixo	<i>SolFO_10</i>
Alto	Baixo	Alto	Alto	<i>SolFO_11</i>
Alto	Alto	Baixo	Baixo	<i>SolFO_12</i>
Alto	Alto	Baixo	Alto	<i>SolFO_13</i>
Alto	Alto	Alto	Baixo	<i>SolFO_14</i>
Alto	Alto	Alto	Alto	<i>SolFO_15</i>

A avaliação de cada uma das configurações de peso da função objetivo seguem as equações (5.1), (5.2) e (5.3).

Na Tabela 5.7 são apresentados os resultados atingidos com cada uma das configurações possíveis de pesos para os componentes da função objetivo.

Tabela 5.7 – Resultados dos Experimentos de Determinação dos Parâmetros da Função Objetivo

Solução	Tempo Execução Global (h:mm:ss)	$NS_{Est}$	$NS_{Dem}$	$NS$ <sup>9</sup>
<i>SolFO_00</i>	0:37:13	74,84%	86,12%	80,48%
<i>SolFO_01</i>	0:25:42	84,88%	92,86%	88,87%
<i>SolFO_02</i>	0:31:25	77,57%	91,95%	84,76%
<i>SolFO_03</i>	0:25:26	100,00%	99,67%	99,84%
<i>SolFO_04</i>	0:30:12	76,49%	87,99%	82,24%
<i>SolFO_05</i>	0:29:08	88,75%	95,09%	91,92%
<i>SolFO_06</i>	0:35:20	78,00%	87,75%	82,87%
<i>SolFO_07</i>	0:36:16	74,19%	85,98%	80,09%
<i>SolFO_08</i>	0:35:20	83,31%	86,12%	84,72%
<i>SolFO_09</i>	0:31:18	77,57%	87,62%	82,60%
<i>SolFO_10</i>	0:32:03	77,29%	86,12%	81,70%
<i>SolFO_11</i>	0:27:59	98,95%	99,94%	99,45%
<i>SolFO_12</i>	0:37:39	98,28%	94,89%	96,58%
<i>SolFO_13</i>	0:31:38	77,51%	89,71%	83,61%
<i>SolFO_14</i>	0:19:21	100,00%	99,63%	99,82%
<i>SolFO_15</i>	0:27:35	98,90%	98,07%	98,49%

Conforme a Figura 41 e a Tabela 5.1, cinco configurações de parâmetros atingiram resultados acima de um desvio padrão a mais do que a média *SolFO\_03*, *SolFO\_14*, *SolFO\_11*, *SolFO\_15* e *SolFO\_12*, com um nível de serviço acima de 96%; as quatro melhores soluções apresentaram resultados dentro de uma faixa entre 98% e 100%. Considerando que este cenário (6a) é um de alta complexidade, espera-se que estas configurações de parâmetros apresentem bons resultados também para cenários mais simples, sendo qualquer uma destas configurações indicada para os testes de validação do modelo.

<sup>9</sup>  $NS_{Est}$ ,  $NS_{Dem}$  e  $NS$  definidos pelas equações (5.1), (5.2) e (5.3) da seção 2.

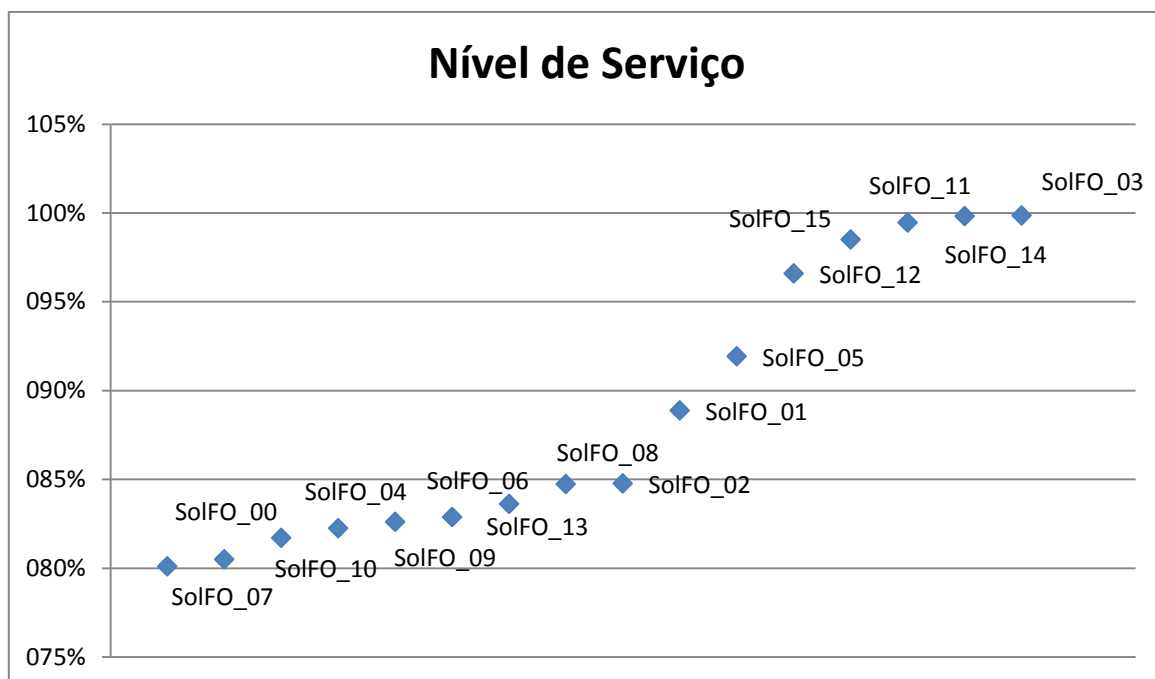


Figura 41 – Resultados Função Objetivo x Parâmetros

É interessante observar também que as duas melhores soluções, com praticamente o mesmo resultado de nível de serviço, também foram as duas soluções de execução mais rápidas, mas neste aspecto com uma vantagem relevante para a *SolFO\_14*.

Com base nestes resultados, conclui-se que há uma interdependência forte nos efeitos entre as variações de parâmetros, ou seja, nenhum parâmetro sozinho garante um melhor desempenho, apenas a combinação deles. A única inferência estatística forte é que todas as soluções onde  $\alpha_1$ ,  $\alpha_3$  e mais algum outro parâmetro têm valor alto resultaram em bons resultados. Mas isolados ou somente  $\alpha_1$  e  $\alpha_3$ , apresentaram resultados ruins para solução como um todo.

Os parâmetros  $\alpha_1$  e  $\alpha_3$  remetem, respectivamente, a violação de estoque meta e violação de estoque físico. O estoque meta que fornece um direcionamento de estoque e o estoque físico que é o limite duro, mas, pelos resultados analisados, necessitam de outro direcionador, com peso equivalente, de função objetivo para complementá-los.

A seguir faz-se uma comparação entre as características das duas melhores soluções, *SolFO\_03* e *SolFO\_14* com o objetivo de se traçar semelhanças e divergências nas situações de não cumprimento pleno do nível de serviço.

Ambas as soluções não violam o limite superior de estoque, obtendo o componente de nível de serviço correspondente a estoque igual a 100%.

Nas duas soluções analisadas há a ocorrência de atendimento de demanda com atraso para gasolina em Brasília, sendo:

*SolFO\_03*: Conforme Tabela 5.8 e Figura 42 verifica-se que há uma falta de estoques de gasolina em Brasília a partir do quinto dia do horizonte com duração de três dias. No nono e vigésimo dias também há um ligeiro desabastecimento.

Tabela 5.8 – Evolução do Estoque de Gasolina em Brasília – Cenário 6a – *SolFO\_03*

Dia	Volume	Dia	Volume	Dia	Volume
01	7.767	11	6.393	21	1.263
02	5.533	12	4.268	22	6.002
03	3.300	13	2.034	23	6.964
04	1.067	14	2.033	24	4.851
05	-1.167	15	2.793	25	2.617
06	-3.400	16	3.788	26	5.030
07	-4.439	17	6.020	27	4.074
08	920	18	3.907	28	7.103
09	-1.197	19	1.673	29	4.996
10	1.129	20	-560	30	2.763

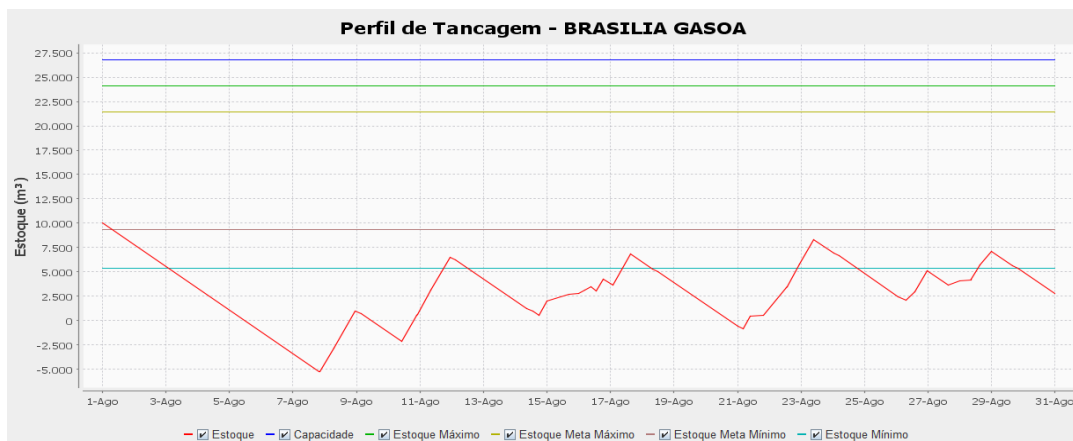
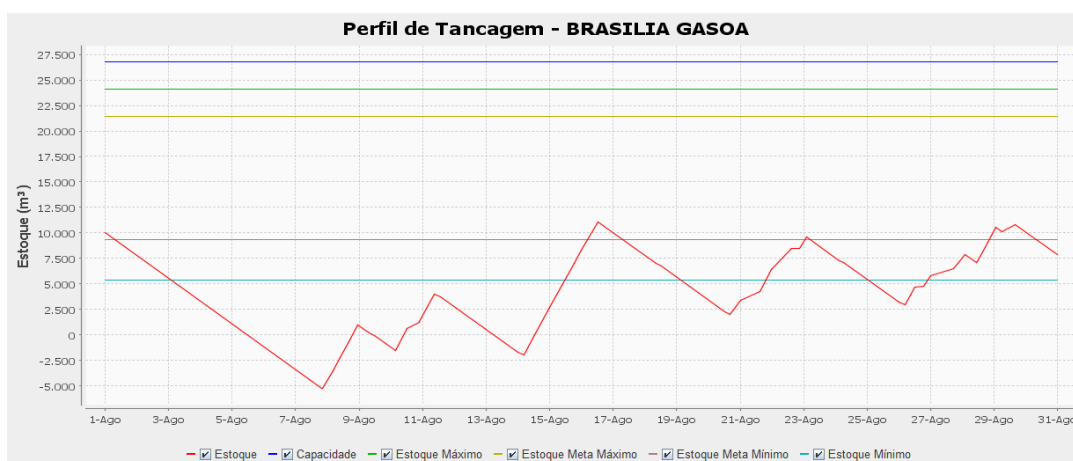


Figura 42 – Evolução do Estoque de Gasolina em Brasília – Cenário 6a – *SolFO\_03*

*SolFO\_14*: Conforme Tabela 5.9 e Figura 43 verifica-se o mesmo perfil de atendimento para os primeiros dez dias da solução e um rápido desabastecimento novamente no dia treze.

Tabela 5.9 – Evolução do Estoque de Gasolina em Brasília – Cenário 6a – *SolFO\_14*

Dia	Volume	Dia	Volume	Dia	Volume
01	7.767	11	2.784	21	6.425
02	5.533	12	551	22	9.168
03	3.300	13	-1.683	23	7.530
04	1.067	14	2.717	24	5.417
05	-1.167	15	8.396	25	3.184
06	-3.400	16	9.985	26	5.837
07	-4.439	17	7.752	27	7.522
08	883	18	5.638	28	10.229
09	-1.197	19	3.405	29	10.120
10	1.842	20	3.404	30	7.887

Figura 43 – Evolução do Estoque de Gasolina em Brasília – Cenário 6a – *SolFO\_14*

Uma das dificuldades deste cenário é a sua configuração inicial, onde em Brasília, há um estoque inicial baixo de gasolina e uma batelada de diesel ainda no início de recebimento. Esta situação combinada com a de outras bases dificulta de sobremaneira o atendimento máximo de demanda.

### 5.3.2. Parâmetros de Execução do Otimizador

Para a execução do otimizador há dois parâmetros cujos valores devem ser determinados. O tempo máximo de execução de cada iteração e o tipo de ênfase de busca do *solver CPLEX*.

O parâmetro de ênfase na busca do *solver* pode assumir cinco valores distintos e cada um deles determina um caminho de busca do *solver* (IBM, 2009), podendo ser:

- Valor 0: a busca do *solver* procura balancear esforços entre a busca pela factibilidade e a prova da otimalidade (designação original em inglês *emphasis balanced*).

- Valor 1: ênfase em factibilidade (do inglês *emphasis feasibility*), neste caso a maior parte do esforço computacional é despendida na busca por uma solução factível, enquanto menos esforço é empregado em busca da prova da otimalidade.

- Valor 2: ênfase em otimalidade (*emphasis optimality*), quando o parâmetro assume este valor, o esforço computacional é direcionado para a prova de otimalidade, normalmente isto garante a prova de solução ótima em um tempo menor.

- Valor 3: ênfase na melhor fronteira (*emphasis best bound*), neste caso o *solver* procura as soluções ótimas em um sentido diferente da resolução padrão. IBM (2009) recomenda o uso deste tipo de ênfase somente em casos onde a ênfase balanceada e a com foco em otimalidade não conseguem soluções satisfatórias.

- Valor 4: ênfase em factibilidade escondida (*emphasis hidden feasibility*), usa-se esta estratégia para problemas difíceis e complexos nos quais o *solver* tem dificuldade de encontrar soluções factíveis através da ênfase balanceada e da ênfase em factibilidade (IBM, 2009).

A fim de se mapear a melhor relação entre tempo total de processamento e qualidade da solução final testou-se quatro tempos máximos de execução por iteração: 60, 120, 180 e 360 segundos.

Com base nas características dos cenários (seção 5.2) decidiu-se aplicar este teste em dois cenários, um com dificuldade maior (6a) e outro com dificuldade menor (3a).

Neste teste optou-se por utilizar a configuração de função objetivo da *SolFO\_14*, esta escolha é devido ao fato de que esta configuração apresentou ótimo desempenho de nível de serviço aliado a um tempo de execução global baixo.

Desta forma, enumeraram-se as soluções obtidas de acordo com a Tabela 5.10.

A avaliação de cada uma das configurações de parâmetro de execução do otimizador

seguem as equações (5.1), (5.2) e (5.3).

Tabela 5.10 – Definição dos Experimentos para Obtenção dos Parâmetros de Execução do Otimizador  
(Continua)

Cenário	*Tempo Máximo de Execução (s)	Ênfase	Solução
6a	60	0	SolPE_00
6a	60	1	SolPE_01
6a	60	2	SolPE_02
6a	60	3	SolPE_03
6a	60	4	SolPE_04
6a	120	0	SolPE_05
6a	120	1	SolPE_06
6a	120	2	SolPE_07
6a	120	3	SolPE_08
6a	120	4	SolPE_09
6a	180	0	SolPE_10
6a	180	1	SolPE_11
6a	180	2	SolPE_12
6a	180	3	SolPE_13
6a	180	4	SolPE_14
6a	360	0	SolPE_15
6a	360	1	SolPE_16
6a	360	2	SolPE_17
6a	360	3	SolPE_18
6a	360	4	SolPE_19
3a	60	0	SolPE_20
3a	60	1	SolPE_21
3a	60	2	SolPE_22
3a	60	3	SolPE_23
3a	60	4	SolPE_24
3a	120	0	SolPE_25

3a	120	1	SolPE_26 (Continuação)
Cenário	*Tempo Máximo de Execução (s)	Ênfase	Solução
3a	120	2	SolPE_27
3a	120	3	SolPE_28
3a	120	4	SolPE_29
3a	180	0	SolPE_30
3a	180	1	SolPE_31
3a	180	2	SolPE_32
3a	180	3	SolPE_33
3a	180	4	SolPE_34
3a	360	0	SolPE_35
3a	360	1	SolPE_36
3a	360	2	SolPE_37
3a	360	3	SolPE_38
3a	360	4	SolPE_39

\*Tempo de Execução Máximo por Iteração

A Tabela 5.11 apresenta os resultados dos experimentos para determinação da melhor combinação de parâmetros para a execução do otimizador. Algumas conclusões são possíveis sem considerar a interação entre os fatores.



Tabela 5.11 – Resultados dos Experimentos de Determinação dos Parâmetros de Execução do Otimizador  
(Continua)

Solução	Tempo de Execução Global	NS <sub>Est</sub>	NS <sub>Dem</sub>	NS
SolPE_00		Não finalizou o processamento.		
SolPE_01		Não finalizou o processamento.		
SolPE_02		Não finalizou o processamento.		
SolPE_03		Não finalizou o processamento.		
SolPE_04	0:09:13	100,00%	99,95%	99,98%
SolPE_05		Não finalizou o processamento.		
SolPE_06	0:18:21	96,39%	91,70%	94,05%
SolPE_07		Não finalizou o processamento.		
SolPE_08		Não finalizou o processamento.		
SolPE_09		Não finalizou o processamento.		
SolPE_10		Não finalizou o processamento.		
SolPE_11	0:19:21	100,00%	99,63%	99,81%
SolPE_12		Não finalizou o processamento.		
SolPE_13		Não finalizou o processamento.		
SolPE_14		Não finalizou o processamento.		
SolPE_15		Não finalizou o processamento.		
SolPE_16	0:38:06	99,61%	98,26%	98,94%
SolPE_17		Não finalizou o processamento.		
SolPE_18		Não finalizou o processamento.		
SolPE_19	0:58:22	99,55%	95,93%	97,74%
SolPE_20		Não finalizou o processamento.		
SolPE_21	0:11:24	99,85%	95,17%	97,51%
SolPE_22		Não finalizou o processamento.		
SolPE_23		Não finalizou o processamento.		
SolPE_24		Não finalizou o processamento.		
SolPE_25		Não finalizou o processamento.		
SolPE_26	0:16:45	96,39%	89,76%	93,07%

(Continuação)

Solução	Tempo de Execução Global	NS <sub>Est</sub>	NS <sub>Dem</sub>	NS
SolPE_27		Não finalizou o processamento.		
SolPE_28		Não finalizou o processamento.		
SolPE_29		Não finalizou o processamento.		
SolPE_30		Não finalizou o processamento.		
SolPE_31	0:19:02	100,00%	100,00%	100,00%
SolPE_32	0:27:32	100,00%	99,30%	99,65%
SolPE_33		Não finalizou o processamento.		
SolPE_34	0:33:29	99,68%	94,65%	97,16%
SolPE_35	0:45:31	94,71%	91,72%	93,21%
SolPE_36	0:20:25	96,13%	88,98%	92,55%
SolPE_37	0:49:34	97,81%	89,55%	93,68%
SolPE_38		Não finalizou o processamento.		
SolPE_39	0:48:47	97,48%	95,83%	96,66%

Confirma-se a premissa já apontada na seção 5.2, que por ter uma demanda maior e mais bases com um número de dias de autonomia de estoque pequeno, o cenário *6a* é mais difícil do que o *3a*, enquanto para o cenário *3a* encontra-se solução em nove de vinte configurações de parâmetros para o *6a* apenas em cinco.

Além disto, confirmam-se mais duas premissas esperadas: de que com o aumento do limite de tempo por iteração aumenta-se o tempo total de processamento, Figura 44, (chegando a impraticáveis 49 minutos em alguns testes com 360s de tempo máximo por iteração) e de que se aumentam as chances de se atingir soluções (Figura 45). Mas, em compensação, a partir dos resultados experimentais realizados, observa-se que não há garantias de melhora da qualidade da solução com o aumento do limite do tempo de processamento de cada iteração.

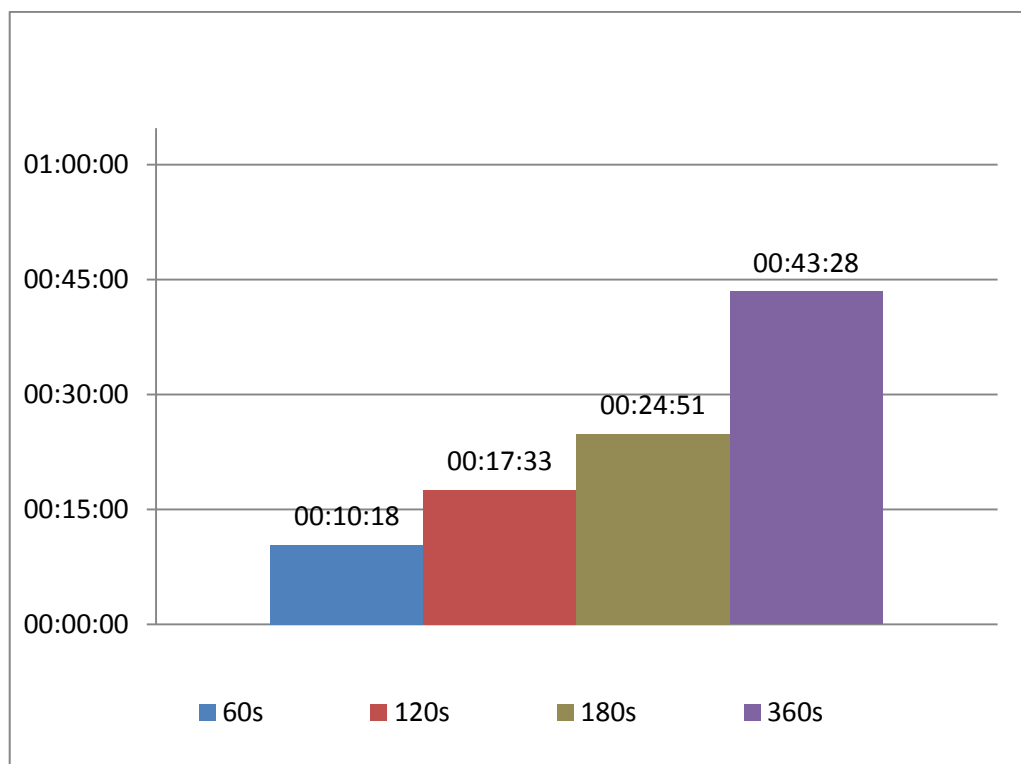


Figura 44 – Tempo de Execução por Iteração em Função do Tempo Médio de Execução Total

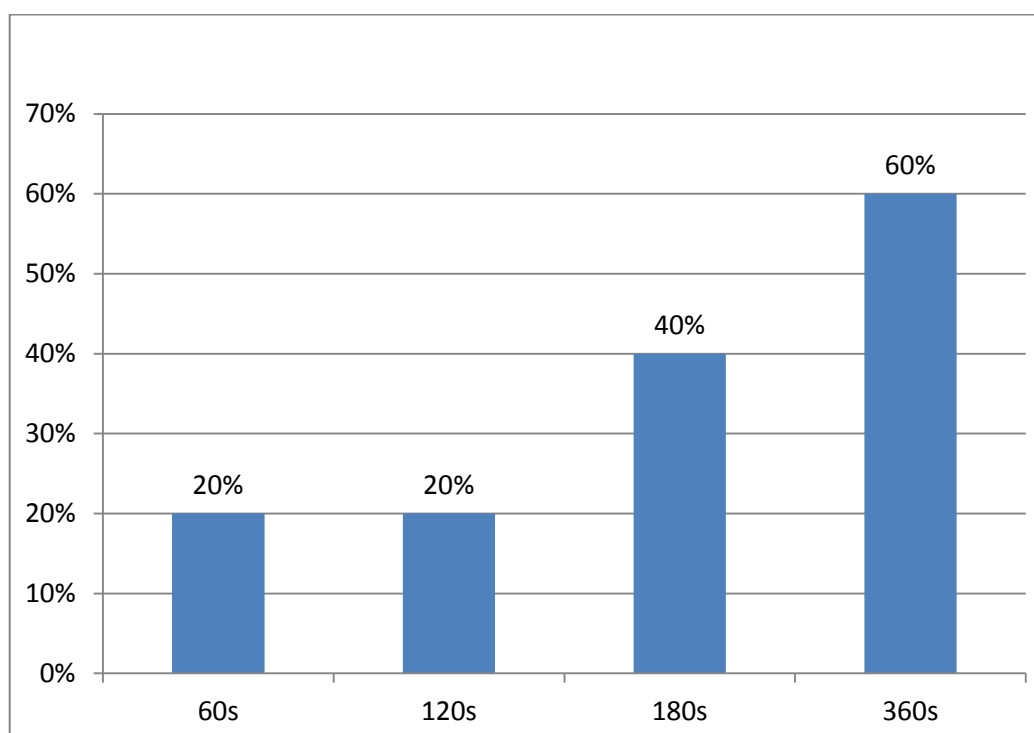


Figura 45 – Tempo de Execução por Iteração em Função do Percentual de Soluções Completas Obtidas

Com relação ao parâmetro de ênfase de busca do *solver*, a ênfase em factibilidade foi a que mais vezes alcançou soluções (sete vezes em oito testes), seguida da busca por factibilidade escondida (quatro vezes), enquanto a busca pela melhor fronteira não achou

solução em nenhum dos casos testados, ênfase em otimalidade e ênfase equilibrada eventualmente acharam soluções (duas vezes e uma vez – no cenário mais fácil e com os maiores tempos), Figura 46.

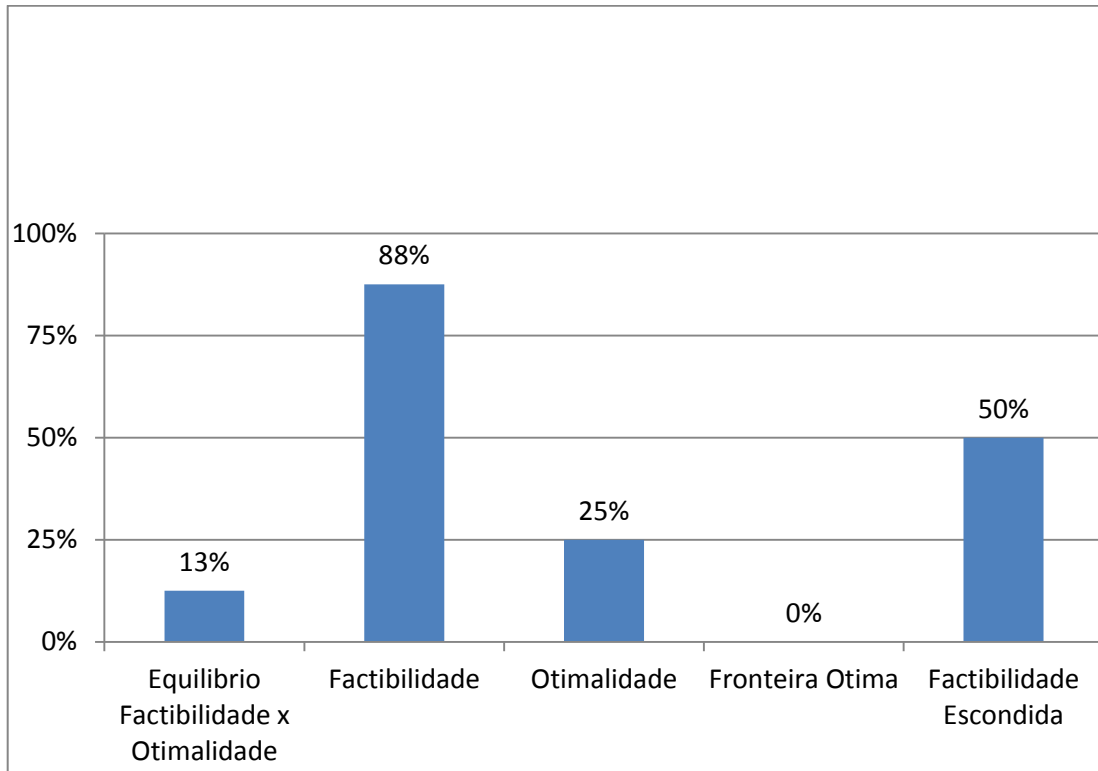


Figura 46 – Percentual de Soluções Completas Obtidas em Função da Ênfase do Solver

Tanto o tipo de ênfase de busca do *solver*, quanto o valor de tempo limite por iteração não garantem uma maior qualidade das soluções obtidas. Com base nisto, os testes nos diversos cenários serão executados com a ênfase de busca do *solver* em factibilidade e com tempo máximo de execução de cada iteração de 180s, que combina o maior sucesso na obtenção de soluções completas com um tempo de execução admissível.

## 6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No capítulo anterior foi determinada a configuração do *solver*, bem como identificadas as melhores ponderações de função objetivo.

Cinco ponderações de função objetivo apresentaram uma boa qualidade de solução para o cenário teste escolhido, sendo que uma delas se diferenciou pelo tempo de execução mais baixo (*SolFO\_14*).

Com base no capítulo 5, indica-se a configuração da *SolFO\_14* ( $\alpha_1$  alto,  $\alpha_2$  alto,  $\alpha_3$  alto e  $\alpha_4$  baixo) como padrão para a utilização deste sistema de apoio a tomada de decisão. Para corroborar esta conclusão, determinar a qualidade e robustez da mesma, bem como indicar uma configuração alternativa para cenários com insucesso da configuração padrão. Neste capítulo são apresentados resultados experimentais aplicados aos dezoito cenários disponíveis, utilizando-se as cinco configurações dos parâmetros de função objetivo que apresentaram boa qualidade nos testes do capítulo anterior (*SolFO\_03*, *SolFO\_14*, *SolFO\_11*, *SolFO\_15* e *SolFO\_12*).

Utilizou-se um computador com processador *Intel i5*; 2,4GHz de *clock*; 4GB de memória RAM; sistema operacional *Windows 7 - 64bits*. Para modelagem e execução utilizou-se o ambiente *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.2*.

Estes resultados experimentais são analisados num primeiro momento do ponto de vista quantitativo, utilizando-se a métrica de Nível de Serviço, descrita na seção 5 do capítulo anterior. Em um segundo momento, alguns destes cenários são comparados de um modo qualitativo, ou seja, é avaliada a sua real utilidade como ferramenta de apoio a tomada de decisão para o engenheiro que programa o duto OSBRA e, finalmente, são feitos ajustes finos no modelo e estudado o seu resultado.

Além da análise de desempenho da ferramenta, os cenários também voltam a ser classificados e investigados em complementação ao descrito na seção 5.2.

### 6.1. RESULTADOS TOTALIZADOS POR CENÁRIOS

Nesta seção é feita uma análise preliminar dos resultados com um enfoque na complexidade dos cenários.

Na Tabela 6.1 tem-se o resumo dos resultados dos experimentos realizados. A partir desta tabela e tomando como base o mesmo nível de serviço considerado como bom no capítulo anterior (96,34%), podem-se classificar os cenários segundo a capacidade de solucioná-los com bons resultados (Tabela 6.2).

Tabela 6.1 – Resultados Experimentais Totalizados

Cenários	Nível de Serviço				
	SolFO_14	SolFO_03	SolFO_11	SolFO_15	SolFO_12
1a	90,04%	99,70%	99,26%	99,81%	100,00%
1b	90,44%	Não Exec.	99,30%	98,85%	89,92%
1c	99,62%	91,52%	92,12%	84,55%	85,03%
2a	99,93%	98,24%	95,68%	100,00%	99,97%
2b	99,99%	98,72%	99,10%	99,89%	99,99%
2c	98,56%	Não Exec.	98,75%	99,53%	100,00%
3a	91,72%	96,77%	96,82%	88,57%	98,77%
3b	97,82%	93,18%	99,90%	91,20%	95,34%
3c	84,80%	79,28%	85,72%	99,45%	Não Exec.
4a	100,00%	98,46%	96,17%	99,06%	99,23%
4b	99,84%	97,52%	96,72%	92,75%	90,83%
4c	99,20%	94,23%	90,22%	94,16%	97,12%
5a	95,03%	94,30%	Não Exec.	99,55%	88,81%
5b	99,04%	99,70%	96,20%	97,22%	91,65%
5c	88,66%	92,11%	88,64%	92,13%	94,84%
6a	99,82%	99,84%	99,43%	98,49%	96,58%
6b	99,37%	90,68%	96,49%	99,94%	82,80%
6c	93,04%	91,34%	99,97%	99,83%	82,63%

Tabela 6.2 – Resultados Experimentais Totalizados – Filtrados os Bons Níveis de Serviço

Cenários	Nível de Serviço				
	SolFO_14	SolFO_03	SolFO_11	SolFO_15	SolFO_12
1a		99,70%	99,26%	99,81%	100,00%
1b			99,30%	98,85%	
1c	99,62%				
2a	99,93%	98,24%		100,00%	99,97%
2b	99,99%	98,72%	99,10%	99,89%	99,99%
2c	98,56%		98,75%	99,53%	100,00%
3a		96,77%	96,82%		98,77%
3b	97,82%		99,90%		
3c				99,45%	
4a	100,00%	98,46%		99,06%	99,23%
4b	99,84%	97,52%	96,72%		
4c	99,20%				97,12%
5a			.	99,55%	
5b	99,04%	99,70%		97,22%	
5c					
6a	99,82%	99,84%	99,43%	98,49%	96,58%
6b	99,37%		96,49%	99,94%	
6c			99,97%	99,83%	

Além do cenário *6a*, que serviu como base para a escolha dos parâmetros de função objetivo, apenas para mais um cenário os valores de nível de serviço foram enquadrados como bons em todas as configurações de parâmetros de função objetivo (cenário *2b*).

A obtenção de quatro bons resultados foi possível em quatro dos cenários (*1a*, *2a*, *2c* e *4a*), também em quatro cenários (*3a*, *4b*, *5b* e *6b*) obtêm-se três bons resultados, assim como para os cenários *1b*, *3b*, *4c* e *6c* apenas dois bons resultados foram obtidos.

A obtenção de somente um bom resultado ocorreu em três cenários (*1c*, *3c* e *5a*) e apenas o cenário *5c* não atingiu nenhuma boa resposta com estas configurações de função

objetivo.

Na Figura 47, observa-se que, para maioria dos cenários, obtêm-se entre duas e quatro boas soluções.

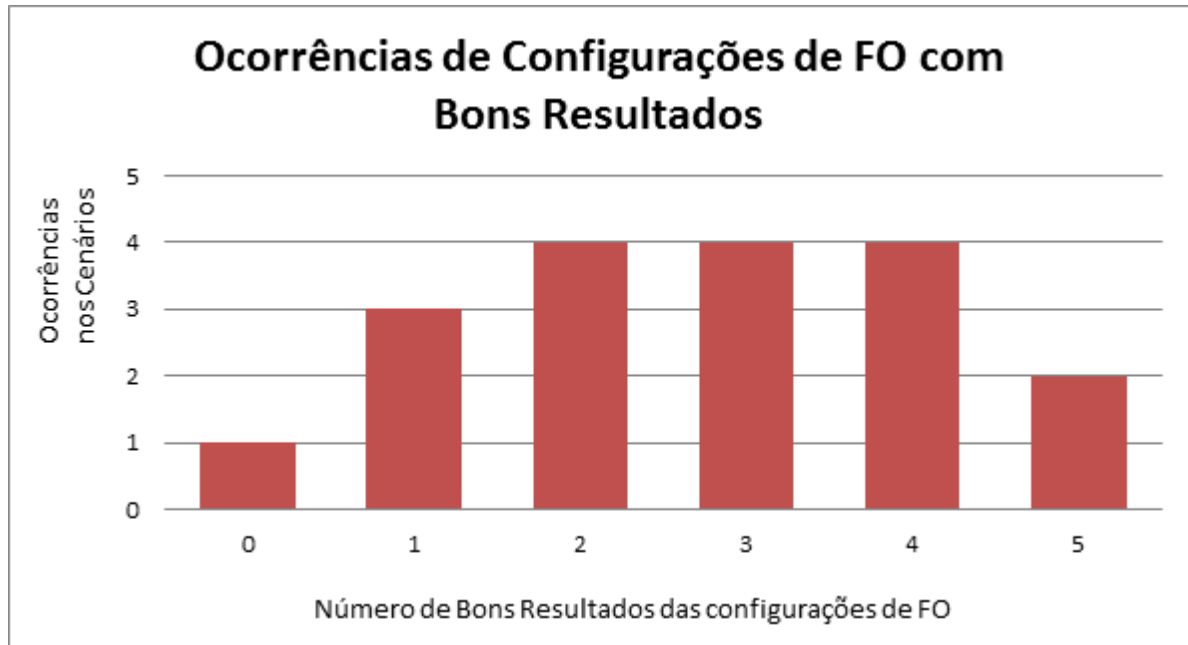


Figura 47 – Ocorrências de Configurações de FO com bons resultados para os Cenários Testados

Dentre os cenários, os do período 5 são os de mais difícil solução, com o *5a* com apenas uma boa solução dentre as configurações, o *5b* três boas soluções, enquanto para o *5c* nenhuma boa solução foi atingida. Resultados que confirmam as conclusões da seção 5.2, pois se trata do período com a maior demanda, além de haver um estoque inicial nos dutos que força uma baixa de estoque de diesel em Goiânia, causando penalidades logo no início do horizonte.

Por outro lado, os cenários referentes ao período 2 foram os que mais vezes obtiveram boas soluções, mais uma vez corroborando com a suposição da seção 5.2, pois é o período com a menor demanda.

Observando-se a variação sazonal, os de terminologia *c* são os de mais difícil resolução. Mais difíceis tanto do que os cenários com demanda constante, quanto do que os cenários que variam de acordo com a dispersão diária histórica daquele período.



## 6.2. ANÁLISE QUANTITATIVA DAS RESPOSTAS

Tomando como base a configuração de função objetivo escolhida como padrão no capítulo anterior, a *SolFO\_14*, observa-se na Tabela 6.1 que para 11 dos 18 cenários foram obtidos bons resultados de nível de serviço, ou seja 61% dos cenários.

Na Tabela 6.3 observam-se apenas os resultados considerados bons. Nestes onze cenários o valor médio de nível de serviço é acima dos 99%. Na maioria destes cenários, o nível de serviço obtido na otimização é superior a 99,5%, conforme observado no Figura 48.

Tabela 6.3 – Resultados Bons para Cenários Utilizando *SolFO\_14*

Cenário	NS <sub>Est</sub>	NS <sub>Dem</sub>	NS	Tempo de Execução
1c	99,94%	99,28%	99,62%	0:25:43
2a	99,87%	100,00%	99,93%	0:14:46
2b	100,00%	99,97%	99,99%	0:10:03
2c	99,36%	97,71%	98,56%	0:22:34
3b	99,55%	95,98%	97,82%	0:24:24
4a	100,00%	100,00%	100,00%	0:19:02
4b	100,00%	99,67%	99,84%	0:23:43
4c	98,44%	100,00%	99,20%	0:22:36
5b	99,25%	98,83%	99,04%	0:33:33
6a	100,00%	99,63%	99,82%	0:19:23
6b	100,00%	98,70%	99,37%	0:15:36
Média	99,67%	99,07%	99,38%	0:21:02
Mínimo	98,44%	95,98%	97,82%	0:10:03
Máximo	100,00%	100,00%	100,00%	0:33:33
Desvio Padrão	0,49%	1,25%	0,69%	0:06:19

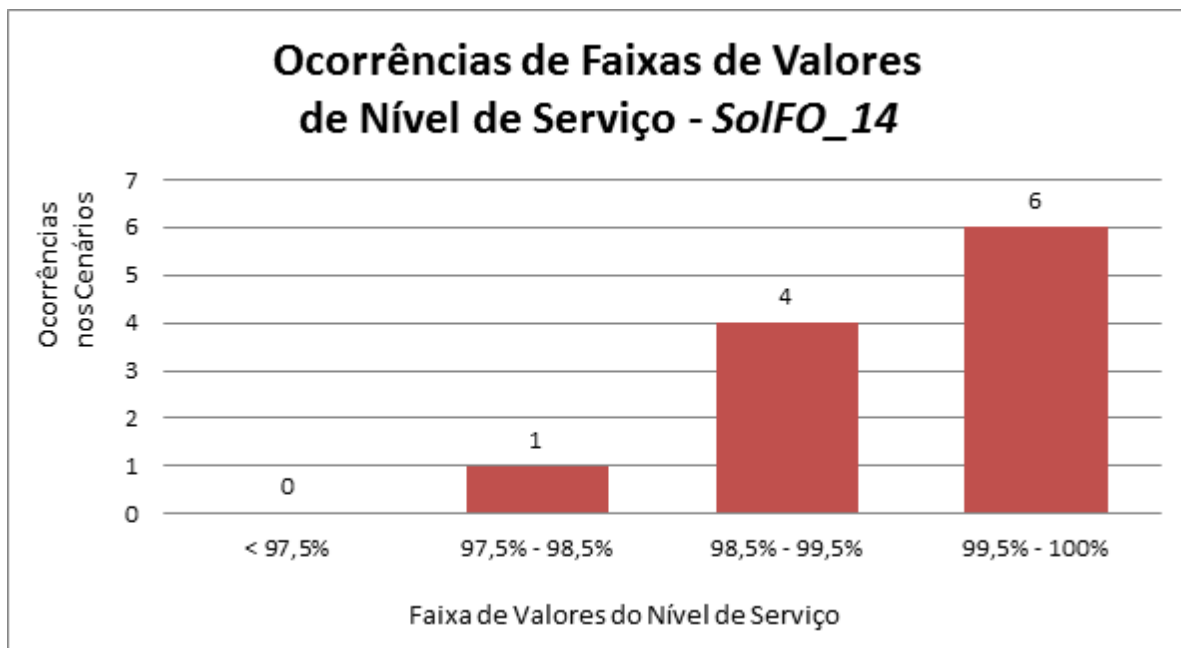


Figura 48 – Ocorrências de Faixas de Valores de Nível de Serviço para *SolFO\_14*

Conforme Tabela 6.1, a configuração de função objetivo *SolFO\_15* apresentou robustez em seus resultados (sendo levemente superior a *SolFO\_14*). Os resultados obtidos são considerados bons em doze dos dezoito cenários, ou seja, 66,7% dos cenários, sendo indicada como configuração alternativa de solução.

Combinando-se os cenários com bom atendimento ao nível de serviço nas duas configurações de função objetivo (*SolFO\_14* e *SolFO\_15*), dezesseis cenários são englobados, ficando apenas dois excluídos.

Na Tabela 6.4 e na Figura 49 observam-se os resultados do nível de serviço utilizando-se a configuração de parâmetros de função objetivo *SolFO\_15*, cujos resultados médios ficaram muito próximos da *SolFO\_14*, com a vantagem de se ter conseguido resolver satisfatoriamente um cenário a mais. Por outro lado o desvio padrão do nível de serviço é mais alto, indicando a possibilidade maior de obtenção de soluções mais próximas do limite inferior considerado.

Tabela 6.4 – Resultados Bons para Cenários Utilizando *SolFO\_15*

Cenário	NS <sub>Est</sub>	NS <sub>Dem</sub>	NS	Tempo de Execução
1a	99,87%	99,75%	99,81%	0:28:26
1b	98,22%	99,48%	98,85%	0:19:38
2a	100,00%	100,00%	100,00%	0:13:06
2b	99,80%	99,97%	99,89%	0:14:35
2c	99,84%	99,21%	99,53%	0:19:34
3c	99,03%	99,87%	99,45%	0:22:58
4a	99,58%	98,53%	99,06%	0:27:19
5a	99,81%	99,29%	99,55%	0:29:24
5b	97,60%	96,83%	97,22%	0:35:40
6a	98,90%	98,07%	98,49%	0:30:29
6b	99,94%	99,95%	99,94%	0:23:15
6c	99,72%	99,95%	99,83%	0:24:36
Média	99,36%	99,24%	99,30%	0:24:05
Mínimo	97,60%	96,83%	97,22%	0:13:06
Máximo	100,00%	100,00%	100,00%	0:35:40
Desvio Padrão	0,77%	0,98%	0,81%	0:06:39

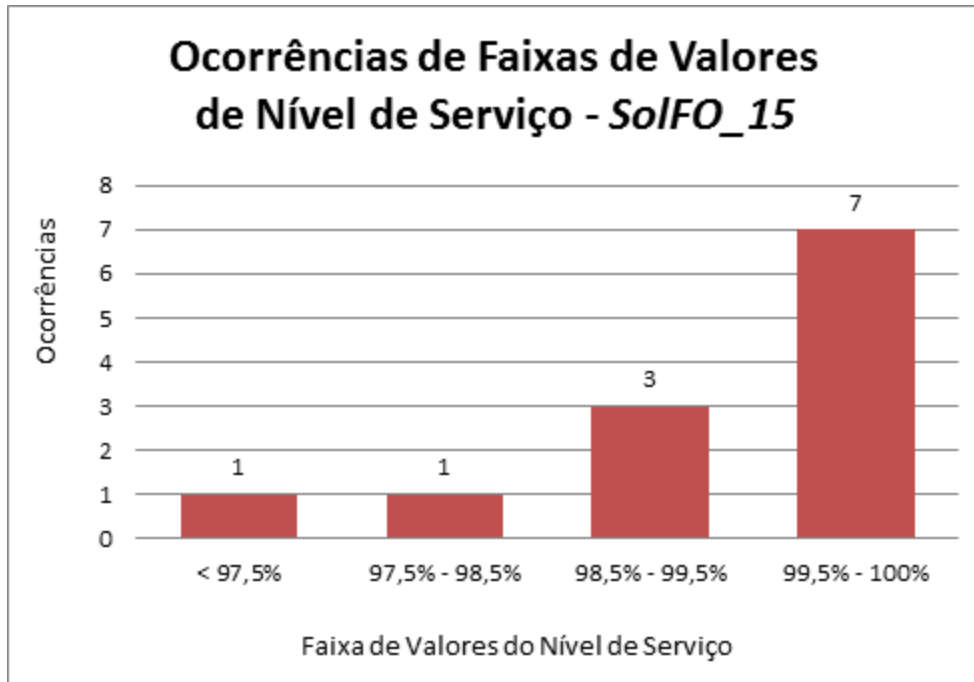


Figura 49 – Ocorrências de Faixas de Valores de Nível de Serviço para *SolFO\_15*

Ainda comparando os resultados mostrados na Tabela 6.3 e na Tabela 6.4, verifica-se que as soluções que utilizam a configuração *SolFO\_14* apresentam tempo médio de execução inferior a *SolFO\_15* com o desvio padrão de tempo de execução equivalente.

Fatos estes que levam a conclusão de utilização da configuração de parâmetros da função objetivo *SolFO\_14* e alternativamente, em caso de insucesso, a *SolFO\_15* que conduzem a obtenção de boas soluções em 89% dos cenários analisados, apenas os cenários *5c* e *3a* não atingiram boas soluções.

### 6.3. ANÁLISE QUALITATIVA DAS RESPOSTAS

Nesta seção é feita uma avaliação qualitativa das soluções obtidas nos resultados experimentais. Primeiramente são estudadas as características e falhas das soluções boas, e em uma segunda subseção as soluções ruins são analisadas.

### 6.3.1. Análise Qualitativa das Boas Soluções

Primeiro é feito um estudo detalhado da solução com a configuração de função objetivo *SolFO\_14* para o cenário *4b*, como exemplo das soluções atingidas nos experimentos, e, na sequência, avaliações mais pontuais de outras soluções e outros cenários são apresentadas.

#### 6.3.1.1. Cenário Exemplo – Cenário *4b*, *SolFO\_14*.

Neste cenário, conforme Tabela 6.5, a demanda total para o mês é de 696.827 m<sup>3</sup>, o que implicaria o OSBRA operar com uma vazão média de 968m<sup>3</sup>/h. O Diesel corresponde a mais de 70% da demanda em todas as bases, exceto em Brasília, e destaca-se Goiânia como maior mercado (Tabela 6.6).

Lembrando que este cenário (*4b*) segue a distribuição de demanda no decorrer do mês e dias da semana conforme Tabela 5.4.

Tabela 6.5 – Demanda Total Cenário *4b*

Valores em m <sup>3</sup>	Diesel	Gasolina	Total
R.Preto	121.880	18.495	140.375
Uberaba	32.286	9.000	41.286
Uberlândia	90.460	22.760	113.220
Goiânia	210.363	63.111	273.474
Brasília	61.104	67.368	128.472
Total	516.093	180.734	696.827

Tabela 6.6 – Participação na Demanda Cenário *4b*

	Diesel	Gasolina	Total
R.Preto	86,8%	13,2%	20,1%
Uberaba	78,2%	21,8%	5,9%
Uberlândia	79,9%	20,1%	16,2%
Goiânia	76,9%	23,1%	39,2%
Brasília	47,6%	52,4%	18,4%
Total	74,1%	25,9%	100,0%

Após submeter este cenário à otimização com a configuração de função objetivo *SolFO\_14* chegou-se a um resultado de pouco mais de cinco ciclos de bombeio (conjuntos de bateladas de gasolina e diesel), conforme Figura 50.

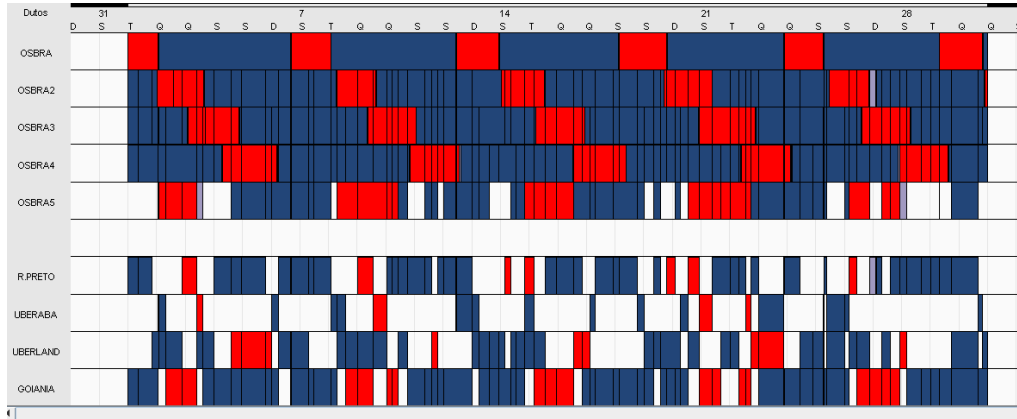


Figura 50 – Gantt de Bombeio – Cenário 4b – *SolFO\_14*

Na Figura 50, a cor azul simboliza o diesel enquanto a vermelha a gasolina. Nota-se que foram geradas cinco bateladas de diesel e seis de gasolina, sendo que a primeira batelada de gasolina é complemento àquela que estava em bombeamento no início do período.

Conforme Tabela 6.7, as bateladas de gasolina variam seu tamanho entre 34 e 42 mil m<sup>3</sup>, enquanto as de diesel entre 100 e 116 mil m<sup>3</sup>, o total bombeado foi de 754 mil m<sup>3</sup>, superior ao total demandado indicando uma tentativa de recuperação de níveis de estoque.

Tabela 6.7 – Volume das Bateladas – Cenário 4b – SolFO\_14

Batelada	Produto	Volume (m <sup>3</sup> )
9*	Gasolina	26.409
10	Selo	400
11	Diesel	115.617
12	Selo	600
13	Gasolina	34.675
14	Selo	400
15	Diesel	109.412
16	Selo	400
17	Gasolina	37.463
18	Selo	400
19	Diesel	104.237
20	Selo	400
21	Gasolina	41.807
22	Selo	600
23	Diesel	101.953
24	Selo	600
25	Gasolina	34.557
26	Selo	600
27	Diesel	100.609
28	Selo	400
29	Gasolina	37.743
30	Selo	400
31**	Diesel	4.303

\* 14.021 m<sup>3</sup> já estavam no duto, totalizando a batelada em 40.430 m<sup>3</sup>

\*\* Batelada interrompida ao final do horizonte de planejamento

Na Figura 51 tem-se o detalhamento do gantt de bombeio. As divisões dentro de cada uma das bateladas não denotam obrigatoriamente uma quebra de batelada, mas sim a mudança da vazão daquela batelada naquele duto. Conforme explicado na seção 4.2, esta mudança de vazão é causada pela ocorrência de um evento que corresponde a qualquer início,

fim ou modificação em sangrias, ou, em menor número de casos, uma quebra de batelada. No exemplo destacado, no OSBRA1 a batelada 19 está sendo bombeada; no OSBRA2 finaliza-se o bombeamento da batelada 17; enquanto no OSBRA3 esta batelada está sendo iniciada; já no OSBRA4 está sendo bombeada a batelada 15 e no OSBRA5 é bombeada a batelada 13. Somente com as informações de vazões da Figura 51 é possível deduzir, pelas diferenças de vazões, que há sangria somente em Uberlândia e Goiânia, o que é identificado visualmente na Figura 52.

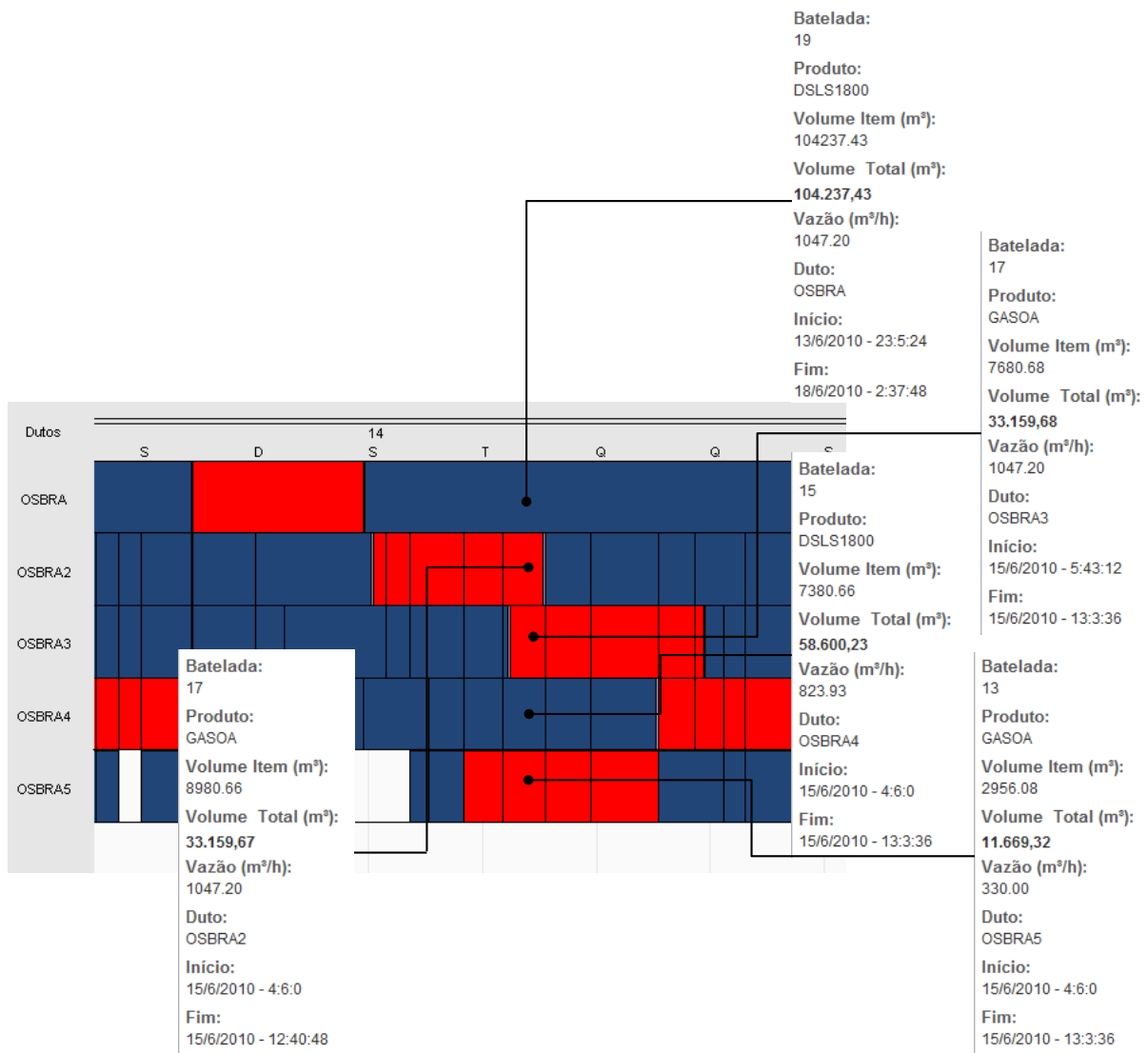


Figura 51 – Detalhe do Gantt de Bombeio – Cenário 4b – SolFO\_14





Figura 52 – Detalhe do Gantt de Bombeio com Sangrias – Cenário 4b – SolFO\_14

Através da Figura 53 e da Figura 54 pode-se observar a evolução de estoques de gasolina nas bases ao longo do OSBRA. A tendência é de manutenção de estoques. O único problema ocorrido foi a falta de gasolina no último dia do horizonte em Brasília. Nas demais bases os níveis de estoque ficaram dentro das faixas desejáveis.

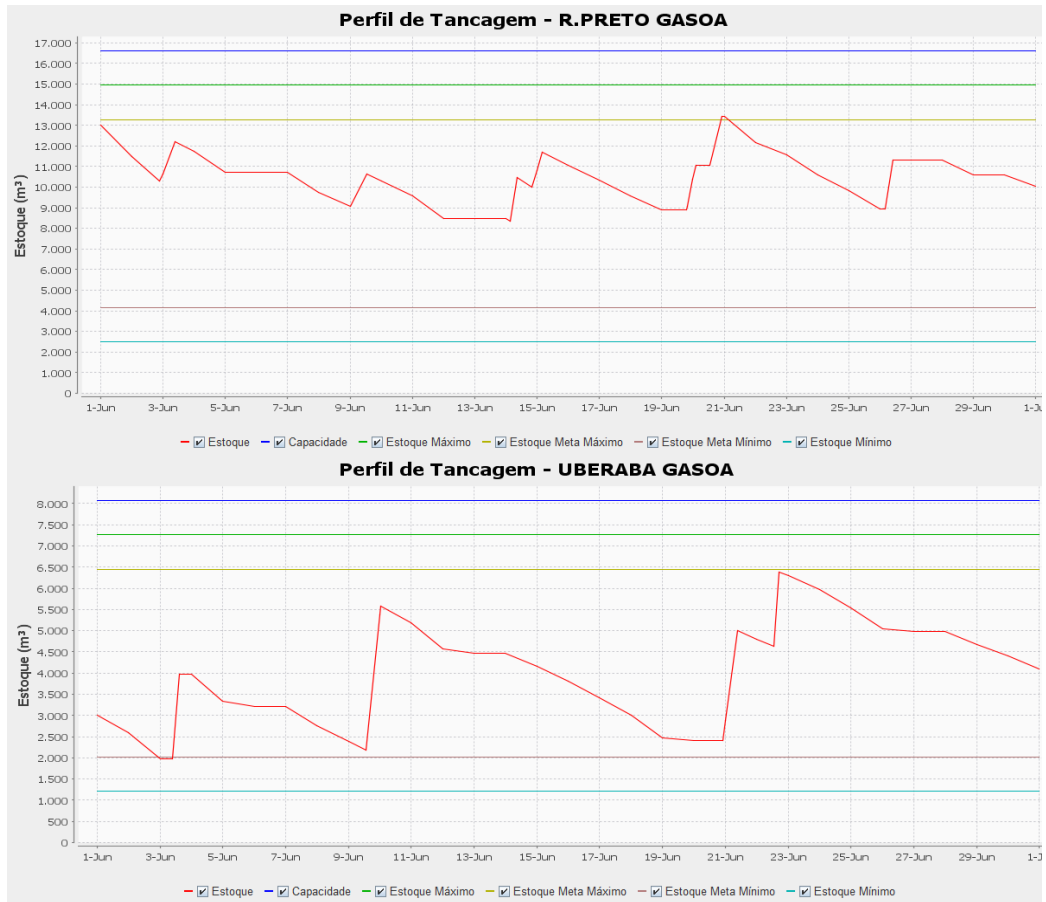


Figura 53 – Evolução Estoque Gasolina R.Preto e Uberaba – Cenário 4b – SolFO\_14

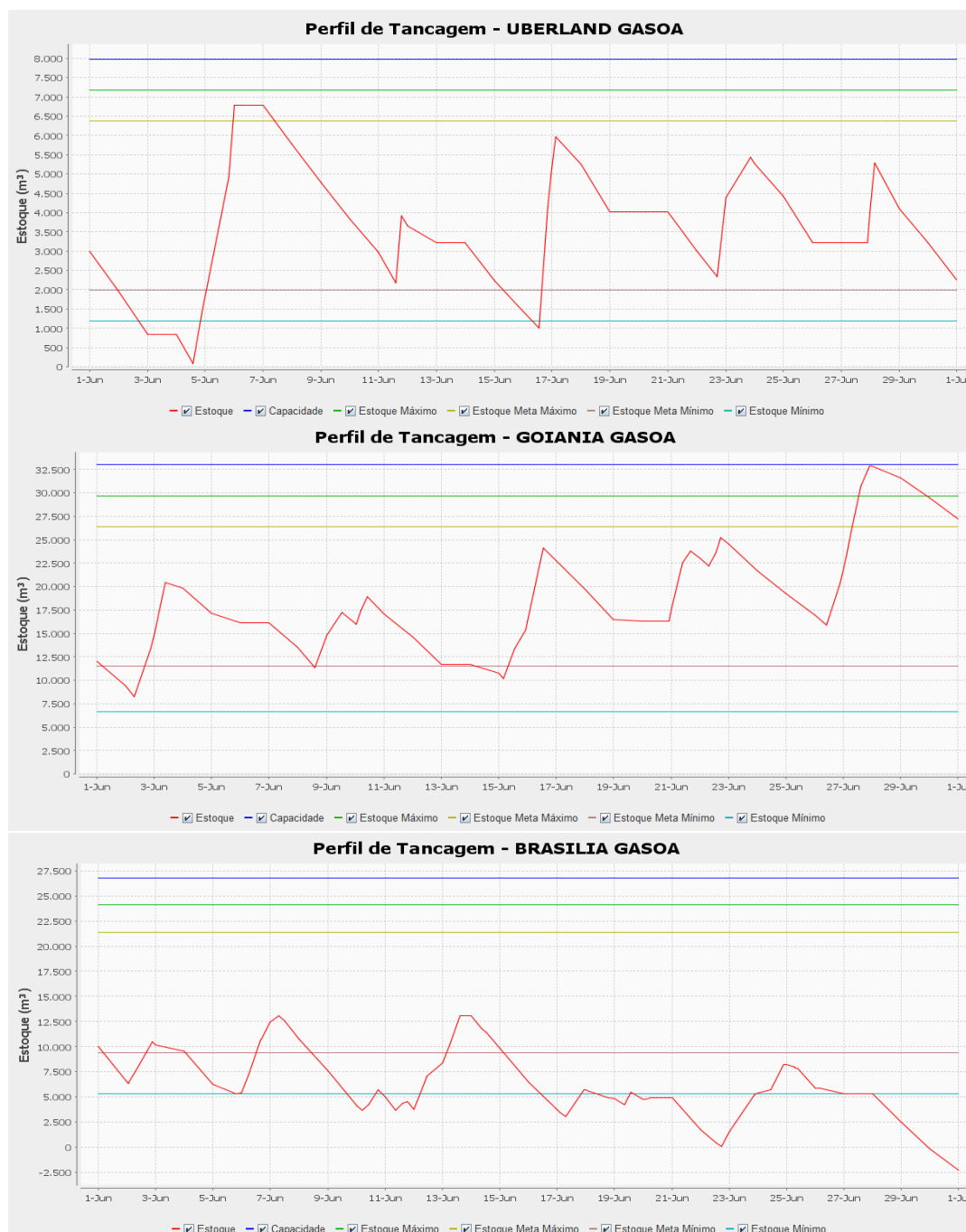


Figura 54 – Evolução Estoque Gasolina Uberlândia, Goiânia e Brasília – Cenário 4b – SolFO\_14

Já a evolução de estoques de diesel pode ser observada no conjunto de figuras (Figura 55 e Figura 56). Nota-se que nas três primeiras bases o sistema conseguiu manter os níveis de estoque dentro da faixa desejada, garantindo o atendimento à demanda, sem dificuldades adicionais.

Já o órgão Goiânia inicia o horizonte de programação com o diesel num nível de estoque preocupantemente baixo. No decorrer da programação, a solução sugerida pelo modelo conseguiu recuperar estes níveis e evitar comprometimentos no atendimento à

demanda, conforme observado na Figura 56.

Em Brasília, também há uma recuperação de níveis de estoque possibilitando o atendimento pleno à demanda (Figura 56).

De um modo geral, a solução proposta atende bem os requisitos do sistema, garantindo abastecimento com uma programação de trinta dias com um nível de serviço total de 99,84% (Tabela 6.3). Ressaltando que esta solução inclui bateladas selo, suporta as variações diárias de demanda características deste cenário, sem causar interrupção do fluxo e atendendo todas as restrições operacionais.

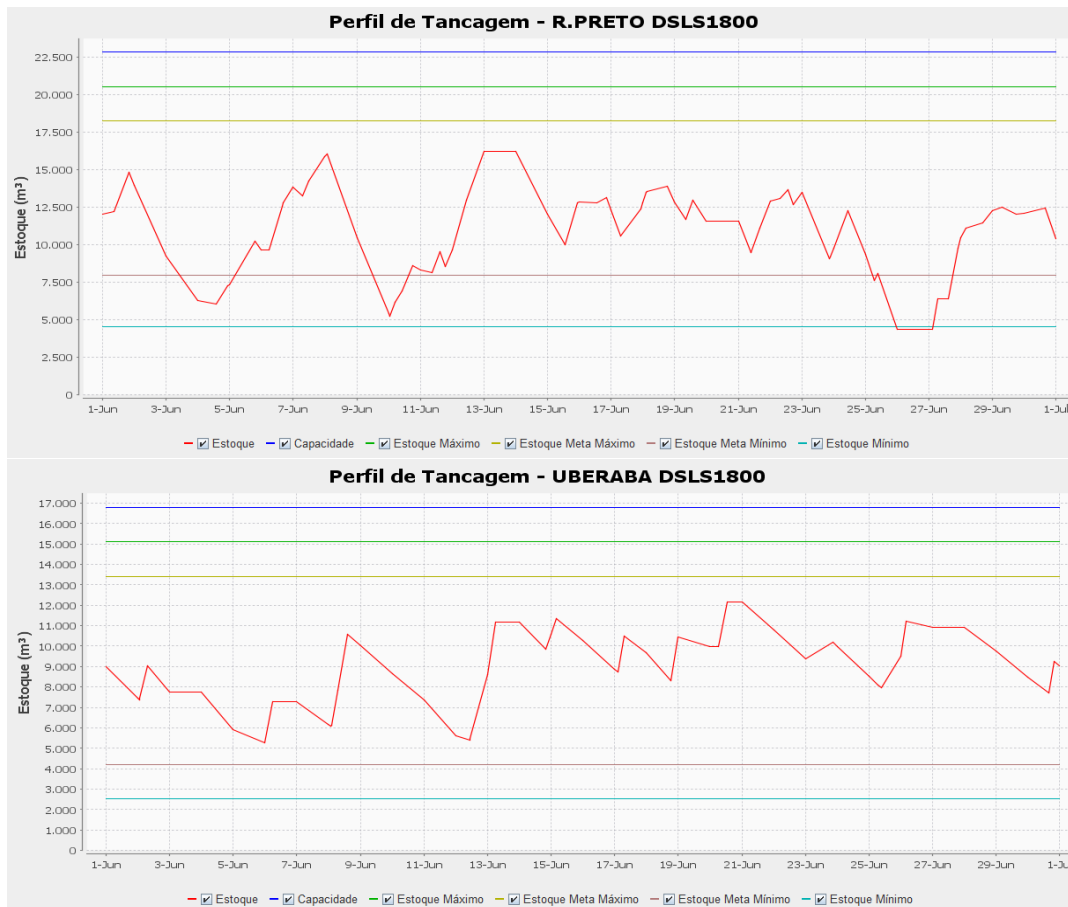


Figura 55 – Evolução Estoque Diesel R.Preto e Uberaba – Cenário 4b – SolFO\_14

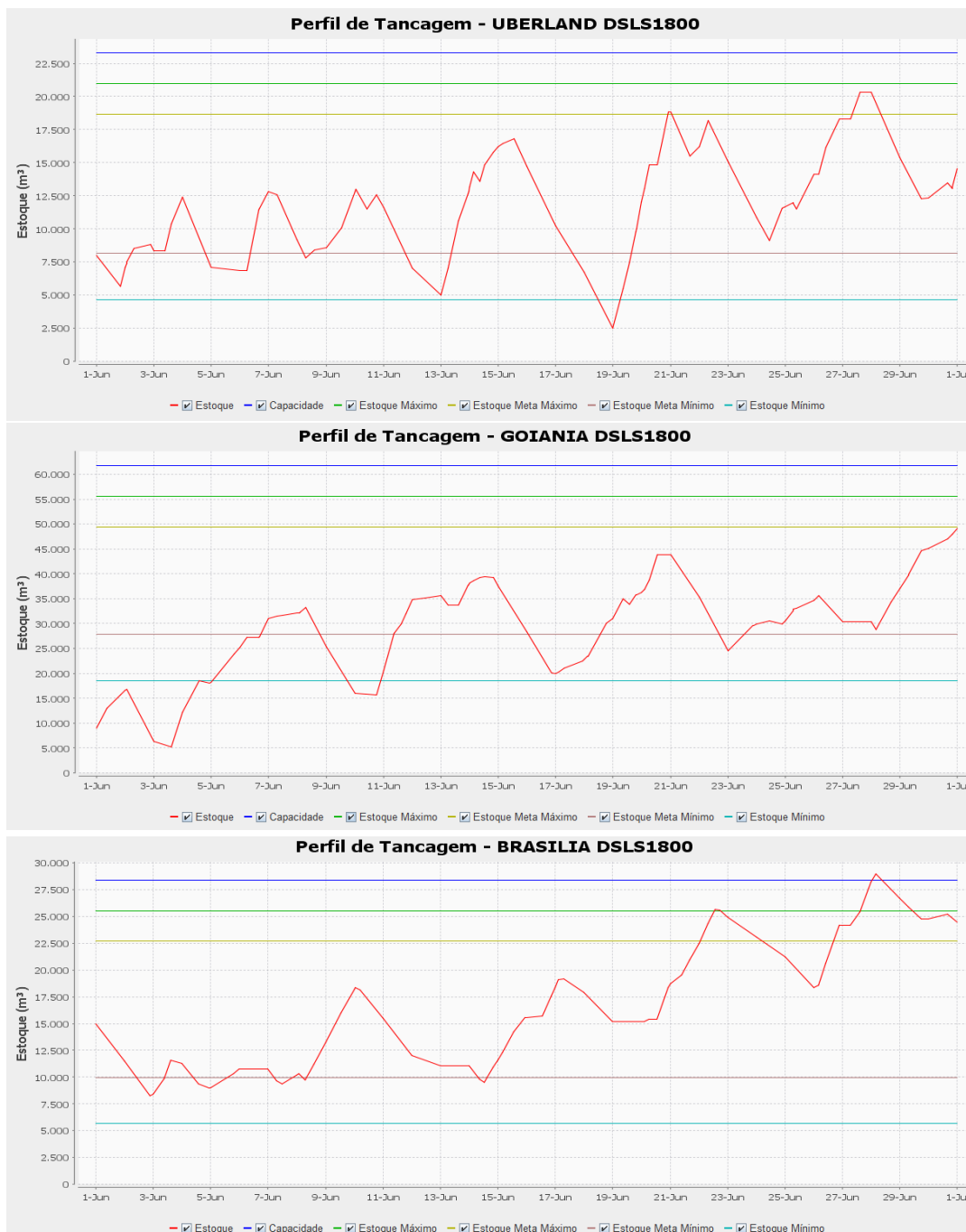


Figura 56 – Evolução Estoque Diesel Uberlândia, Goiânia e Brasília – Cenário 4b – SolFO\_14

### 6.3.1.2. Análise dos Demais Cenários

As boas soluções não constituem um grupo homogêneo de resultados, dentro da faixa considerada boa. Há uma variação considerável do perfil de resposta para soluções com um nível de serviço 100% e soluções com nível de serviço 96,5%.

A Figura 57 e a Figura 58 representam perfis de estoque típico de bases com uma solução de alto nível de serviço, com os volumes de estoque centrados na faixa de estoque

desejável. Este é o comportamento típico observado para estas soluções.

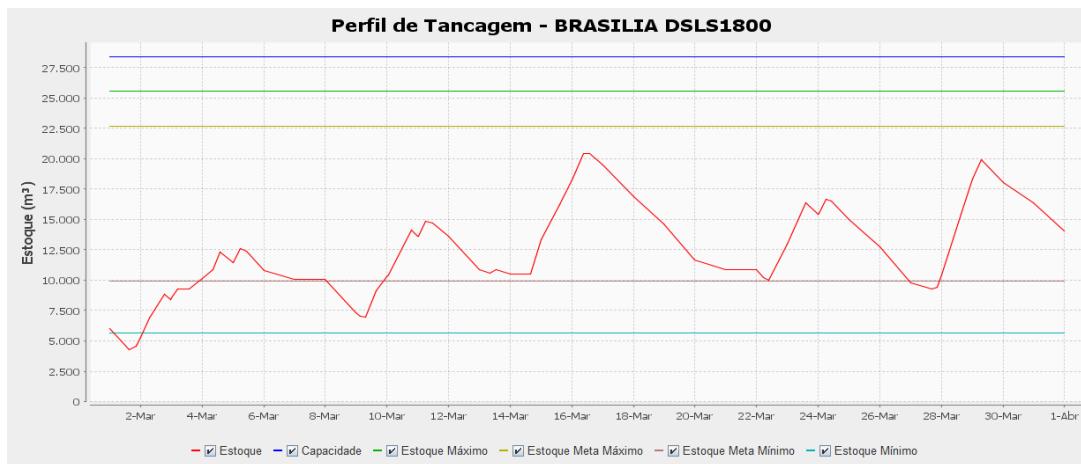


Figura 57 – Perfil de Estoques Diesel – Brasília – Cenário 1c – SolFO\_14

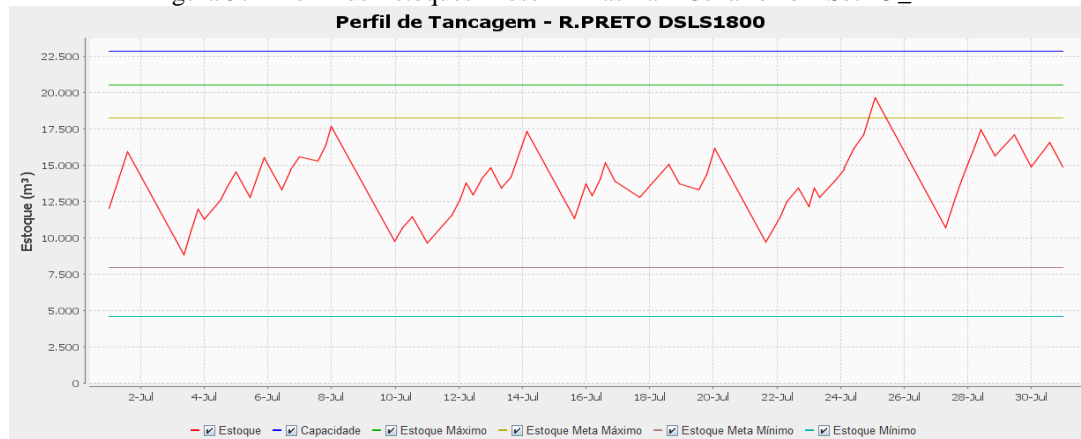


Figura 58 – Perfil de Estoques Diesel – R.Preto – Cenário 5a – SolFO\_15

Ainda para níveis de serviço acima de 99%, normalmente as penalidades são originárias de violações pontuais de um ou no máximo dois dias em produtos e pontos isolados. Este tipo de falha no nível de serviço pode ser facilmente negociado com os clientes através do adiantamento pontual de retiradas, em caso de excesso de estoque (Figura 59) ou, em caso de falta (Figura 60), atraso pontual de retiradas.

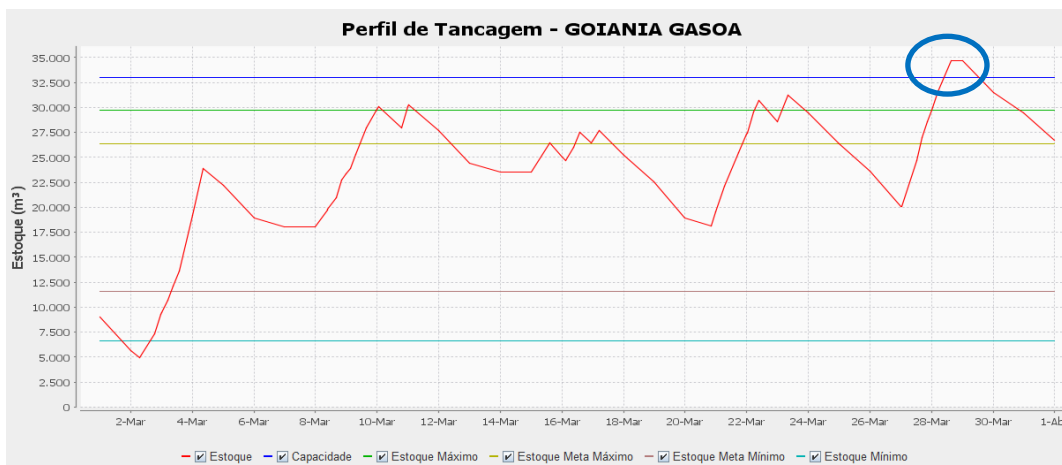


Figura 59 – Perfil de Estoques Gasolina – Goiânia – Cenário 1c – SolFO\_14

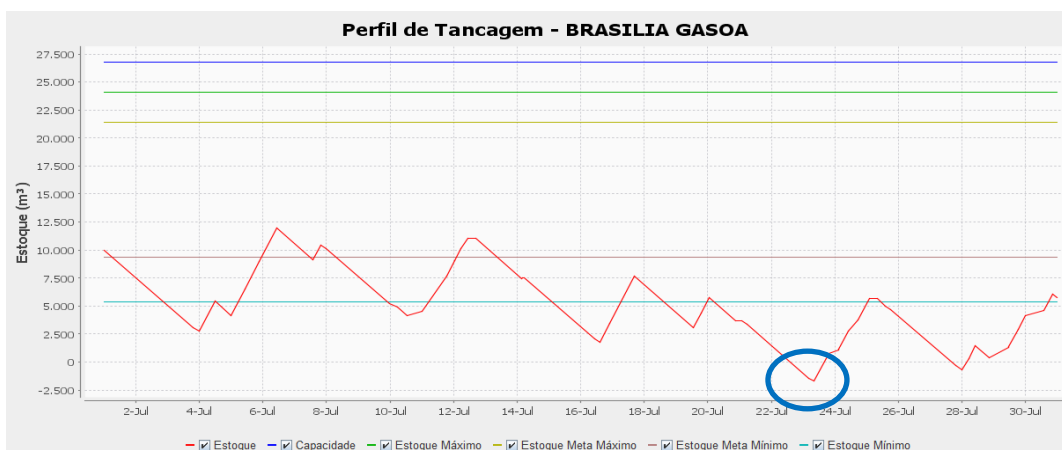


Figura 60 – Perfil de Estoques Gasolina – Brasília – Cenário 5a – SolFO\_15

No outro extremo das soluções consideradas boas, as com nível de serviço próximo a 97%, em geral, todas as bases possuem um perfil similar às soluções com nível de serviço acima de 99%, exceto a base de Brasília que sofre com falta de estoque em um ou ambos os produtos a partir da segunda quinzena de planejamento. Em suma, o que chega de produtos não é suficiente para atender a demanda plena nestes períodos. Na Figura 61 há falta de gasolina, enquanto na Figura 62 há falta de diesel.

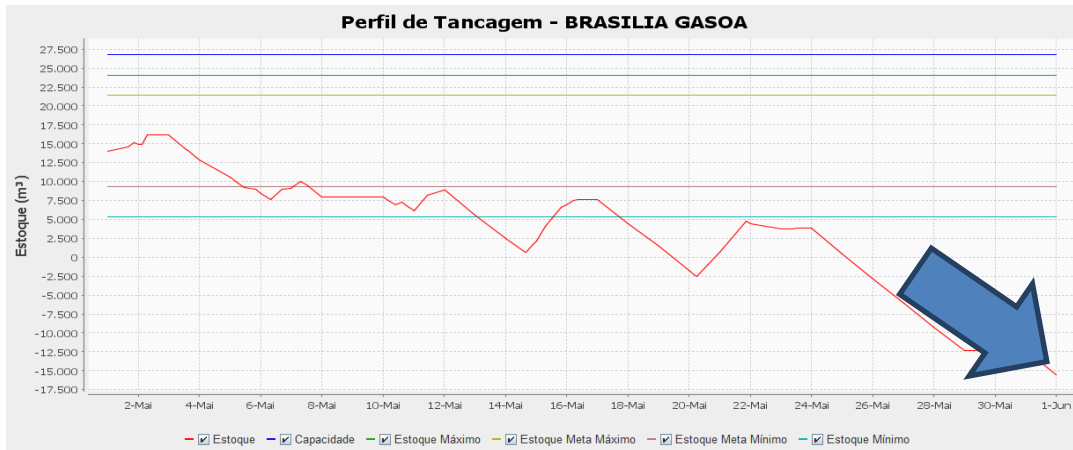


Figura 61 – Perfil de Estoques Gasolina – Brasília – Cenário 3b – SolFO\_14

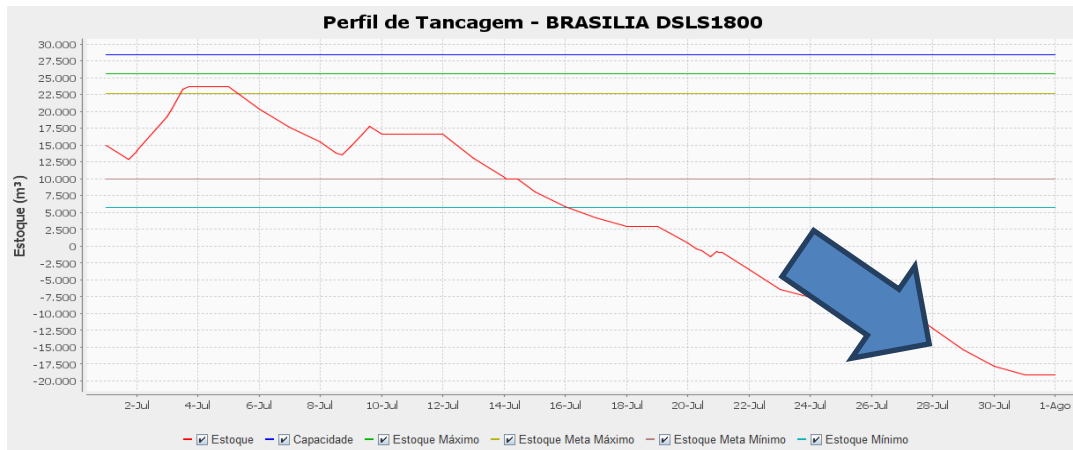


Figura 62 – Perfil de Estoques Diesel – Brasília – Cenário 5b – SolFO\_15

É importante ressaltar que tal qual nas soluções com nível de serviço acima de 99%, a regra geral não é a observada na Figura 61 e Figura 62, mas sim o representado na Figura 63 e Figura 64, ou seja, bases com um nível de estoque dentro da faixa central.

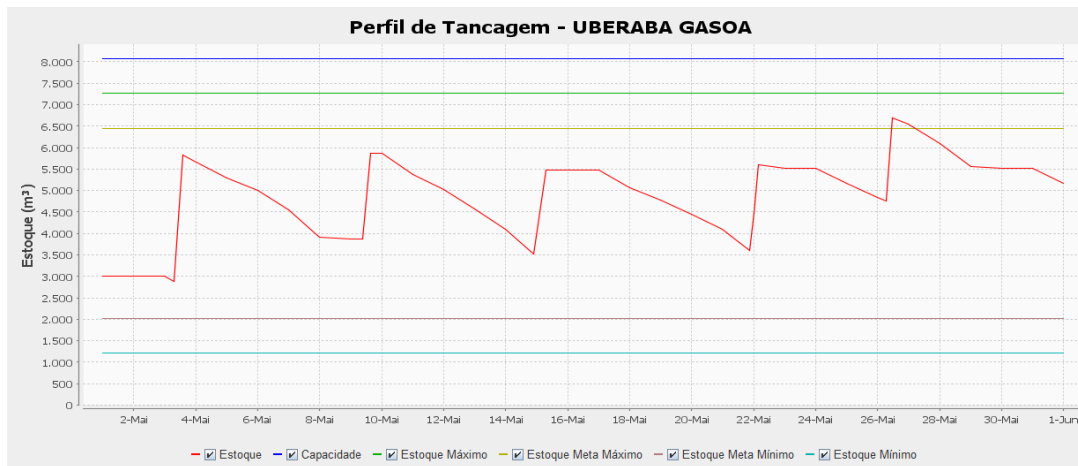


Figura 63 – Perfil de Estoques Gasolina – Uberaba – Cenário 3b – SolFO\_14



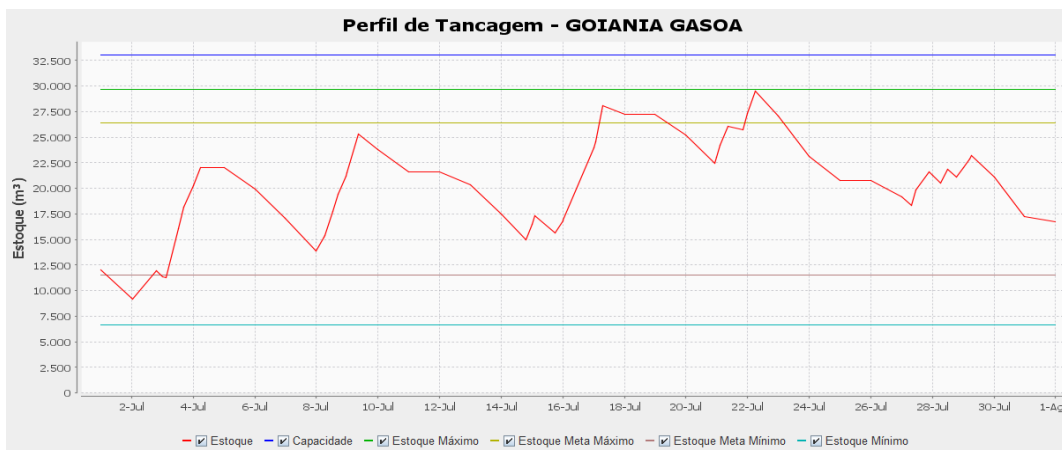


Figura 64 – Perfil de Estoques Gasolina – Goiânia – Cenário 5b – SolFO\_15

Neste ponto devem ser observados dois aspectos: a utilidade desta solução e as causas das falhas da solução.

Quanto à utilidade, considerando que estas falhas acontecem na segunda quinzena e que há produto suficiente para atender a demanda de Brasília por Goiânia, a solução ainda é de extrema utilidade na programação do duto, pois este processo de programação é refeito periodicamente com as mudanças de premissas de demanda (seção 2.2). Espera-se que ao se modificar as premissas o solucionador encontre uma boa solução. E, principalmente, o modelo proposto possui uma limitação de não considerar o bombeio a partir de Goiânia para Brasília. Este bombeio é facilmente visualizado pelo analista de movimentação, podendo, desta forma, a solução ser utilizada até o horizonte onde não apresenta infactibilidades locais, e, neste ponto, uma interferência humana tornaria a solução factível.

Quanto às causas, como citado no parágrafo anterior, o modelo proposto possui limitações ao não considerar o bombeio Goiânia – Brasília, que algumas vezes é necessário devido ao fato desse duto possuir baixa vazão se comparado aos outros troncos e à demanda da base de Brasília. Somando-se a isso à dificuldade de convergência do modelo e a consequente interrupção das soluções intermediárias em mínimos locais que não proporcionam o estoque inicial ideal nas bases e nos dutos, tem-se este tipo de falha na solução.

Já cenários com valores de nível de serviço intermediários (na faixa dos 98%) tendem a ter problemas intermediários entre os dois, como na Figura 65 onde o nível de estoque de gasolina sobe nos últimos dias do período em Goiânia enquanto em Brasília, para esse mesmo cenário, desce. Logo, surgem falhas nos últimos dias de cenário. Contudo, as soluções obtidas são utilizáveis para a operação, mesmo porque a regra geral de todas as bases é a observada na Figura 66.

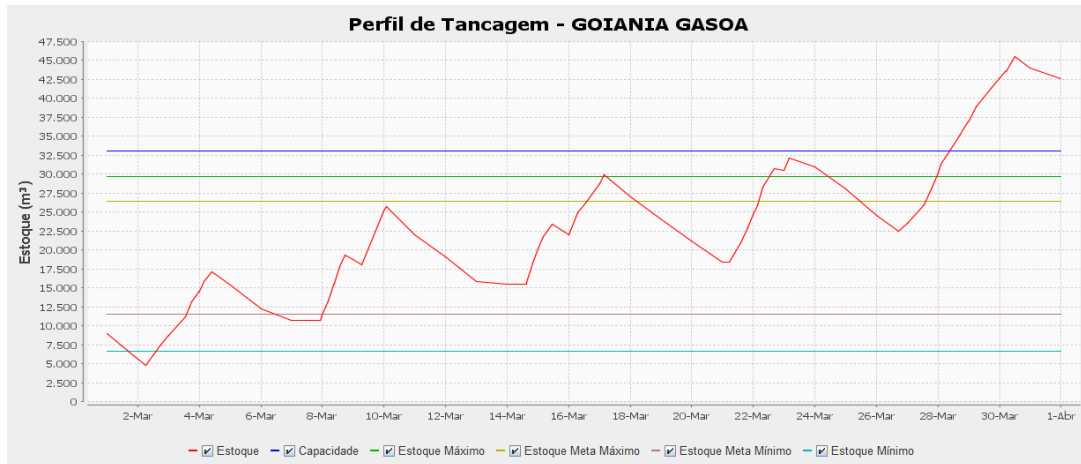


Figura 65 – Perfil de Estoques Gasolina – Goiânia – Cenário *1b* – *SolFO\_15*

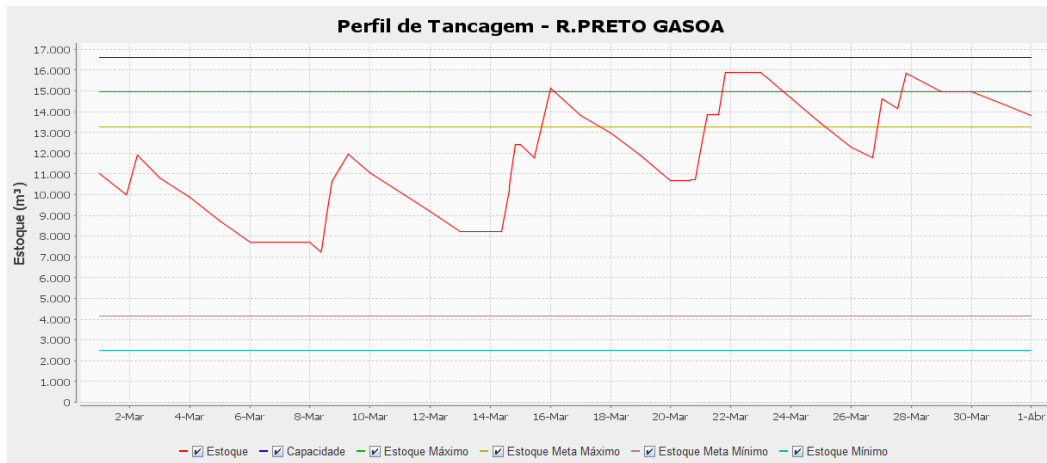


Figura 66 – Perfil de Estoques Gasolina – R.Preto – Cenário *1b* – *SolFO\_15*

### 6.3.2. Análise Qualitativa das Soluções Descartadas

Nesta seção são analisadas soluções descartadas por baixo nível de serviço, comparando-as com soluções de boa qualidade para os mesmos cenários.

A Figura 67 mostra um comportamento típico em parte dos perfis de estoque do cenário *1c*, quando aplicada a configuração de função objetivo *SolFO\_15*. Estas bases, a partir do dia 10 do horizonte (1/3 do horizonte total) começam a sair dos seus limites de estoque, ou seja, a solução não consegue escoar corretamente os produtos através do duto provocando excesso em alguns pontos e falta em outros. Analisando a solução para o mesmo cenário observado na Figura 57 e Figura 59, nota-se que é possível obter uma solução que atenda os níveis de serviço. Logo esta configuração da função objetivo (*SolFO\_15*), em alguma

execução intermediária, ficou presa em um subótimo e as execuções posteriores não conseguiram mais manter o nível de serviço.

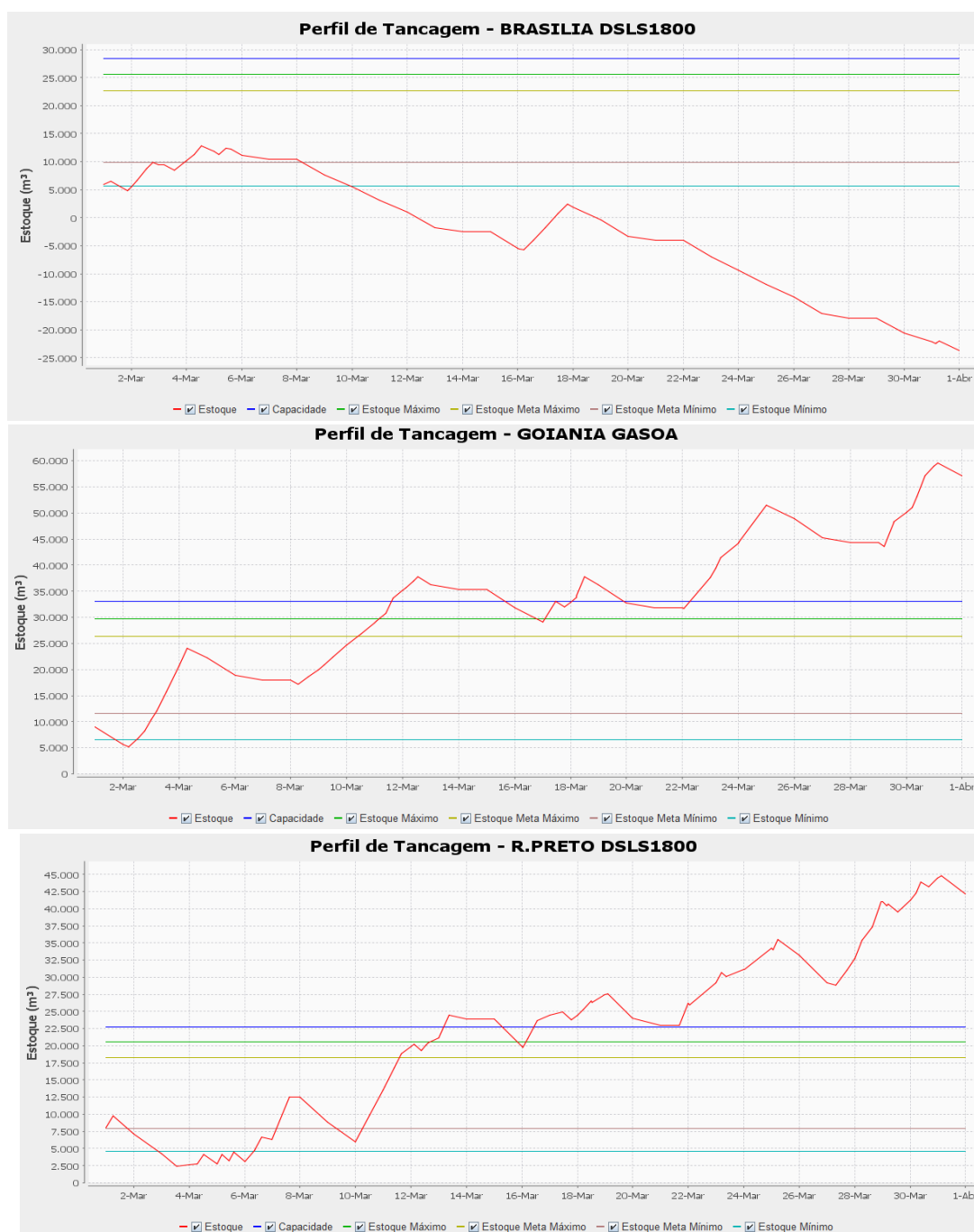


Figura 67 – Perfis de Estoques– Cenário 1c – SolFO\_15

Do ponto de vista prático, esta solução (da configuração *SolFO\_15*) poderia ser utilizada na primeira semana em caso de necessidade, mas o ideal seria executar outra configuração como a *SolFO\_14*.

Já para o cenário *1a*, quando solucionado pela configuração de função objetivo *SolFO\_14* o bombeamento do último trecho de duto, entre Goiânia e Brasília, deixa de ser

feito ao final da primeira terça parte do horizonte do cenário. Como consequência imediata os estoques de Brasília descem, enquanto os de Goiânia sobem, algum tempo depois, por volta do final da segunda terça parte do horizonte do cenário. Este problema tem reflexo nos estoques das demais bases, conforme observado na Figura 68.



Figura 68 – Perfis de Estoques– Cenário 1a – SolFO\_14

As causas da falta de boa convergência do otimizador são as mesmas do exemplo anterior, uma vez que a configuração *SolFO\_15* alcançou bons resultados para este cenário.

Mas neste caso a utilização prática da solução é mais viável. Na primeira parte do horizonte a solução pode ser utilizada integralmente, enquanto na segunda parte é necessário que o programador analise o trecho Goiânia – Brasília para prever bombeios diretos de Goiânia para que Brasília seja abastecida, aproveitando, desta forma parte da solução. A última parte da solução deverá ser totalmente descartada, sendo necessária uma nova otimização ao final dos primeiros vinte dias.

#### **6.4. SINTONIA FINA - MUDANÇA NOS PESOS DE ESTOQUE META**

Conforme explicado na seção 4.4.3, a função objetivo, expressão (4.1), possui um peso maior no quesito estoque meta de alguns órgãos e produtos para que haja uma ênfase na minimização de desvios de estoque nestes órgãos e produtos mais propensos a desvios.

Com as configurações consideradas básicas para execução, em alguns cenários não houve êxito na obtenção de resultados com nível de serviço de acordo com o esperado. Diante disto e da análise qualitativa realizada nos resultados do cenário *1a*, *SolFO\_14*, decidiu-se aumentar este peso relativo de quatro para quatorze e incluir nos produtos críticos a falta de estoque de diesel em Brasília, fazendo, desta forma, uma sintonia do modelo para este cenário.

Como resultado o cenário *1a*, a configuração de função objetivo *SolFO\_14* sintonizada alcançou um nível de serviço de 100% (a configuração padrão a solução havia sido descartada, abaixo do limite mínimo aceitável). Comparando a Figura 68 com a Figura 69, nota-se uma sensível melhora nos perfis de estocagem.

Este recurso de sintonia pode ser utilizado se na análise qualitativa verificar-se uma falha pontual (de poucos produtos e órgãos) que desencadeia a perda de resultados da solução como um todo.

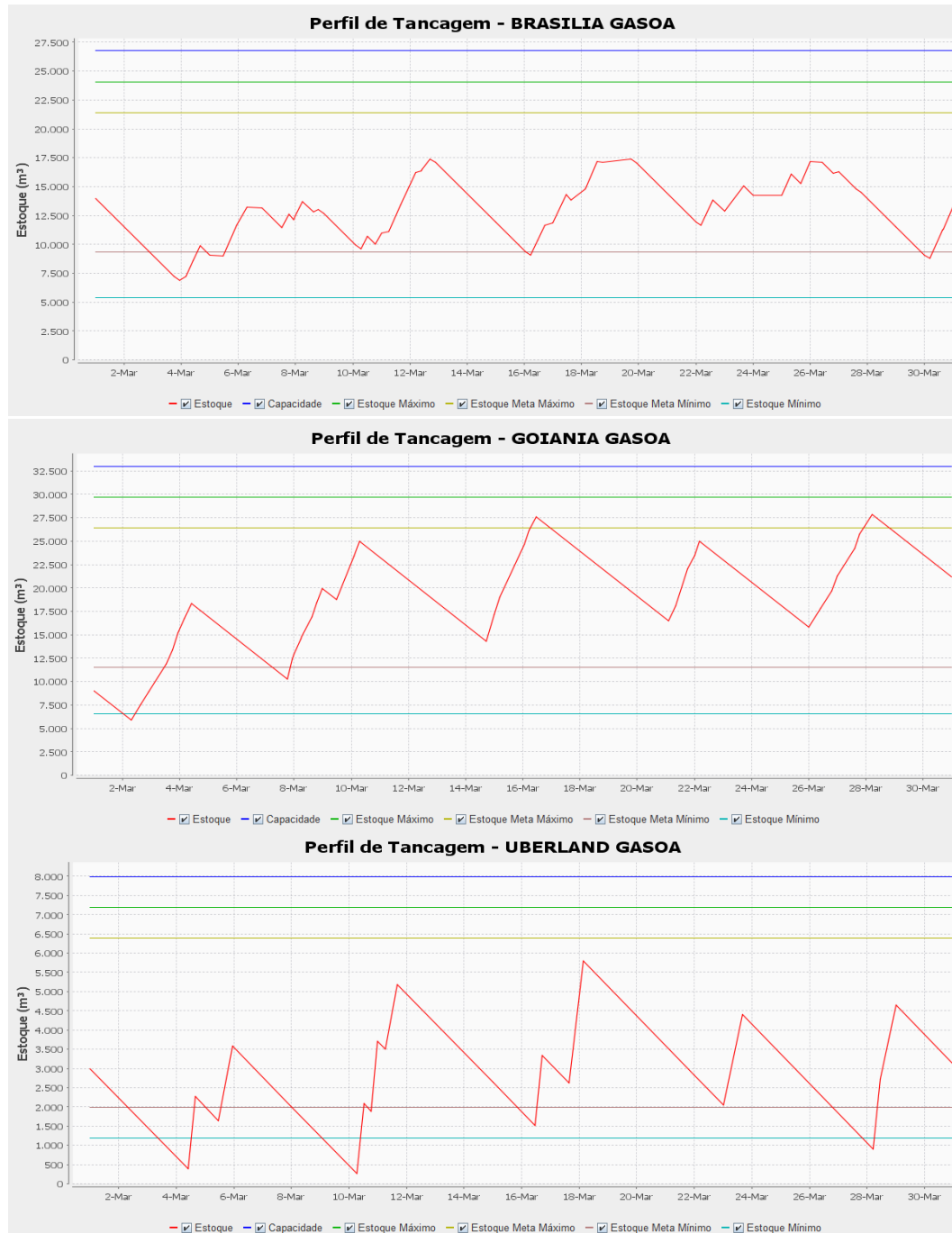


Figura 69 – Perfis de Estoques– Cenário 1a – SolFO\_14 – Pesos Estoque Meta Modificados

## 6.5. CONCLUSÕES DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A partir da configuração do *solver*, da melhor ponderação de função objetivo (*SolFO\_14*) e do conjunto de boas ponderações de função objetivo identificadas no capítulo anterior, neste capítulo determina-se a configuração de função objetivo alternativa. Além disso, são analisados do ponto de vista quantitativo e qualitativo o desempenho de ambas as

configurações quando aplicadas aos dezoito cenários do OSBRA disponíveis.

A *SolFO\_14*, escolhida como padrão, conseguiu bons resultados em onze de dezoito cenários, ou seja, é aplicável com sucesso em 61% dos cenários estudados. Enquanto a *SolFO\_15*, escolhida como configuração alternativa, atingiu bons resultados em doze dos dezoito cenários, um aproveitamento de 67%. As duas configurações indicadas para o sistema, juntas, conseguem bons resultados para 89% dos cenários analisados. Em apenas dois dos dezoito cenários as respostas não foram satisfatórias.

Uma análise mais profunda e detalhada do cenário *4b – SolFO\_14* foi realizada, na qual foi descrita a solução completa, passando pelo diagrama de gantt de bombeio (com detalhes que caracterizam as bateladas que se encontram nos trechos de dutos com as respectivas sangrias) e a evolução de estoques base a base e produto a produto.

Também foram analisadas as características padrão das boas soluções encontradas, nas quais apenas algumas falhas pontuais são notadas, podendo ser utilizadas como programação real de produção.

Mesmo para os cenários com soluções consideradas ruins, notou-se que seria possível a utilização parcial da solução em caso de necessidade.

Por último mostrou-se um exemplo de sintonia fina do sistema, onde, a partir da análise dos resultados preliminares de uma solução descartada, mudam-se os produtos inseridos como prioritários (seção 1) e obtêm-se uma solução de alta qualidade.





## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente tese teve como principal proposta desenvolver um sistema de auxílio à tomada de decisão para a determinação do *scheduling* de um sistema de transporte dutoviário com uma origem e vários destinos. A abordagem de solução foi baseada em uma heurística iterativa de rolagem do tempo acionando um modelo de otimização em programação matemática. Os estudos são aplicados em uma série de cenários reais do oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA).

O atual momento de crescimento econômico brasileiro, e em especial da região Centro Oeste, acarreta um consumo crescente de derivados que devem ser disponibilizados em quantidade cada vez maior. Se essa condição é satisfeita a custos competitivos, permite e incentiva este crescimento, criando um círculo virtuoso.

Além disto, nos dias atuais, percebe-se que a segurança e mitigação de riscos materiais e principalmente sociais e ambientais são condições essenciais. O modal dutoviário, para transporte de petróleo, derivados e gás natural possui como características um alto custo de investimento inicial, mas um baixo custo de operação, o que o coloca como o modal terrestre de mais baixo custo total para grandes volumes, além de ser o modal mais seguro do ponto de vista ambiental e material.

Desta combinação vem a necessidade motivadora de desenvolver sistemas que possibilitem a utilização otimizada das estruturas dutoviárias existentes para transporte de derivados de petróleo de modo que minimizem a utilização de outros modais e posterguem grandes investimentos para ampliação da rede. Acrescenta-se a essa necessidade, a inexistência de ferramentas comerciais otimizadoras adaptadas à realidade de operação dutoviária brasileira, e o fato de que trabalhos acadêmicos nesta área específica de estudo ainda não cobrem os requisitos operacionais básicos.

O problema abordado, do *scheduling* de um duto com uma origem e vários destinos, foi descrito no capítulo 2, com ênfase nas particularidades do OSBRA, suas restrições e características operacionais essenciais.

No capítulo 3 foi feita a revisão de trabalhos acadêmicos sobre otimização e em especial de problemas envolvendo planejamento e programação de dutos. Nesta parte do estudo foi possível analisar características positivas de trabalhos anteriores a serem aproveitadas, bem como identificar as principais restrições operacionais não atendidas em cada uma das abordagens da literatura que também desenvolveram modelos de otimização para o OSBRA.

A partir da análise anterior, foi desenvolvido um modelo em PLIM com abordagem temporal contínua, onde cada batelada de origem de um produto é dividida em eventos. Cada evento corresponde a alguma mudança de início, fim ou variação de vazão de sangria em algum dos órgãos destino – mudança esta que acarreta variações de vazão. Assim, a abordagem de solução proposta permite variações nas vazões de bombeio e de sangrias, dentro de faixas operacionais. Objetivou-se aproximar a complexidade operacional do sistema real.

Outra característica importante do problema que acarretou desafios para a estratégia de implementação foi o fato de que um derivado que entra no OSBRA com destino a Brasília ficará de 8 a 21 dias trafegando pelo duto, o que impõe a necessidade de que a solução obtida tenha pelo menos 30 dias de horizonte de programação.

Para atender esta necessidade, sem que o efeito da complexidade computacional tornasse o tempo de execução impraticável, optou-se por uma estratégia de execução iterativa. Foi desenvolvida uma heurística que controla sucessivas execuções do modelo PLIM, onde a saída do modelo atualiza as informações gerais do cenário, rola o horizonte temporal e serve de entrada para a próxima execução do mesmo modelo.

Dutos com uma origem e vários destinos normalmente percorrem longas distâncias e envolvem volumes de duto muito grandes. O modelo desenvolvido, com vistas a estas características e procurando uma maior aderência às operações reais, considera algumas restrições primordiais do sistema OSBRA:

- Não interrupção do fluxo nos trechos de duto, exceto no último trecho. A energia gasta para manter em movimento uma grande massa é menor do que a energia necessária para colocá-la em movimento. Devido a isto e ao fato de que em paradas as contaminações aumentam, foi imposta esta restrição.
- Volumes de batelada na ordem de dezena de milhares de metros cúbicos. Com um menor número de bateladas para atender a mesma demanda as interfaces que poderiam causar contaminações diminuem.

Após o desenvolvimento do modelo, uma série de testes e análises estatísticas foi feita para compreender as características dos cenários e, principalmente determinar as melhores configurações de pesos da função objetivo a fim de se obter melhores soluções para os possíveis cenários do problema.

Como o modelo matemático, devido a restrições de desempenho computacional, faz uma otimização num curto espaço de tempo dentro do horizonte total, sendo guiado em

volume pela heurística iterativa para atingir os objetivos do cenário total, a função objetivo do modelo matemático procura deixar as faixas de estoque o mais centralizadas possível a fim de se maximizar o nível de serviço total.

A determinação dos melhores parâmetros só é possível através da análise da solução completa das diversas combinações possíveis. Esta análise foi feita na seção 5.3, na qual se chegou a duas configurações recomendáveis.

Conforme apresentado no capítulo 6, dezoito cenários reais do OSBRA foram submetidos ao modelo e em apenas dois cenários não foi possível alcançar uma boa solução com uma das duas configurações sugeridas. Nestes cenários ainda é possível a melhoria pontual através da sintonia fina do modelo, com a mudança de peso do estoque meta para produtos e órgãos específicos.

De forma geral os resultados obtidos mostraram o sucesso da metodologia implantada, atingindo boas respostas para a mais variada gama de cenários que reproduzem as condições críticas reais. A junção de técnicas de programação matemática do modelo otimizador de curto prazo com técnicas heurísticas de rolagem de horizonte propiciou o desenvolvimento de um sistema com bom desempenho tanto em qualidade de solução quanto em tempo de execução.

## **7.1. CONTRIBUIÇÕES**

Dentre as principais contribuições do trabalho, podem ser destacadas:

1. Descrição do problema de programação do transporte de derivados para um duto com uma origem e vários destinos, com aplicação em uma rede real, do OSBRA, que liga a Refinaria de Paulínia a Brasília, sendo responsável pelo abastecimento de parte do interior de São Paulo e Minas, além da totalidade da região Centro-Oeste.
2. Revisão e análise de trabalhos acadêmicos desenvolvidos na área de planejamento e programação de sistemas dutoviários, tanto de petróleo quanto de derivados.
3. Desenvolvimento de um modelo de programação linear inteira mista baseada em eventos, que reproduz o sistema real OSBRA, que consiste em uma origem e cinco destinos. Que atende os requisitos operacionais de variação da vazão em função da entrada de sangrias, uso de produto selo, variação diária das

demandas, não interrupção do fluxo no duto principal, registro de tempo contínuo, respeito às faixas de vazão em cada trecho de duto e nas sangrias, respeito aos volumes de batelada mínimo de bombeio e sangria.

4. Desenvolvimento de um processo heurístico de controle de execução iterativa do modelo e rolagem do horizonte de tempo de cada execução que permite a abrangência de um horizonte de trinta dias com um tempo computacional aceitável.
5. Com as duas contribuições anteriores, chegou-se a um sistema de auxílio à tomada de decisão que proporciona soluções de *scheduling* otimizado para o OSBRA que atendem um conjunto de requisitos funcionais ainda não cobertos pela literatura de forma concomitante, conforme observado na Tabela 7.1. O que na prática significa que estas soluções podem ser aproveitadas integralmente ou parcialmente pelos analistas para a programação do duto.

Tabela 7.1 – Aderência dos Trabalhos aos Requisitos Operacionais, atualização da Tabela 3.6

	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)	(vi)	(vii)
Sasikumar et al. (1997)	não	√	não	não	não	√	não
Rejowski e Pinto (2002); Rejowski e Pinto (2003a); Rejowski e Pinto (2003b) e Rejowski e Pinto (2004)	não	não	não	não	não	√	√
Jittamai (2004)	não	não	não	não	Trecho de duto	√	não
Cafaro e Cerdá (2004)	não	não	não	√	não	√	não
Cafaro e Cerdá (2005)	não	√	não	√	não	√	não
Rejowski e Pinto (2005) e Rejowski (2007)	não	não	não	√	Trecho de duto	√	√
Sangineto (2006)	não	não	não	não	não	não	não
Souza Filho, Ferreira Filho e De Lima (2007)	não	não	não	não	não	não	não
Rejowski e Pinto (2008)	não	não	não	√	Trecho de duto	√	√
MirHassani e Fani Jahromi (2011)	não	√	não	√	Trecho de duto	√	não
Presente Tese	√	√	√	√	√	√	√

onde:

- (i) não interrupção do fluxo do duto principal.
- (ii) horizonte de programação mínimo de 30 dias.
- (iii) variação diária da demanda.
- (iv) registro de tempo contínuo.
- (v) respeito às faixas de vazão em cada trecho de duto e nas sangrias.
- (vi) respeito aos volumes de batelada mínimo de bombeio e sangria.
- (vii) não contaminação de produtos adjacentes (uso de batelada selo).

## 7.2. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A partir do estudo desenvolvido e dos resultados alcançados, notou-se a possibilidade de novos desenvolvimentos e aprimoramentos, com destaque para:

1. Após a obtenção de cenários reais com previsão de manutenção de tanques, realizar testes no modelo sob mais esta restrição. Analisar o seu desempenho e verificar a necessidade de ajustes.
2. Uma das limitações da modelagem proposta é o número máximo de produtos que trafegam no duto. Ela reflete a realidade atual. Há a expectativa que a partir de 2014 mais um produto trafegue pela rede. Para que seja possível programar mais produtos, será necessário o desenvolvimento de um sistema mais complexo no pré-processamento, substituindo a atual heurística descrita na seção 4.4.1.
3. O sistema desenvolvido apresenta uma simplificação que restringe o espaço de soluções, que é a impossibilidade de se executar bombeamentos partindo de Goiânia para Brasília. Esta simplificação pode levar a baixar o nível de serviço em cenários onde há uma alta demanda em Brasília. Sugere-se um estudo para viabilizar uma alternativa para contemplar este rebombeio de Goiânia para Brasília e desta forma melhorar a qualidade das soluções.
4. Realização de estudos de readequação da política de níveis de estoque perante a qualidade das soluções do modelo. A redefinição da política de níveis de estoque desejáveis e meta tem impacto no resultado do modelo, é necessário um estudo estatístico na mudança destes valores e o seu impacto.
5. Utilização do sistema desenvolvido na presente tese para a realização de estudos de investimento da melhor forma de ampliação da capacidade do OSBRA. Com a solução de diversos cenários futuros é possível detectar os gargalos do sistema, tanto quais são os limites de vazão de trecho de duto quanto de capacidade de estoque por órgão e produto que causam maior impacto na capacidade de transporte e atendimento do OSBRA.

## REFERÊNCIAS

ALVES, V.R.F.M. **Programação de Transferência de Derivados de Petróleo em Rede Dutoviária Usando Algoritmo Genético**. 2007, p. 113. Dissertação de Mestrado. UFRJ, Rio de Janeiro. 2007.

BIEGLER, L.T.; GROSSMANN, I.E. Retrospective on Optimization. **Computers & Chemical Engineering**, New York, 15 jul. 2004. 1169-1192.

BOSCHETTO, S. N. et al. **A Decomposition Approach for the Operational Scheduling of a Multiproduct Pipeline**. 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE20. [S.l.]: Elsevier. 2010. p. 1207–1212.

BOSCHETTO, S. N.; MAGATÃO, L.; NEVES-JR, F. **Modelo PLIM de Alocação e Sequenciamento de Bateladas Aplicado em uma Rede de Dutos**. XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Bento Gonçalves: SOBRAPO. 2010.

BOSCHETTO, S.N. **Otimização das Operações de Transferência e Estocagem em Rede de Dutos**. 2011, p. 247. Tese de Doutorado. UTFPR, Curitiba. 2011.

BRACONI, V. M. **Heurísticas Multifluxo para Roteamento de Produtos em Redes Dutoviárias**. 2002, p. 78. Dissertação de Mestrado. PUC-Rio, Rio de Janeiro. 2002.

BRITO, R.G.F.A. **Planejamento, Programação e Controle da Produção**. São Paulo: IMAM, 2000.

CAFARO, D.; CERDÁ, J. Optimal Scheduling of Multiproduct Pipeline Systems Using a Nondiscrete MILP Formulation. **Computers and Chemical Engineering**, v. 28, p. 2053–2068, 2004.

CAFARO, D.; CERDÁ, J. **Multiperiod Planning of Multiproduct Pipelines**. European Symposium on Computer Aided Process Engineering - ESCAPE15. Barcelona: ELSEVIER. 2005.

CAFARO, D.C.; CERDÁ, J. Operational Scheduling of Refined Products Pipeline Networks with Simultaneous Batch Injections. **Computers and Chemical Engineering**, v. 34, n. 10, p. 1687-1704, out. 2010.

CAFARO, V.G. et al. **Oil-Derivatives Pipeline Logistics Using Discrete-Event Simulation**. 2010 Winter Simulation Conference. Maryland: B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hukan, and E. Yücesan. 2010. p. 2101-2113.

CAMPONOGARA, E. **A-Teams para um Problema de Transporte de Derivados de Petróleo**. 1995, p. 207. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1995.

CIRÉ, A.A. **Modelos Computacionais para o Escalonamento de Tarefas em Rede de Dutos**. 2008, p. 90. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2008.

CORREA, H. L.; GIANESI, I. G.N.; CAON, M. **Planejamento, Programação e Controle da Produção**. 4a. ed. São Paulo: Atlas S.A., v. I, 2001.

CRANE, D.S.; WAINWRIGHT, R.L.; SCHOENEFELD, D.A. **Scheduling of Multi-Product Fungible Liquid Pipelines using Genetic Algorithms**. Symposium on Applied Computing - SAC'99. San Antonio: [s.n.]. 1999.

DE LA CRUZ, J.M. et al. **Multiobjective Optimization of the Transport in Oil Pipelines Networks**. Emerging Technologies and Factory Automation. ETFA '03. Lisboa: IEEE. 2003. p. 566 - 573.

DE LA CRUZ, J.M. et al. Hybrid Heuristic and Mathematical Programming in Oil Pipelines Networks: Use of Immigrants. **Journal of Zhejiang University SCIENCE**, v. 6A, n. 1, p. 9-19, 2005. ISSN ISSN 1009-3095.

FELIZARI, L. C. **Programação das Operações de Transporte de Derivados de Petróleo em Redes de Dutos**. 2009, p. 154. Tese de Doutorado. UTFPR, Curitiba. 2009.

FERBER, J. **Multi-Agent System: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence**. 1st. ed. London: Pearson Education Limited, v. I, 1999.

FINANCIAL TIMES. FT500 - 2010. **Financial Times**, 2010. Disponível em: <<http://www.ft.com/intl/reports/ft500-2010>>. Acesso em: 31 maio 2011.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas**. 1a. ed. Florianópolis: Visual Books Editora, v. I, 2001.

GLEIZES, M.F. et al. **A Discrete-Event Simulation Tool for Efficient Operation of Refined Products Pipelines**. 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE20. Ischia: Elsevier. 2010.

HASSIMOTTO, M.K. **Otimização da Programação de Curto Prazo de Duto Bidirecional de Derivados de Petróleo**. 2007, p. 137. Dissertação de Mestrado. USP, São Paulo. 2007.

HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. **Introduction to Operation Research**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

IBGE. Indicadores IBGE - PIB. **IBGE**, 2010. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/mapa\\_site/mapa\\_site.php#indicadores](http://www.ibge.gov.br/home/mapa_site/mapa_site.php#indicadores)>. Acesso em: 17 jun. 2012.

IBM. **User's Manual for Cplex**. 12.1. ed. New York: IBM, v. I, 2009.



IBM. CPLEX Optimizer Performance Benchmark Details. **IBM**, 2011. Disponível em: <<http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimization-studio/cplex-optimizer/cplex-performance/>>. Acesso em: 31 maio 2011.

IVANOV, D. **An Optimal-Control Based Integrated Model of Supply Chain Scheduling**. 2010. Working Paper. St. Petersburg State University, St. Petersburg. 2010.

JITTAMAI, P. **Analysis of Oil-Pipeline Distribution of Multiple Products Subject to Delivery Time-Windows**. 2004, p. 120. Dissertação de Mestrado. Texas A&M University, College Station. 2004.

JUSTIÇA FEDERAL. **Acordo Firmado entre Ministério Público Federal, ANP, Estado de São Paulo, IBAMA, Petrobras e outras partes: Ações Cíveis Públicas: n. 2007.61.00.034636-2 e n. 2008.61.00.013278-0**. 2008. Justiça Federal, São Paulo.

KALLRATH, J. Planning and Scheduling in the Process Industry. **OR Spectrum**, New York, v. 24, p. 219-250, 2002.

KENNEDY, J.; EBERHART, R.C.; SHI, Y. **Swarm Intelligence**. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001.

KREIPL, S.; PINEDO, M. Planning and Scheduling in Supply Chains: An Overview of Issues in Practice. **PRODUCTION AND OPERATIONS MANAGEMENT**, v. 13, n. 1, p. 77-92, 2004. ISSN issn 1059-1478.

LEE, H. et al. Mixed-Integer Linear Programming Model for Refinery Short-Term Scheduling of Crude Oil Unloading with Inventory Management. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 35, n. 5, p. 1630–1641, 1996.

LOPES, T. M.T. et al. A Hybrid Model for a Multiproduct Pipeline Planning and Scheduling Problem. **Constraints**, v. 15, p. 151–189, 2010.

MAGALHÃES, M. V.O.; SHAH, N. **Crude Oil Scheduling**. Foundations of Computer-Aided Process Operations (FOCAPO2003). Coral Springs: [s.n.]. 2003. p. 323-326.

MAGATÃO, L. **Programação Matemática Aplicada à Otimização das Operações de um Poliduto**. 2001, p. 170. Dissertação de Mestrado. UTFPR, Curitiba. 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, p. 171–185, 2004.

MAGATÃO, L.; ARRUDA, L. V.R.; NEVES-JR., F. Um Modelo Híbrido (CLP-MILP) para Scheduling de Operações em Polidutos. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 2, p. 511-543, set. 2008. ISSN ISSN 1678-5142.

MAGATÃO, L.; ARRUDA, L.; NEVES-JR, F. A Combined CLP-MILP Approach for Scheduling Commodities in a Pipeline. **Journal of Scheduling**, Netherlands, v. 14, p. 57-87, 2011. ISSN ISSN 1094-6136.

MARCELLINO, F.M.; OMAR, N.; MOURA, A.V. **The Planning of the Oil Derivatives Transportation by Pipelines as a Distributed Constraint Optimization Problem**. Distributed Constraint Reasoning (DCR'07). Lausanne: [s.n.]. 2007. p. 1-15.

MENDEZ, C. A. et al. State-of-the-Art Review of Optimization Methods for Short-Term Scheduling of Batch Processes. **Computers & Chemical Engineering**, v. 30, p. 913–946, jun. 2006.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. 3rd. ed. New York: Springer, v. I, 1996.

MILIDIU, R.L.; LIPORACE, F.S. Planning of Pipeline Oil Transportation with Interface Restrictions is a Difficult Problem. **PUC-Rio**, 2003. Disponível em: <[http://www.dbd.puc-rio.br/depto\\_informatica/03\\_56\\_milidiu.pdf](http://www.dbd.puc-rio.br/depto_informatica/03_56_milidiu.pdf)>. Acesso em: 31 maio 2011.

MIRHASSANI, S.A.; FANI JAHROMI, H. Scheduling Multi-Product Tree-Structure Pipelines. **Computers & Chemical Engineering**, v. 35, n. 1, p. 165-176, jan. 2011. ISSN ISSN 0098-1354.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 7a. ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, v. I, 2008.

PASSOS, C. A.K. **Novos Modelos de Gestão e as Informações**. Rio de Janeiro: Campus, 1999.

PESSOA, A.A. **Dois Problemas de Otimização em Grafos: Transporte em Rede de Dutos e Busca com Custos de Acesso**. 2003, p. 119. Tese de Doutorado. PUC-Rio, Rio de Janeiro. 2003.

PETROBRAS; UTFPR; UNICAMP. **Requisitos do Sistema Sconsuelo**. 2007. Relatório Interno de Trabalho. Petroleo Brasileiro SA, São Paulo. 2007.

PINTO, J. M.; JOLY, M.; MORO, L. F.L. Planning and Scheduling Models for Refinery Operations. **Computers and Chemical Engineering**, New York, v. 24, p. 2259–2276, 2000.

REJOWSKI, R. **Otimização da Programação de Operações Dutoviárias: Formulações Eficientes e Considerações Hidráulicas**. 2007, p. 236. Tese de Doutorado. USP, São Paulo. 2007.

REJOWSKI, R.; PINTO, J. M. An MILP Formulation for the Scheduling of Multiproduct Pipeline Systems. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 19, n. 04, p. 467 - 474, out. 2002. ISSN ISSN 0104-6632.

REJOWSKI, R.; PINTO, J. M. **Programação de Distribuição Dutoviária de Derivados de Petróleo**. 2003a, p. 33. PETROBRAS, Rio de Janeiro.

REJOWSKI, R.; PINTO, J. M. Scheduling of a Multiproduct Pipeline System. **Computers and Chemical Engineering**, v. 27, p. 1229–1246, 2003b.

REJOWSKI, R.; PINTO, J. M. Efficient MILP Formulations and Valid Cuts for Multiproduct Pipeline Scheduling. **Computers and Chemical Engineering**, v. 28, p. 1511–1528, 2004.

REJOWSKI, R.; PINTO, J. M. **A Rigorous MINLP for the Simultaneous Scheduling and Operation of Multiproduct Pipeline Systems**. European Symposium on Computer Aided Process Engineering - ESCAPE 15. Barcelona: ELSEVIER. 2005.

REJOWSKI, R.; PINTO, J. M. A Novel Continuous Time Representation for the Scheduling of Pipeline Systems with Pumping Yield Rate Constraints. **Computers and Chemical Engineering**, 2008. 1042–1066.

RELVAS, S. et al. Pipeline Scheduling and Inventory Management of a Multiproduct Distribution Oil System. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, 11 out. 2006. 7841-7855.

RELVAS, S.; BARBOSA-PÓVOA, A.; MATOS, H. A. Heuristic Batch Sequencing on a Multiproduct Oil Distribution System. **Computers & Chemical Engineering**, Washington, v. 33, p. 712–730, 2009.

RIBAS, G.; HAMACHER, S.; STREET, A. **Optimization of the Integrated Petroleum Supply Chain Considering Uncertainties Using Stochastic, Robust and Regret Minimization Models**. VI ALIO/EURO Workshop on Applied Combinatorial Optimization. Buenos Aires: VI ALIO/EURO Workshop on Applied Combinatorial Optimization. 2008.

RIBAS, P.C. **Análise do Uso de Têmpera Simulada na Otimização do Planejamento Mestre da Produção**. 2003, p. 131. Dissertação de Mestrado. PUC-PR, Curitiba. 2003.

RODRIGUES, L.F. **Meta-Heurísticas Evolutivas para Dimensionamento de Lotes com Restrições de Capacidade em Sistemas Multiestágios**. 2000. Dissertação de Mestrado. USP, São Paulo. 2000.

SÁNCHEZ, A.G.; ARRECHE, L.M.; ORTEGA-MIER, M. **A Support Decision Tool for Pipeline Scheduling**. Third International Conference on Production Research Americas' Region 2006 (ICPR-AM06). Curitiba: [s.n.]. 2006.

SANGINETO, M.L.T. **Um Algoritmo Genético para a Programação de Transferências em um Poliduto**. 2006, p. 103. Dissertação de Mestrado. UFRJ, Rio de Janeiro. 2006.

SASIKUMAR, M. et al. Pipes: a Heuristic Search Model for Pipeline Schedule Generation. **Knowledge-Based Systems**, v. 10, p. 169–175, 1997.

SCHRIJVER, A. **Theory of Linear and Integer Programming**. 1. ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltda, 1999.

SHAH, N. Mathematical Programming Techniques for Crude Oil Scheduling. **Computers and Chemical Engineering**, Great Britain, v. 20, p. 1227–1232, 1996.

SOUZA FILHO, E.M.; FERREIRA FILHO, V. J.M.; DE LIMA, L. S. **Variable Neighborhood Search (VNS) Aplicado ao Problema de Distribuição Dutoviária com Restrições de Capacidade**. 4o PDPETRO. Campinas: ABPG. 2007.

STEVENSON, W. J. **Administração das Operações de Produção**. 6a. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos S.A., v. I, 2001.

TRANSPETRO. OSBRA. **TRANSPETRO**, 2011. Disponível em: <[www.transpetro.com.br](http://www.transpetro.com.br)>. Acesso em: 28 maio 2011.

VAZ, A.V.; OLIVEIRA, K.N.; DAMASCENO, P.E.G. **O Modal Dutoviário: Análise da Importância e Considerações sobre suas Principais Características**. 2005, p. 10. UFC, Fortaleza.

WILLIAMS, H.P. **Model Building in Mathematical Programming**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons Ltda, 1999.