

Rubens Rejowski Junior

**OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE OPERAÇÕES  
DUTOVIÁRIAS: FORMULAÇÕES EFICIENTES E CONSIDERAÇÕES  
HIDRÁULICAS**

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de  
Doutor em Engenharia.

São Paulo  
2007

Rubens Rejowski Junior

**OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE OPERAÇÕES  
DUTOVIÁRIAS: FORMULAÇÕES EFICIENTES E CONSIDERAÇÕES  
HIDRÁULICAS**

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de  
Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:  
Engenharia Química

Orientador:  
Professor Dr. José Maurício Pinto

São Paulo  
2007

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Dr. José Maurício Pinto pelo apoio, determinação e senso crítico para a contínua melhora deste trabalho. Agradeço também ao amigo Zeca pelo companheirismo e bons momentos que passamos desde 1999.

Agradeço aos meus pais Rubens e Lygia pelo incansável carinho e apoio desde que nasci. Sempre serei grato pela inestimável contribuição na minha formação como pessoa. Ao caminhar ao longo da minha vida sempre terei tranquilidade, pois sei que sempre tive e terei o apoio de vocês, aonde quer que estejam.

As minhas irmãs Karen e Cynthia pela contribuição pessoal e pelo nosso excelente convívio. Sou grato por ter laços fortes que nos tornam solidamente unidos em busca dos nossos ideais pessoais. Ao Carlos Sequeira pela recente e grande amizade formada.

Aos grandes amigos do LSCP: Marco Antônio, Sérgio, Jorge Casas, Elsa, Leda, Teresinha, Maria Lúcia, Carlos Arturo, Maria Cristina, Hamilton, Oscar, Francisco, Galo Lopez, Professor Doutor Galo, Reinaldo Giudici, Fúlvia, Soraia, Plácido, Antônio Carlos, Adriano, Jorge Gut, Alessandro, Maurício, Antônio Carlos, Reinaldo, Tina, João, Marilda e a todos que viveram conosco em uma época com churrascos que ficarão na memória de todos nós.

Aos meus amigos de Nova Iorque Paula e a Maurício pela amizade e carinho em todos os momentos em que fui recebido na sua casa e em todos os momentos em que estivemos juntos. Sou eternamente grato pelo carinho recebido e por ter convivido com pessoas excelentes como vocês.

Aos meus amigos de Nova Iorque Danilo, Melissa, João e Fernando por serem a minha família durante os 10 meses em que estive fora do Brasil e pela grande amizade que formamos. Essa é uma amizade que fica para o resto das nossas vidas. Também sou grato por ter conhecido Sanja, que certamente trará muitas felicidades ao João e a todos os meus amigos que moram por lá.

*I would like to thank Anton, Charlene and Vidal Nieves for being wonderful people that I met at New York. I was lucky when I met you and I will never forget all attention spent with me. Thank you so very much for everything. I wish you all the best.*

À Tia Maria Helena e ao Tio Fernando pelos freqüentes almoços às terças-feiras.

Aos meus eternos amigos Gustavo, Leonardo, Marcelo, Fábio, Renato e Augusto. Obrigado pelo companheirismo, apoio e por suas inestimáveis amizades.

A Carolina pelos excelentes momentos que passamos juntos. Sou grato pelo crescimento pessoal mútuo que o nosso convívio nos trouxe. Obrigado por tudo.

Sou grato pelo apoio sempre distante, porém sempre presente e consistente dos meus padrinhos Cidinha e Wanderley Castilha.

Ao apoio moral dado por Luiz Roberto, Claudia, Vanessa, Bianca, Luciana, Renata e Rafael.

Ao apoio concedido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processo Número 01/10944-9).

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela oportunidade de participar do Programa de Doutorado com Estágio no Exterior (Processo BEX 1312030).

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>iv</b>
<b>Resumo</b>	<b>vi</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Motivação</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos e estrutura</b>	<b>3</b>
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>6</b>
<b>2.1. Operações em refinarias</b>	<b>9</b>
<b>2.2. Modelos para o planejamento e o scheduling de operações dutoviárias</b>	<b>13</b>
<b>3. O PROBLEMA DE DISTRIBUIÇÃO DUTOVIÁRIA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO</b>	<b>20</b>
<b>3.1. Produtos a serem armazenados e distribuídos</b>	<b>20</b>
<b>3.2. Refinaria</b>	<b>21</b>
<b>3.3. Bases de distribuição conectadas ao duto</b>	<b>24</b>
<b>3.4. Dutos multiproduto</b>	<b>26</b>
<b>3.5. Aspectos hidráulicos</b>	<b>28</b>
<b>3.6. Custos envolvidos no sistema</b>	<b>33</b>
<b>3.7. Sumário</b>	<b>35</b>
<b>4. MODELAGEM DO PROBLEMA DE DISTRIBUIÇÃO DUTOVIÁRIA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO</b>	<b>36</b>
<b>4.1. Introdução</b>	<b>36</b>
<b>4.2 Hipóteses dos modelos de scheduling</b>	<b>36</b>
<b>4.3. Notação</b>	<b>39</b>
<b>4.4. Fundamentos da Formulação Matemática</b>	<b>42</b>

<b>4.5. Formulação</b>	<b>44</b>
4.5.1. Restrições da refinaria	46
4.5.2. Restrições do duto	47
<b>4.6. Sumário</b>	<b>54</b>
<b>CAPÍTULO 5. DESENVOLVIMENTO DE RESTRIÇÕES ESPECIAIS E DOS CORTES DE ENTREGA</b>	<b>55</b>
<b>5.1. Introdução</b>	<b>55</b>
<b>5.2. Restrições especiais</b>	<b>55</b>
<b>5.3. Cortes inteiros</b>	<b>60</b>
5.3.1. Cortes de entrega	61
5.3.2. Exemplos ilustrativos para os cortes de entrega	64
<b>5.4. Sumário</b>	<b>68</b>
<b>6. ESTUDOS DE CASOS PARA AS RESTRIÇÕES ESPECIAIS E PARA OS CORTES DE ENTREGA</b>	<b>69</b>
<b>6.1. Introdução</b>	<b>69</b>
<b>6.2. Efeito das demandas em scheduling de sistemas dutoviários</b>	<b>74</b>
6.2.1. Série E6.1 – demandas baixas	74
6.2.2. Série E6.2 – demandas médias	76
6.2.3. Série E6.3 – demandas altas	78
<b>6.3. Resultados para formulações alternativas dos cortes de entrega e das restrições especiais</b>	<b>83</b>
<b>6.4. Relaxações das restrições especiais e do atendimento das demandas</b>	<b>86</b>
6.4.1. Penalidade pelo não atendimento das demandas	86
6.4.2. Penalidade por paradas do duto com interfaces	88
6.4.3. Exemplo com não atendimento de demanda e com penalidade de parada do duto com interfaces	93
<b>6.5. Sumário</b>	<b>101</b>
<b>7. FORMULAÇÃO PARA O SCHEDULING DE OPERAÇÕES DUTOVIÁRIAS EM TEMPO CONTÍNUO COM RESTRIÇÕES DE RENDIMENTO PARA AS ESTAÇÕES DE BOMBEAMENTO</b>	<b>103</b>
<b>7.1. Introdução</b>	<b>103</b>
<b>7.2. Hipóteses da formulação com representação em tempo contínuo</b>	<b>103</b>
<b>7.3. Notação da formulação com representação em tempo contínuo</b>	<b>104</b>
<b>7.4. Fundamentos da formulação proposta</b>	<b>108</b>
<b>7.5. Formulação matemática</b>	<b>109</b>
7.5.1. Função objetivo	109

7.5.2. Restrições temporais	109
7.5.3. Restrições da refinaria	111
7.5.4. Restrições do duto e das bases de distribuição	112
7.5.5. Considerações hidráulicas e taxa de rendimento das estações de bombeamento	118
<b>7.6. Sumário</b>	<b>123</b>
<b>8. EXEMPLOS E RESULTADOS PARA A FORMULAÇÃO EM TEMPO CONTÍNUO COM RESTRIÇÕES DE RENDIMENTO PARA AS ESTAÇÕES DE BOMBEAMENTO</b>	<b>124</b>
<b>8.1. Introdução</b>	<b>124</b>
<b>8.2. Série E8.1 – Representação contínua versus discreta</b>	<b>126</b>
<b>8.3. Série E8.2 – Variação do número de intervalos de tempo e do tempo mínimo de parada do duto na formulação em tempo contínuo</b>	<b>130</b>
<b>8.4. Série E8.3 – Configurações distintas para as estações de bombeamento</b>	<b>132</b>
<b>8.5. Sumário</b>	<b>138</b>
<b>9. FORMULAÇÕES DE SCHEDULING DE SISTEMAS DUTOVIÁRIOS COM CONSIDERAÇÕES HIDRÁULICAS</b>	<b>140</b>
<b>9.1. Introdução</b>	<b>140</b>
<b>9.2. Descrição do problema</b>	<b>141</b>
<b>9.3. Hipóteses da formulação com os aspectos hidráulicos</b>	<b>141</b>
<b>9.4. Nomenclatura das formulações com aspectos hidráulicos</b>	<b>143</b>
<b>9.5. Formulações com aspectos hidráulicos</b>	<b>146</b>
9.5.1. Formulação MINLP	146
9.5.1.1. Função objetivo	146
9.5.1.2. Restrições temporais e da refinaria	147
9.5.1.3. Restrições de scheduling do duto	147
9.5.1.4. Restrições da base de distribuição	150
9.5.1.5. Restrições hidráulicas do duto	150
9.5.2. Formulação MILP	157
9.5.2.1. Função objetivo	157
9.5.2.2. Restrições de scheduling do duto	158
9.5.2.3. Restrições hidráulicas do duto	159
9.5.2.4. Corte de potência	165
<b>9.6. Sumário</b>	<b>166</b>
<b>10. ANÁLISE DAS FORMULAÇÕES DE SCHEDULING DE SISTEMAS DUTOVIÁRIOS COM CONSIDERAÇÕES HIDRÁULICAS</b>	<b>169</b>
<b>10.1. Introdução</b>	<b>169</b>

<b>10.2. Séries E10.1 e E10.2 – comparação entre a formulação MINLP e a MILP</b>	<b>170</b>
<b>10.3. Séries E10.3 e E10.4 – variação do perfil topográfico do sistema dutoviário</b>	<b>183</b>
10.3.1. Série E10.3 – influência da variação do perfil topográfico do sistema dutoviário na sua vazão operacional, no rendimento das suas estações de bombeamento e no seu tempo de ociosidade	184
10.3.2. Série E10.4 – influência da variação do perfil topográfico do sistema dutoviário no seqüenciamento dos produtos	192
10.3.3. Análise das soluções obtidas pelos exemplos da série E10.4	198
<b>10.4. Análise das restrições hidráulicas no scheduling dutoviário</b>	<b>199</b>
<b>10.5. Sumário</b>	<b>204</b>
<b>11. CONCLUSÕES</b>	<b>205</b>
<b>11.1. Comentários gerais</b>	<b>205</b>
<b>11.2. Sumário da Tese</b>	<b>205</b>
11.2.1. Introdução	205
11.2.2. O Problema de distribuição dutoviária de derivados de petróleo	206
11.2.3. Modelagem do problema de distribuição dutoviária de derivados de petróleo	208
11.2.4. Resultados e discussões dos modelos propostos	209
<b>11.3. Contribuições do trabalho</b>	<b>212</b>
<b>11.4. Propostas de continuação do trabalho</b>	<b>214</b>
<b>12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>216</b>
<b>APÊNDICE I - TRABALHOS PUBLICADOS EM CONGRESSOS E EM PERIÓDICOS</b>	<b>221</b>

## LISTA DE FIGURAS

ITEM	TÍTULO	PÁGINA
Figura 2.1	Cadeia de suprimentos de petróleo genérica	6
Figura 3.1	Fluxograma de decisões em uma operação convencional	22
Figura 3.2	Fluxograma operacional do sistema de distribuição	23
Figura 3.3	Duto de segmento único e perfil de gradiente hidráulico típico	29
Figura 3.4	Diagrama detalhado de uma estação de bombeamento	31
Figura 3.5	Operação de transporte e seus principais aspectos hidráulicos	33
Figura 4.1	Ilustração de lotes de produtos em um determinado segmento $d$ do duto	43
Figura 4.2	Sistema dutoviário de segmentos compostos por lotes de diferentes capacidades	44
Figura 4.3	Representação do tempo e perfil de produção da refinaria	47
Figura 5.1	Operação do segmento do duto segundo hipótese H16	57
Figura 5.2	Exemplos E5	65
Figura 6.1	Perfil de produção fornecido pela refinaria	71
Figura 6.2	Níveis de estoques obtidos para os exemplos E6.3.2M2 e E6.3.2M3	80
Figura 6.3	Operação dos segmentos do duto para os exemplos E6.3.2.M2 e E6.3.2M3	81
Figura 6.4	Níveis de estoque para o exemplo E6.3.2M7	96
Figura 6.5	Níveis de estoque para o exemplo E6.3.2M8	101
Figura 7.1	Representação contínua do tempo e programa de produção da refinaria	110
Figura 7.2	Taxas de rendimento	120
Figura 7.3	Faixas de qualidade operacional de bombas	121
Figura 8.1	Programação de produção e horizonte de tempo para os exemplos E8.1 e E8.2	127
Figura 8.2	Taxa de rendimentos para os exemplos E8.1D	128
Figura 8.3	Perfil de produção adotado pela refinaria para os exemplos E8.3	133
Figura 8.4	Curvas de rendimento das configurações dos exemplos E8.3	134
Figura 8.5	Taxas de rendimento e de vazão para os exemplos E8.3	136
Figura 8.6	Resultados operacionais dos segmentos do duto para o exemplo E8.3C2	137



ITEM	TÍTULO	PÁGINA
Figura 8.7	Níveis de estocagem para as bases de distribuição para os exemplos E8.3C2	138
Figura 9.1	Variáveis referentes ao perfil do gradiente hidráulico de um sistema dutoviário e conjuntos de posicionamento dos lotes em relação às estações de bombeamento	151
Figura 10.1	Esquema do duto e das estações de bombeamento	169
Figura 10.2	Perfil de produção e número de intervalos de tempo para os exemplos da série E10.1	170
Figura 10.3	Perfil de produção e número de intervalos de tempo para os exemplos da série E10.2	171
Figura 10.4	Curva de rendimento referente aos estágios das estações de bombeamento adotada para os exemplos das séries E10.1 e E10.2	173
Figura 10.5	Seqüenciamento dos produtos dentro do duto para o exemplo E10.1C	175
Figura 10.6	Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento para o exemplo E10.1C	176
Figura 10.7	Seqüenciamento dos produtos dentro do duto para o exemplo E10.1D	177
Figura 10.8	Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento para o exemplo E10.1D	178
Figura 10.9	Seqüenciamento dos produtos dentro do duto para o exemplo E10.2C	180
Figura 10.10	Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento para o exemplo E10.2C	180
Figura 10.11	Seqüenciamento dos produtos dentro do duto para o exemplo E10.2D	181
Figura 10.12	Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento para o exemplo E10.2D	182
Figura 10.13	Perfil de produção e número de intervalos de tempo para os exemplos da série E10.3	185
Figura 10.14	Seqüenciamento dos produtos dentro do duto para o exemplo E10.3.1	187
Figura 10.15	Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento para o exemplo E10.3.1	187
Figura 10.16	Seqüenciamento dos produtos dentro do duto para o exemplo E10.3.2	189
Figura 10.17	Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento	189

ITEM	TÍTULO	PÁGINA
	para o exemplo E10.3.2	
Figura 10.18	Seqüenciamento dos produtos dentro do duto para o exemplo E10.3.3	191
Figura 10.19	Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento para o exemplo E10.3.3	191
Figura 10.20	Seqüenciamento dos produtos dentro do duto para o exemplo E10.4.1	194
Figura 10.21	Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento para o exemplo E10.4.1	195
Figura 10.22	Seqüenciamento dos produtos dentro do duto para o exemplo E10.4.2	196
Figura 10.23	Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento para o exemplo E10.4.2	197
Figura 10.24	Procedimento de comparação entre as formulações desenvolvidas no capítulo 7 e no capítulo 9	201

## LISTA DE TABELAS

ITEM	TÍTULO	PÁGINA
Tabela 2.1	Principais contribuições relacionadas as operações dutoviárias	14
Tabela 3.1	Descrição das capacidades de estocagem por produto na REPLAN	24
Tabela 3.2	Descrição das capacidades de estocagem por produto nas bases	25
Tabela 3.3	Características dos trechos do duto OSBRA	26
Tabela 3.4	Seqüenciamento de produtos dentro do duto	27
Tabela 3.5	Propriedades físico-químicas dos produtos	32
Tabela 3.6	Custos de bombeamento dos produtos para cada base de distribuição	34
Tabela 6.1	Capacidades reais e discretizadas dos segmentos e dos lotes do duto OSBRA	71
Tabela 6.2	Dados comuns para os exemplos do capítulo 6	72
Tabela 6.3	Condições iniciais de estocagem e seus limites na refinaria	72
Tabela 6.4	Condições iniciais de estocagem e seus limites nos depósitos	73
Tabela 6.5	Demandas para a série E6.1	74
Tabela 6.6	Resultados para a série E6.1	75
Tabela 6.7	Demandas para a série E6.2	76
Tabela 6.8	Resultados para a série E6.2	77
Tabela 6.9	Demandas para os exemplos propostos para a série E6.3	78
Tabela 6.10	Resultados computacionais para a série E6.3	79
Tabela 6.11	Resultados para a formulação original e o modelo M4	83
Tabela 6.12	Resultados comparativos para as formulações M5 e M6	85
Tabela 6.13	Custos de parada do duto com diferentes interfaces e penalidades pelo não atendimento em relação às demandas	94
Tabela 6.14	Resultados computacionais para o exemplo E6.3.2M7	94
Tabela 6.15	Resultados computacionais para o exemplo E6.3.2M8	98
Tabela 6.16	Alimentação dos mercados consumidores e diferenças em relação às demandas	99
Tabela 8.1	Parâmetros comuns dos exemplos para a formulação em tempo contínuo	125
Tabela 8.2	Demandas (E8.1, E8.2 e E8.3) e custos de bombeamento (E8.1 e E8.2)	126
Tabela 8.3	Resultados computacionais para os exemplos E8.1	129

ITEM	TÍTULO	PÁGINA
Tabela 8.4	Número de intervalos de tempo e resultados computacionais dos exemplos E8.2C	130
Tabela 8.5	Variação do parâmetro $\Delta_{STOP}^{LO}$ para os exemplos E8.2C	131
Tabela 8.6	Resultados computacionais para os exemplos E8.3	135
Tabela 9.1	Restrições das formulações desenvolvidas no capítulo 7 e no capítulo 9	168
Tabela 10.1	Dados para os exemplos das séries E10.1 e E10.2	171
Tabela 10.2	Parâmetros referentes às restrições hidráulicas	172
Tabela 10.3	Resultados computacionais para os exemplos E10.1 e E10.2	174
Tabela 10.4	Cotas dos lotes do sistema dutoviário e parâmetros para a série E10.3	185
Tabela 10.5	Resultados computacionais para os exemplos E10.3	186
Tabela 10.6	Parâmetros para os exemplos da série E10.4	193
Tabela 10.7	Resultados computacionais para os exemplos E10.4	193
Tabela 10.8	Resultados comparativos para os exemplos E10.4.1 e E10.4.3	198
Tabela 10.9	Resultados comparativos para os exemplos E10.4.2 e E10.4.4	199
Tabela 10.10	Custos de Bombeamento para o exemplo E10.4.1SC	202
Tabela 10.11	Resultados computacionais para os exemplos E10.4 – caso subótimo	202
Tabela 10.12	Valores para os limites de potência dos estágios das estações de bombeamento para o exemplo E10.4.1 – caso inviável	203
Tabela 10.13	Resultados computacionais para os exemplos E10.4 – caso inviável	203

## Resumo

Sistemas de dutos correspondem atualmente ao modo mais eficaz para o transporte de grandes quantidades de fluidos líquidos e gasosos por longas distâncias. Dutos são utilizados pela Indústria Petrolífera para o transporte de petróleo e de seus produtos derivados.

O presente trabalho aborda o *scheduling* de distribuição dutoviária de um sistema que opera com um duto que transporta produtos de uma refinaria para depósitos com localizações geográficas distintas através de modelos de programação matemática. O sistema é composto pela Refinaria do Planalto (REPLAN) da Petrobras localizada em Paulínia (SP). A ela é conectado um duto (OSBRA) que se estende por cerca de 1000 quilômetros.

O maior detalhamento do modelo matemático para operações dutoviárias desenvolvido por Rejowski Jr. (Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 2001) se torna primordial nessa complexa operação logística. Um fator de extrema importância é a contaminação dos produtos dentro da linha dutoviária. Desta forma, são desenvolvidas restrições especiais que impõem paradas aos segmentos do duto somente quando os mesmos não possuem interfaces. Estas restrições fazem com que a formulação proposta encontre a solução ótima do problema proposto. O aprimoramento destas formulações se torna fundamental, pois os modelos gerados possuem um número elevado de decisões a serem otimizadas. Relações lógicas envolvendo o estoque inicial nos depósitos e na linha dutoviária e a demanda de cada um dos produtos são propostas. Estas relações melhoram o desempenho computacional para os modelos propostos em cenários de demandas altas. Posteriormente, as restrições especiais de contaminação dos produtos e as relativas ao atendimento das demandas nas bases de distribuição são relaxadas e transformadas em penalidades na função objetivo. Estas penalidades aumentam o esforço de resolução dos modelos e ao mesmo tempo possuem grande influência nos resultados operacionais do sistema.

Outro fator de extrema importância para o *scheduling* de operações dutoviárias é a sua representação em tempo contínuo. Adicionalmente, esta representação faz com que a incorporação de restrições hidráulicas de maneira simplificada seja possibilitada. Desta forma, uma estratégia simplificada e eficaz para se determinar a vazão do duto, envolve incluir a curva de rendimento das estações de bombeamento. Esta formulação, que é modelada como um MINLP (*Mixed Integer Non Linear Programming*), é comparada com uma formulação MILP (*Mixed Integer Linear Programming*) em tempo discreto com vazões e rendimentos fixos proposta por Rejowski Jr. e Pinto (*Computers and Chemical Engineering*, 2004, v.28/8 p.1511-1528). Foi mostrado que a presente formulação forneceu soluções de melhor qualidade. A formulação MILP em tempo discreto é caracterizada como um caso particular da presente formulação proposta. A formulação MINLP sofre forte influência do número de intervalos de tempo que a compõem e este fator deve sempre ser considerado para que a melhor solução possa ser encontrada em tempo computacional factível. Esta formulação ainda é aplicada com sucesso a um caso sob diversas configurações de bombeamento com diferentes custos unitários e curvas de rendimento.

Duas formulações que consideram a programação de operações de dutos com a incorporação dos aspectos hidráulicos calculados de maneira rigorosa são apresentadas. A primeira delas resulta em um modelo MINLP e considera variações na duração dos intervalos de tempo e na vazão operacional do sistema. Uma segunda formulação apresentada como um modelo MILP é desenvolvida. Resultados computacionais para ambos os modelos são apresentados, assim como as suas soluções geradas são discutidas. O impacto de variações no relevo do sistema dutoviário é analisado. Foram detectadas alterações na vazão de operação do sistema dutoviário, na escolha dos intervalos de tempo em que o sistema é ativado, no rendimento das estações de bombeamento e no tempo total de operação do sistema. Posteriormente, em um outro exemplo, é mostrado que variações no relevo também podem alterar a seqüência dos produtos alimentados pela refinaria ao duto. Finalmente, as formulações têm os seus resultados comparados aos de modelos com considerações hidráulicas simplificadas, cujos resultados podem levar a soluções subótimas e até mesmo inviáveis.

## **Abstract**

Pipeline systems correspond nowadays to the most efficient mode for the transportation of large amounts of liquid and vapor products for long distances. Pipelines are utilized by the Petroleum Industry to transport petroleum and its product derivatives.

The present work addresses the scheduling of pipeline distribution of a system that operates with a pipeline that transports products from a refinery to depots at different geographical locations by mathematical programming models. The system is composed by the Planalto Refinery (REPLAN) from Petrobras. A pipeline (OSBRA) is connected to the refinery that extends for approximately 1000 kilometers.

A higher level of detail in the mathematical model for pipeline operations developed by Rejowski Jr. (MS Dissertation, EPUSP São Paulo, 2001) becomes essential in this complex logistic operation. A factor of extreme importance is product contamination inside the pipeline. Therefore, special constraints are developed that impose the segments of the pipeline to operate continuously when they do not contain interfaces. These constraints help the proposed formulation to find the optimal solution of the problem. The improvement of logical formulations becomes paramount because the generated models encompass a large number of decisions to be optimized. Logical relations involving the initial inventory at the depots and at the pipeline, as well as the demands for each product are proposed. These relations improve the computational performance of the proposed models in scenarios of high-demand. Then, the special constraints and the demand satisfaction at the depots at the end of the operational horizon are relaxed and added as penalties in the objective function. These penalties increase the solution effort of the proposed models and at the same time have great influence on the operational results of the system.

Another factor of extreme importance for the pipeline operation scheduling is its continuous time representation. Additionally, this representation enables the models to incorporate simplified hydraulic constraints. Therefore, a simplified and efficient strategy to determine the pipeline flow rate is to include the yield curves of the pumping stations. This formulation, that is modeled as a MINLP (Mixed Integer Non Linear Programming), is compared to an MILP (Mixed Integer Linear Programming) with discrete time and fixed flow and yield rates proposed by Rejowski Jr. and Pinto (*Computers and Chemical Engineering*, 2004, v.28/8 p.1511-1528). It is shown that the present formulation provides better quality results. The MILP formulation with discrete time is characterized as a particular case of the proposed formulation. The MINLP is greatly influenced by the number of time intervals that compose it and this factor has always to be considered so that the best solution can be found with feasible computational effort. This formulation is also applied to a case with several pumping station configurations with different unit costs and yield curves.

Two formulations that consider the scheduling of pipeline operations with the incorporation of the hydraulic aspects calculated rigorously are presented. The first one results in a MINLP model and considers variations on the time interval durations and in the pipeline flow rate. A second MILP formulation is developed. Computational results for both models are shown as well as the generated solutions discussed. The impact of variations on the topographical profile of the pipeline system is analyzed in the obtained results by the models. Changes in the flow rate of the pipeline, in the decision of the time intervals that the system is activated, in the pumping station yields and in the time interval durations were detected. Then, in another example it is shown that the changes in the topographical profile can alter the sequence of products sent by the refinery to the pipeline. Finally, both formulations have their results compared to models with simplified hydraulic considerations, whose results can lead to suboptimal and even to infeasible solutions.

## **1. Introdução**

### *1.1. Motivação*

Os dutos compõem atualmente o modo mais eficaz para o transporte de grandes quantidades de fluidos líquidos e gasosos por longas distâncias. Eles são utilizados quase que na sua totalidade pela Indústria Petrolífera para o transporte de petróleo e de seus produtos derivados.

O problema de transferência de produtos por dutos se dá quando um ou mais pontos com localizações geográficas distintas se interconectam por uma malha dutoviária. Alguns destes pontos requerem diversos produtos (pontos de consumo) e outros pontos dispõem destes (pontos de origem). No caso, as refinarias necessitam de petróleo para satisfazer as demandas de produção. Os depósitos de estocagem de produtos derivados de petróleo atendem aos mercados consumidores que se localizam longe das refinarias, enquanto estas se encarregam dos mercados que se situam próximos a elas.

Diversos são os fatores que impulsionam o crescimento da utilização dos dutos. Primeiramente, estes apresentam custos operacionais inferiores aos dos outros meios de transporte como o ferroviário, o rodoviário e o marítimo<sup>1</sup>. A necessidade da instalação do transporte dutoviário se dá quando as demandas de um determinado mercado consumidor por produtos sejam estáveis por um longo período (de no mínimo 20 anos) e possuam valores elevados, de modo que os outros meios não possam atendê-las de uma maneira economicamente viável. Outra possibilidade para a instalação de dutos se dá quando as refinarias de petróleo se situam distantes da costa marítima, por onde grandes quantidades de petróleo são disponibilizadas.

As crescentes demandas por produtos derivados de petróleo também podem ser consideradas como um outro fator para a maior utilização e a ampliação das instalações dutoviárias já existentes, pois estas transferem maiores quantidades dos produtos desejados aos mercados consumidores e também suprem as refinarias de petróleo com maiores quantidades de óleo cru.

Os dutos podem ser considerados como um sistema de operação versátil e complexa, pois são configurados para o transporte de diversos produtos. Tanto os dutos de produtos derivados de petróleo como os de óleo cru possuem essa característica, embora as suas

---

<sup>1</sup> Cheng e Duran (2003) afirmam que o transporte marítimo ainda é bastante empregado pelas companhias petrolíferas, pois se mostra como uma modalidade flexível por apresentar a possibilidade de alterações das rotas quando estas já foram iniciadas. O transporte rodoviário também possui essa característica, embora demonstre uma capacidade de transporte inferior a do marítimo.

operações possam ser consideradas distintas. Essa versatilidade dos meios dutoviários faz com que custos de contaminação entre dois produtos distintos dentro de uma linha dutoviária sejam inevitáveis. Porém, isto se faz necessário devido aos altos custos de investimento dos dutos. Eles ainda podem ser operados de diversos modos, com diferentes valores de vazões sob diferentes configurações de bombeamento e ainda alimentar diversos pontos de destino e ainda simultaneamente receber produtos de várias unidades produtoras ou intermediárias de estocagem. O desempenho de cada configuração depende de diversos fatores que caracterizam uma operação dutoviária, como as demandas pelos produtos nos destinos finais do duto e o seu preenchimento inicial. Finalmente, os custos de estocagem nas diversas unidades produtoras, de estocagem intermediária e de estocagem final que se conectam ao duto devem ser levados em conta.

A importância da programação de atividades eficientes para operações dutoviárias se deve a vários fatores. Primeiramente, devido à crescente competição no mercado petrolífero brasileiro, com a abertura do seu mercado através da Lei N° 9478 de Agosto de 1997.

O desempenho das empresas deste meio está diretamente relacionado à qualidade das suas operações ligadas à Programação e ao Planejamento de Produção e de Distribuição. Estas atividades têm sido consideradas fundamentais para o bom desempenho de sistemas produtivos nos últimos 20 anos. Atualmente as empresas estão cada vez mais voltadas ao atendimento dos requerimentos dos seus clientes, seja pelas quantidades e especificações dos produtos desejados ou pelos prazos em que estas devam ser entregues. Cabe ressaltar que um erro operacional em uma operação dutoviária pode gerar atrasos de dias ou até de semanas (Rejowski Jr. e Pinto, 2003). Outro fator é composto pelos grandes volumes de produtos que são transportados pelos dutos e os seus altos requerimentos energéticos. A título de exemplo, estima-se que no Brasil foram investidos na Indústria Petrolífera cerca de 40 bilhões de dólares no período de 2000 a 2005 (Coutinho et al., 2000).

Desta forma, fica evidente a necessidade de que abordagens sistemáticas de modelagem matemática e de otimização sejam aplicadas a estes problemas, de forma que soluções de boa qualidade sejam encontradas. Segundo Kallrath (2000), os usuários destas técnicas são beneficiados de três maneiras distintas. A primeira delas consiste no fato de que com uma modelagem matemática concisa, o problema prático é devidamente compreendido pelos usuários. A segunda maneira decorre do fato que quando bem implementados, os modelos geram resultados que representam ferramentas essenciais para tomadas de decisões operacionais, de forma rápida e eficaz quando comparados a outros sistemas de apoio a tomadas de decisões. Kallrath (2000) ainda cita que a disponibilidade de um modelo



matemático para um determinado sistema faz com que testes para diversos cenários sejam disponibilizados, com a consideração de diferentes valores para os parâmetros.

Finalmente, o fato de o planejamento e a programação de operações dutoviárias em cadeias de suprimento e cadeias logísticas estarem sendo intensamente pesquisados nos últimos anos faz com que mais trabalhos relacionados a operações sejam gerados em um futuro próximo. Diversos trabalhos com diferentes abordagens e estratégias de modelagem e de resolução distintas têm sido gerados. Espera-se assim que este trabalho possa contribuir para o desenvolvimento deste recente assunto de alta relevância para a Indústria e para o Meio Acadêmico.

### *1.2. Objetivos e estrutura*

O presente trabalho trata de reproduzir através de modelos de programação matemática o *scheduling*<sup>2</sup> de distribuição dutoviária de uma companhia petrolífera que opera com um duto multiproduto que deve transportar diversos derivados de petróleo de uma refinaria para vários depósitos com localizações geográficas distintas. Neste trabalho, busca-se o maior detalhamento e o aprimoramento da formulação matemática inicialmente proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003) para esta classe de problemas.

O caso considerado no presente trabalho é o de uma companhia petrolífera que opera com uma refinaria e depósitos em locais geograficamente distintos. Uma variedade de produtos é gerada nesta planta e deve atender as demandas em diversos centros consumidores através destes depósitos, que por sua vez são abastecidos pela refinaria. O elemento de distribuição surge tanto da transferência de produtos e/ou intermediários da planta quanto da transferência de produtos para armazéns regionais que devem satisfazer as demandas.

O sistema dutoviário em estudo é composto pela Refinaria de Paulínia (REPLAN) da Petrobras localizada em Paulínia. A ela é conectado um duto que se estende por diversas cidades, dentre elas Ribeirão Preto (SP), Uberaba (MG), Uberlândia (MG), Goiânia (GO) e Brasília (DF). Este duto, que possui aproximadamente 955 quilômetros de extensão é denominado de OSBRA (Oleoduto São Paulo - Brasília). Por ele são distribuídos diversos produtos gerados pela REPLAN, sendo transportados gasolina, óleo diesel, e gás liquefeito de

---

<sup>2</sup> A palavra *scheduling* pode ser traduzida como programação ou planejamento de atividades para um sistema operacional. Quando traduzido para o português, o termo programação de atividades tipicamente é restrito a horizontes de tempo de no máximo um mês, onde as atividades operacionais são consideradas com um nível de detalhamento médio ou alto. Já o termo planejamento é aplicado às tarefas e sistemas com um menor nível de detalhamento, podendo ser utilizada para períodos de meses, ou até anos. Por se tratar de um termo bastante empregado em língua inglesa tanto pela academia como pela indústria, justifica-se o uso da palavra *scheduling* neste trabalho.

petróleo (GLP). Este último é transportado em estado líquido, através da pressurização do duto. O detalhamento do sistema é apresentado no capítulo 3.

O maior detalhamento do modelo matemático para operações dutoviárias já desenvolvido por Rejowski Jr. e Pinto (2003) se dá por questões cruciais nessa complexa operação industrial. Um fator de extrema importância nesse tipo de operações é a contaminação dos produtos dentro da linha dutoviária. No caso particular em estudo, esse fator torna-se crítico, uma vez que o sistema dutoviário em questão é operado em modo intermitente.

Outro fator de extrema importância para o *scheduling* de operações dutoviárias é a incorporação de considerações hidráulicas na formulação dos modelos. O intenso consumo de energia pelas estações de bombeamento que compõem o duto faz com que estes cálculos sejam determinantes para o *scheduling* de uma operação dutoviária.

O aprimoramento das formulações matemáticas também se torna fundamental, pois os modelos gerados são de grande porte e possuem ao mesmo tempo um número elevado de decisões a serem otimizadas. Este número de decisões se torna ainda mais crítico para casos de demandas elevadas pelos produtos nos depósitos ligados ao duto. Relações lógicas de estoque inicial nos depósitos e na linha dutoviária com a demanda de cada um dos produtos podem facilitar a resolução computacional destes problemas.

O trabalho está estruturado da seguinte forma: no próximo capítulo, é realizada a Revisão de Literatura sobre os trabalhos de planejamento e *scheduling* de sistemas dutoviários, bem como de outros sistemas operacionais que influenciam as operações dutoviárias. No capítulo 3, o problema é descrito de uma forma mais detalhada através da ilustração das principais características do referido sistema operacional. No capítulo 4, uma formulação mista inteira linear generalizada, que é baseada na proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003) para o problema de *scheduling* de operações dutoviárias é proposta. O capítulo 5 trata da questão de contaminação dos produtos dentro do duto, onde restrições especiais são incluídas na formulação. Ainda no capítulo 5 é proposto um conjunto de inequações baseadas em lógica, com o objetivo de diminuir o tempo de resolução computacional dos modelos gerados para o presente problema. O capítulo 6 mostra diversos exemplos, onde o impacto das restrições especiais bem como do conjunto de inequações é estudado na formulação proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003). Ainda no capítulo 6, as restrições especiais de contaminação dos produtos e as relativas ao atendimento das demandas nas bases de distribuição são relaxadas. O capítulo 7 mostra uma formulação mista inteira não linear para o *scheduling* de operações dutoviárias que utiliza a representação contínua do tempo. Esta formulação considera os aspectos hidráulicos de maneira simplificada, através da inclusão das curvas de rendimentos

dos estágios das estações de bombeamento do duto. O capítulo 8 mostra diversos exemplos, onde esta nova formulação é comparada com a desenvolvida nos capítulos anteriores. O número de intervalos de tempo e configurações de bombeamento distintas são ainda estudados para o sistema dutoviário em questão. O capítulo 9 mostra duas formulações com considerações hidráulicas rigorosas aplicadas a um sistema dutoviário composto por uma refinaria, um duto e uma base de distribuição. No capítulo 10, estas formulações são comparadas em relação à qualidade de soluções obtidas e de tempo computacional. Ainda neste capítulo, a formulação de melhor desempenho é submetida a estudos de variações de relevo do sistema dutoviário. Finalmente, no capítulo 11 são mostradas as conclusões do presente trabalho bem como as propostas de estudo para a continuação do mesmo.

## 2. Revisão da literatura

A figura 2.1 descreve uma cadeia de suprimentos geral de petróleo. Grandes quantidades de diferentes tipos de petróleo e seus derivados são distribuídas entre diversas refinarias e depósitos. Os vários tipos de petróleo chegam às refinarias através de dutos que as conectam a campos de exploração de petróleo ou a terminais marítimos, onde o petróleo é descarregado de navios petroleiros. Após processarem o petróleo, as refinarias armazenam grandes quantidades dos produtos e posteriormente, estas são enviadas para os depósitos de estocagem intermediária ou final para o atendimento das demandas nos mercados consumidores. Note que as refinarias podem ser conectadas entre si, para atender às diferentes especificações das unidades de destilação de cada refinaria. Os depósitos, dependendo de suas localizações, também podem ser conectados entre si para facilitar e agilizar o atendimento das demandas dos produtos. Desta forma, em uma cadeia de suprimentos de petróleo e seus derivados cujo principal meio de transporte se dá através de dutos, o fluxo dos produtos e das matérias-primas ocorre através dos bombeamentos entre as diversas refinarias e depósitos, de forma que as suas demandas sejam devidamente atendidas.

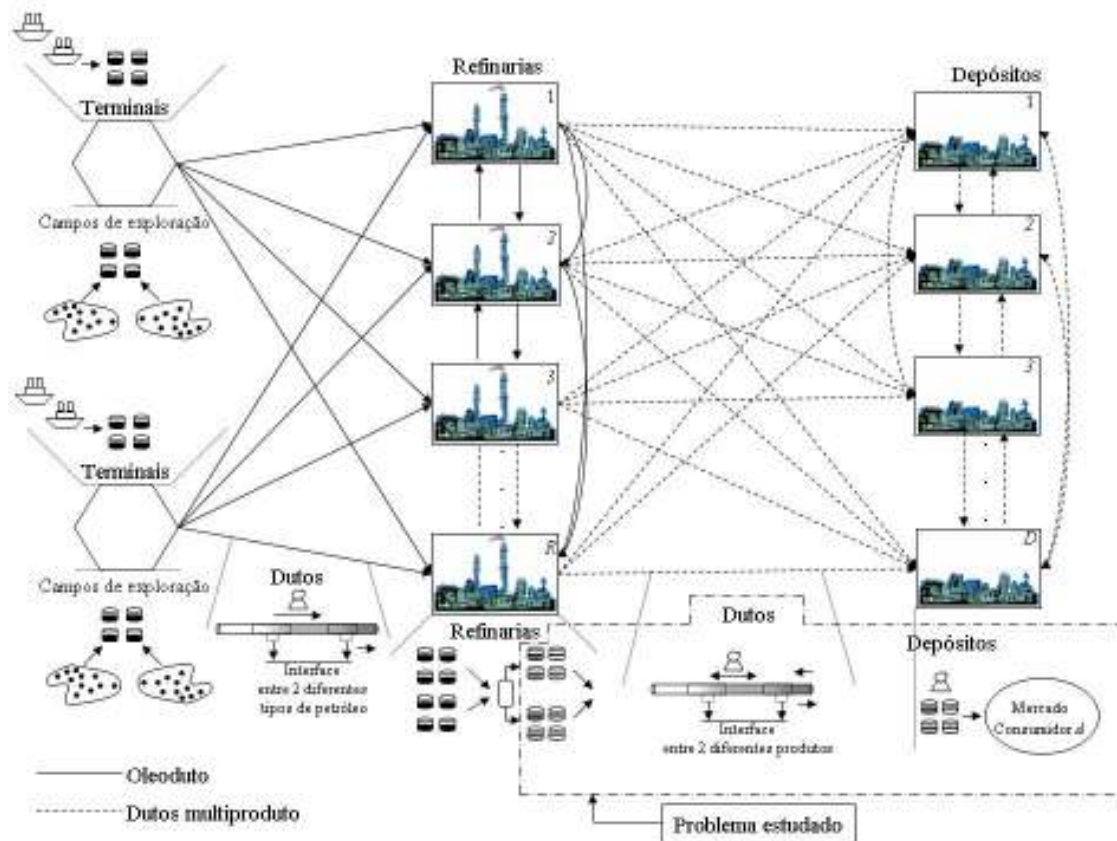


Figura 2.1 – Cadeia de suprimentos de petróleo genérica

As companhias petrolíferas desejam atualmente maximizar a utilização de seus dutos devido aos seus baixos custos operacionais. No entanto, as grandes quantidades de energia que são consumidas pelas estações de bombeamento, assim como os custos de interface caracterizam as operações dutoviárias como uma das mais complexas do ramo petrolífero. Dutos e oleodutos podem ser considerados como sistemas de transporte multiproduto, pois ambos comumente movimentam diversos produtos<sup>3</sup>. No entanto, os oleodutos normalmente operam em um sentido único e os seus destinos finais se caracterizam como uma ou mais refinarias, enquanto os dutos podem operar em ambos os sentidos e podem conectar refinarias, depósitos e mercados consumidores. Outra diferença marcante entre ambos os sistemas são os níveis de pressão a que estes são submetidos nas suas operações, devido às diferenças marcantes das propriedades físico-químicas entre os diversos tipos de petróleo e os seus derivados.

Os principais objetivos dos problemas de planejamento estratégico e de projetos de cadeias de suprimentos, segundo McDonald e Reklaitis (2004), são dados a seguir:

- encontrar a melhor localização das instalações<sup>4</sup> a partir de um conjunto de locais candidatos a receber cada um dos referidos sistemas operacionais integrantes da rede;
- determinar a operação e o projeto ótimos do sistema de distribuição;
- definir o planejamento de operações e o *scheduling* nas instalações da cadeia de suprimentos, e;
- estabelecer a capacidade de produção das instalações da cadeia de suprimentos.

Dentre as diversas e complexas decisões econômicas envolvendo as localizações das refinarias e depósitos, a principal relacionada aos dutos é se eles devem ou não conectar dois ou mais sistemas operacionais da rede, em virtude de seus altos custos de investimento. O impacto ambiental da construção de todos os elementos da rede dutoviária nos possíveis locais de construção também se caracteriza como um elemento determinante nesta decisão de investimentos, devido às multas pelo desrespeito das leis e normas ambientais. O não cumprimento destas leis também implica enormes investimentos relacionados ao rearranjo da

---

<sup>3</sup> Para os oleodutos, os diferentes tipos de petróleo podem ser considerados diferentes produtos devido às suas diferentes propriedades físico-químicas.

<sup>4</sup> No caso de cadeias de suprimento de petróleo e seus derivados, as instalações são as refinarias, os depósitos, os dutos que as conectam e as suas estações de bombeamento e de estocagem intermediária.

localização dos elementos da rede dutoviária. A decisão da implementação de uma rede de dutos também é crucial para a conexão de poços de exploração de petróleo, terminais marítimos de recebimento de navios petroleiros, as suas unidades de tratamento e também as refinarias e as estações de bombeamento e de estocagem intermediária.

Outra decisão relacionada aos dutos, que é de extrema importância econômica, é a escolha da localização das suas estações de bombeamento, pois os dutos comumente consomem enormes quantidades de energia. Dessa forma, a localização e a correta operação das estações de bombeamento de um duto contribuem para um menor consumo de energia e conseqüentemente, um melhor desempenho econômico do sistema.

Segundo McDonald e Reklaitis (2004), o principal objetivo do problema de operação e projeto de cadeias de suprimento é o de integrar a produção e a distribuição das suas instalações. No caso de uma cadeia de suprimentos de petróleo, as capacidades de produção das refinarias devem ser integradas às capacidades de distribuição dos dutos e de seus outros meios de transporte disponíveis.

Os autores afirmam que o planejamento de operações e o *scheduling* nas instalações da cadeia inicialmente tratavam de linhas individuais dos sistemas produtivos, assim como de alguns equipamentos e com o passar do tempo os trabalhos começaram a ser expandidos para múltiplas linhas de produção e depois para múltiplas unidades de produção.

Finalmente, com relação à capacidade de produção das instalações de uma cadeia de suprimentos, McDonald e Reklaitis (2004) afirmam que as principais decisões consistem da ampliação ou redução das suas capacidades de produção e quando elas devem ocorrer. Esse problema ainda pode ser detalhado para equipamentos e linhas de produção para cada unidade produtora. A utilização de um novo processo para a fabricação dos produtos pode ser também considerada como uma decisão a ser tomada nestes problemas.

Aplicações de *scheduling* dutoviário consideram períodos menores (de dias a algumas semanas) quando comparados a problemas de planejamento. Problemas de *scheduling* lidam com a utilização de recursos, como tanques, dutos e capacidades de produção das refinarias. Além disso, ordens específicas de clientes devem ser atendidas nestes tipos de problemas (Kelly e Mann, 2003). Um aspecto crucial nestes tipos de problema é a detecção de interfaces entre dois produtos distintos dentro da linha dutoviária. Outro fator importante é dado pelo seqüenciamento restrito dos produtos (Rejowski Jr. e Pinto, 2003). Existem pares de produtos que não podem formar interfaces dentro de uma linha dutoviária e uma operação dutoviária viável deve levar em conta esse aspecto operacional.

### 2.1. Operações em refinarias

O planejamento e o *scheduling* de operações das refinarias de petróleo estão intrinsecamente relacionados com as dos dutos. Um bom planejamento e/ou *scheduling* de atividades operacionais em refinarias requer que os dutos transportem as quantidades exatas dos tipos de petróleo mais compatíveis com as características operacionais das unidades de destilação dentro do prazo estipulado. Isto também envolve as operações de extração e exploração nos poços de petróleo e nos terminais de navios, quando as companhias petrolíferas desejam adquirir petróleo de fontes externas. Esta última opção é comumente utilizada, pois atualmente as companhias objetivam maximizar o processamento de petróleo em todas as suas refinarias. Estas por sua vez, devem controlar os seus estoques de petróleo e de seus diversos derivados da melhor forma possível para que esse objetivo seja alcançado e para que as demandas dos mercados consumidores sejam sempre atendidas. Desta forma, pode-se afirmar que as refinarias são as responsáveis pelos limites operacionais para o planejamento e o *scheduling* das atividades dos dutos, pois na maior parte dos casos estes suprem uma ou mais refinarias com vários tipos de petróleo, que ao serem processados geram diversos produtos acabados que devem ser transportados para os depósitos de estocagem intermediária e final.

Kelly e Mann (2003) afirmam que as implementações iniciais de sistemas de planejamento e de *scheduling* automatizados possibilitam um ganho superior a dois milhões de dólares anuais. Apesar do seu enorme potencial, as companhias petrolíferas ainda encaram essa implementação como um grande desafio. Segundo Moro (2003), a grande maioria destas ainda utilizam ferramentas comerciais baseadas em Programação Linear para o planejamento e o *scheduling* de suas atividades operacionais devido à falta de profissionais devidamente capacitados para utilizar ferramentas mais avançadas. Segundo o autor, algumas delas tentaram implementar modelos matemáticos mais refinados e realistas, baseados em Programação Não Linear, porém muitas delas retornaram para as antigas ferramentas comerciais. Mesmo diante destas limitações, modelos não lineares começam a ser mais comumente utilizados e desenvolvidos pela Indústria.

Ballintijn (1993) afirma que o propósito da aplicação de modelos de *scheduling* é o de encontrar um seqüenciamento diário das atividades que seja viável para um dado sistema operacional. O autor evidencia a importância de formulações MILP (*Mixed Integer Linear Programming* ou Programação Mista Inteira Linear) para o problema de tomada de decisões. Desta forma, as restrições do problema devem ser compostas por equações de balanços de massa, de estocagem, de capacidade de produção e de demandas por produtos. Segundo o

autor, os custos operacionais devem ser minimizados, como os de utilização de tanques e o de utilidades.

Jia e Ierapetritou (2004) propõem formulações baseadas em MILP para o *scheduling* de operações em refinarias. Os autores sugerem uma estratégia de decomposição em três partes para o referido sistema operacional. Este procedimento é adotado devido a grande dimensão que uma única formulação geraria se toda a refinaria fosse considerada. A primeira parte da estratégia é composta pelo sistema de tanques de recebimento e de mistura de petróleo que são responsáveis pela alimentação das unidades de destilação. Posteriormente, a unidade de produção dos derivados é considerada, com as unidades de transformação e de fracionamento. No presente caso, os autores utilizaram como exemplo uma unidade de óleos lubrificantes. Finalmente, a terceira parte consiste da mistura e da distribuição final dos produtos acabados. Os autores mostram um exemplo para a operação de mistura de gasolina, justificando a elevada importância deste derivado para uma refinaria.

Katzer et al. (2000) afirmam a importância de técnicas baseadas em MINLP (*Mixed Integer Non Linear Programming* ou Programação Mista Inteira Não Linear) para o planejamento de operações em refinarias. As não linearidades decorrem do comportamento não linear dos processos, ao passo que o destino das correntes dos processos e a decisão da utilização dos recursos presentes (tanques e equipamentos de processos para separação e purificação dos produtos) representam as variáveis binárias do problema. Pinto et al. (2000) estudam vários problemas sobre o planejamento e o *scheduling* em refinarias de petróleo. Os autores desenvolveram um modelo baseado em MINLP para o planejamento de atividades operacionais, onde diversos exemplos de aplicações reais são mostrados. Os resultados do modelo proposto estimaram um ganho da ordem de milhões de dólares no lucro anual quando aplicados a uma unidade de produção de óleo diesel. Os autores ainda citam que aplicações de *scheduling* em refinarias lidam normalmente com a operação de tanques e problemas de misturas das diversas correntes de um dado processo de produção para atender as especificações dos produtos ou para adequar uma dada mistura a uma unidade de produção. Exemplos sobre a produção de óleos combustíveis e produção de GLP são mostrados no trabalho.

Lee et al. (1996) desenvolvem um modelo baseado em MILP para o gerenciamento e o *scheduling* de um sistema composto um conjunto de tanques, diversas unidades de destilação e um terminal marítimo. O sistema de tanques é composto por dois estágios de estocagem com a finalidade de compatibilizar a mistura de diferentes tipos de petróleo de acordo com as características operacionais de cada unidade de destilação. Kelly e Mann (2003) afirmam que



técnicas de programação matemática podem gerar ganhos substanciais para este problema quando bem aplicadas a uma refinaria. O problema é definido por um conjunto de navios, cada um com uma carga de petróleo com uma determinada quantidade e especificações conhecidas *a priori* e que devem efetuar o descarregamento para o primeiro estágio dos tanques (tanques de recebimento). Simultaneamente, o segundo estágio (tanques de mistura) deve alimentar ininterruptamente as unidades de destilação. Diversos detalhes operacionais como a proibição de operações simultâneas de carregamento e descarregamento nos tanques de mistura, a consideração dos custos de interface e limites de estocagem em todos os tanques ainda são considerados. O modelo resultante possui termos bilineares na corrente de descarregamento dos tanques de mistura para as unidades de destilação, compostos pelas vazões totais mássicas e pela fração dos componentes-chave para o equacionamento da concentração dos mesmos. Tais termos são eliminados através de uma inequação que impõe limites inferiores e superiores para o fluxo mássico de cada componente presente nesta corrente e desta forma, a concentração não necessita ser explicitamente declarada na presente formulação. Cabe ressaltar que caso este procedimento de linearização não fosse adotado, o modelo gerado seria não linear e não convexo e portanto, poderia comprometer a qualidade e a viabilidade da solução obtida.

Wenkai et al. (2004) tratam de um problema similar. Porém, os autores citam que a formulação proposta por Lee et al. (1996), apesar de eficiente, apresenta uma discordância nos valores das concentrações dos componentes-chave das vazões nos tanques de mistura e o seu valor na sua corrente de saída, que alimenta as unidades de destilação de petróleo. Para evitar a formulação mista inteira não linear e não convexa, os autores propuseram um esquema iterativo composto por dois problemas misto inteiros lineares e um problema não linear. Os autores propõem uma redução do número de variáveis binárias da formulação matemática do referido problema a partir da desagregação de variáveis binárias.

Moro e Pinto (2004) estudam o problema de *scheduling* de um conjunto de tanques que devem alimentar uma unidade de destilação de petróleo continuamente e ao mesmo tempo receber óleo cru de um duto. A formulação proposta considera que operação do duto seja conhecida *a priori* e ainda leva em conta a proibição de carregamentos e de descarregamentos simultâneos nos tanques, o recebimento de interfaces e a paralisação dos descarregamentos dos tanques por um período mínimo após estes terem recebido petróleo do duto para a separação e remoção da água presente no óleo. A formulação resulta em um modelo baseado em MINLP e uma comparação dos seus resultados com uma formulação linearizada para o

problema é realizada, tendo a formulação não linear mostrado melhores resultados para o problema.

Reddy et al. (2004) abordaram o problema de *scheduling* de um sistema operacional semelhante ao tratado por Lee et al. (1996). Os autores propõem uma formulação contínua do tempo que considera as penalizações pelos tempos de espera dos navios, os volumes das linhas de transferência entre os navios e os tanques, as interfaces formadas ao longo da operação e a discordância entre as composições dos componentes-chave nos tanques e nas suas correntes de saída. Em relação a este último tópico, os autores evitam a geração de uma formulação não linear através de um algoritmo que considera para cada tanque do sistema a equação linear das composições até o último intervalo de tempo em que eles não recebem nenhuma parcela de petróleo. A partir desse ponto da operação, a mesma linearização utilizada por Lee et al. (1996) é aplicada. Posteriormente, o problema é resolvido com as variáveis operacionais dos tanques fixadas para o conjunto em que as concentrações são conhecidas. Dessa forma, de acordo com os autores, esse procedimento é repetido até que o *scheduling* para toda a operação seja obtido.

Joly e Pinto (2003) apresentam o problema de produção e de distribuição de óleos combustíveis e asfalto. O sistema é composto por unidades de processo, tanques e dutos que devem alimentar os mercados consumidores. Os tanques recebem os produtos continuamente das unidades de processo e os produtos finais devem ser formados dentro dos dutos, onde as especificações exigidas de viscosidade para os produtos são atendidas. A formação de interface entre dois lotes adjacentes de produtos distintos dentro dos dutos é também considerada, assim como equações de estocagem, de balanço de massa e de atendimento das demandas. Os autores propõem duas formulações baseadas em MINLP e em MILP. A primeira gera um modelo não convexo devido às bilinearidades presentes nas restrições de viscosidade e desta forma, não garante que a solução ótima global seja alcançada pela utilização do método OA/ER/AP (*Outer Approximation with Equality Relaxation and Augmented Penalty* ou Aproximação Externa com Relaxações de Igualdade e Penalidade Aumentada) proposto por Viswanathan e Grossmann (1990) para a sua resolução, que é baseado em otimização local. Os autores afirmam que ambas as formulações propostas consistem em uma ferramenta eficiente para a geração do *scheduling* da unidade de produção estudada.

Jackson e Grossmann (2003) desenvolvem um modelo multiperíodo baseado em MINLP para o planejamento da produção e da distribuição em múltiplas plantas. Os autores

utilizam a técnica de decomposição Lagrangeana para a resolução de modelos de grande porte.

Em conclusão, pode-se afirmar que o planejamento e o *scheduling* de operações em refinarias possuem uma grande influência nas operações de dutos. No entanto, ressalta-se que os trabalhos apresentados para o *scheduling* ainda não agregam as atividades de ambos os sistemas operacionais citados em uma única formulação matemática. Um outro tópico de fundamental importância refere-se à influência dos aspectos hidráulicos na elaboração do *scheduling* de um sistema dutoviário. Os modelos matemáticos que considerarem este aspecto operacional representam um desafio para a sua correta resolução, devido ao grande porte dos modelos matemáticos causado pelas decisões de *scheduling* e também ao atendimento das restrições de balanço de energia das linhas dutoviárias, que por sua vez são de caráter não linear. Assim, esses tópicos se mantêm como um desafio que as abordagens para a solução de problemas de *scheduling* propostos para a Indústria Petrolífera devem enfrentar. No próximo item são mostrados trabalhos sobre o planejamento e o *scheduling* para atividades operacionais de dutos.

## *2.2. Modelos para o planejamento e o scheduling de operações dutoviárias*

A tabela 2.1 apresenta as principais contribuições para o planejamento e o *scheduling* de operações dutoviárias. Ela ainda mostra os problemas abordados e suas correspondentes formulações, assim como as estratégias adotadas para a resolução dos problemas.

Tabela 2.1 – Principais contribuições relacionadas as operações dutoviárias

<i>Autor</i>	<i>Problema</i>	<i>Operação</i>	<i>Formulação</i> <sup>1</sup>	<i>Representação do Tempo</i>	<i>Estratégia Adotada</i>
Techo e Holbrook (1974)	Transporte de derivados de petróleo	<i>Scheduling</i>	Planilha	Não aplicável	Modelo Único
Hane e Ratliff (1995)	Transporte de derivados de petróleo	<i>Scheduling</i>	MILP	Não aplicável	Decomposição
Shah (1996)	Transporte de Petróleo	<i>Scheduling</i>	MILP	Discreta	Decomposição
Sasikumar (1997)	Transporte de derivados de petróleo	<i>Scheduling</i>	IA	Não aplicável	Modelo Único
Escudero et al. (1999)	Transporte de Petróleo	Planejamento	LP	Não aplicável	Decomposição
Más e Pinto (2003)	Transporte de Petróleo	<i>Scheduling</i>	MILP	Contínua	Decomposição
Rejowski Jr. e Pinto (2003)	Transporte de derivados de petróleo	<i>Scheduling</i>	MILP	Discreta	Modelo Único
Magalhães e Shah (2003)	Transporte de Petróleo	<i>Scheduling</i>	MILP	Contínua	Modelo Único
Van den Heever e Grossmann (2003)	Cadeia de Suprimento de Hidrogênio	Planejamento/ <i>Scheduling</i>	MINLP	Discreta	Decomposição
Neiro e Pinto (2003)	Cadeia de Suprimentos de Petróleo	Planejamento	MINLP	Discreta	Modelo Único
Rejowski Jr. e Pinto (2004)	Transporte de derivados de petróleo	<i>Scheduling</i>	MILP	Discreta	Modelo Único
Magatão et al. (2004)	Transporte de derivados de petróleo	<i>Scheduling</i>	MILP	Discreta	Decomposição
Cafaro e Cerdá (2004)	Transporte de derivados de petróleo	<i>Scheduling</i>	MILP	Contínua	Modelo Único

1. MILP: Programação Mista Inteira Linear. MINLP: Programação Mista Inteira Não Linear. IA: Inteligência Artificial. LP: Programação Linear.

Modelos de cadeias de suprimento tratam os dutos como apenas um dos seus componentes integrantes. Embora esses modelos não representem as operações dutoviárias com um grau de detalhamento elevado, eles consideram importantes decisões relacionadas aos dutos, como as de utilizá-los ou não por um determinado período. Os dutos por sua vez, podem ser representados por arcos de uma rede e suas operações devem ser consideradas em subproblemas de fluxo em redes de vários produtos ou *multi commodity network problem* (Ahuja et al., 1995) para cada intervalo de tempo que compõem o problema. No entanto, diversos outros aspectos e detalhes devem ser considerados para a aplicação de um sistema real. Para cada intervalo de tempo, se deseja determinar quais produtos devem ser transferidos e em quais quantidades, as suas origens bem como os seus destinos, além dos dutos a serem utilizados para as operações de transferência. Restrições para os balanços de estoques, assim como para os seus limites máximos e mínimos em cada localidade da cadeia também devem ser consideradas. Finalmente, valores discretos para as vazões dos limites de vazão dos produtos ao longo da cadeia devem ser adotados devido à alta capacidade de transporte dos dutos.

Escudero et al. (1999) propõem uma formulação de Programação Linear para o planejamento de uma cadeia de suprimentos de petróleo que considera incertezas nos preços dos diversos tipos de petróleo disponíveis para a compra, bem como nos valores determinados para as suas demandas. Neiro e Pinto (2003) propõem modelos baseados em MINLP para o planejamento de atividades de uma cadeia de suprimentos de petróleo que envolve diversas refinarias que podem receber petróleo de campos de exploração bem como de fontes externas, depósitos que estocam petróleo e alguns de seus derivados e dutos que conectam dois ou mais sistemas da cadeia. Os autores modelam os dutos com equações lineares de balanço de massa. Van den Heever e Grossmann (2003) estudam a integração do planejamento de produção e do *scheduling* reativo de uma cadeia de suprimento de hidrogênio. Os autores ainda consideram aspectos hidráulicos para a operação e o scheduling do referido sistema.

Modelos de *short-term scheduling* (*scheduling* de curto prazo) tratam os aspectos operacionais dos sistemas de produção com um nível de detalhamento maior em relação aos modelos de planejamento. Outros aspectos como as capacidades volumétricas dos dutos, pequenas variações nas suas vazões e a capacidade das estações de bombeamento devem ser levados em conta. Um fator complicador se refere à detecção e o custo das interfaces entre dois produtos distintos.

O problema de *scheduling* de operações dutoviárias foi primeiramente abordado na década de 1970 com planilhas auxiliares para a geração de uma solução viável. Naquela época, os recursos computacionais limitavam o tratamento de importantes detalhes operacionais. Techo e Holbrook (1974) estudaram um sistema dutoviário com o objetivo de minimizar os custos de interfaces. Sasikumar et al. (1997) desenvolveram um sistema de inteligência artificial para o *scheduling* de um duto multiproduto. Os autores minimizam os custos de interface bem como os de bombeamento. Eles ainda consideram o seqüenciamento restrito dos produtos dentro do duto, que é considerado um fator complicador para a geração de soluções viáveis, devido às possíveis violações dos limites de estocagens na refinaria e nas bases de distribuição<sup>5</sup>.

A modelagem de problemas de *scheduling* dutoviários apresenta decisões complexas e diversas estratégias podem ser adotadas. A primeira escolha se dá entre estratégias de decomposição e de modelos únicos. A primeira permite que os sistemas sejam tratados com mais elevado grau de detalhamento, como a representação de tanques individuais e tempos de transição entre eles. A grande desvantagem das técnicas de decomposição é que elas apenas obtêm soluções próximas em relação à ótima global, mesmo quando as formulações são lineares. Esse fator pode ser crucial quando os sistemas ligados ao duto dividem a utilização de alguns dos recursos disponíveis para a operação de transferência. Em sistemas dutoviários esses recursos são os tanques e a própria linha dutoviária. Por outro lado, a estratégia de modelos únicos garante a geração de uma solução ótima, se a formulação do problema for linear e a busca prossegue ao final. Porém, as aplicações de sistemas reais tendem a gerar um elevado número de variáveis discretas, fato que em algumas situações inviabiliza a sua aplicação.

Técnicas de decomposição podem ser aplicadas de diversas maneiras. Hane e Ratfiff (1995) apresentam o problema de seqüenciamento de diversos produtos no mesmo sistema estudado por Techo e Holbrook (1974). No entanto, os autores apresentam algoritmos para a resolução do problema em questão baseados em decomposição que divide a formulação MILP original em vários problemas, com um grau de resolução facilitado quando comparado à formulação original. Shah (1996) aplica a estratégia de decomposição espacial para um sistema dutoviário de petróleo que conecta uma refinaria e um terminal marítimo. O autor utiliza a representação discreta do tempo e uma estratégia de modelos segregados MILP para a operação dos tanques no terminal e da refinaria. Primeiramente, um modelo MILP aborda os tanques da refinaria que devem

---

<sup>5</sup> Apesar de ser um fator complicador com relação aos limites de estocagem, o seqüenciamento restrito diminui o número de possibilidades de interfaces a serem formadas no interior dos segmentos dutoviários.

alimentar uma unidade de destilação de petróleo e ao mesmo tempo devem receber petróleo do duto. Note que o duto opera em modo contínuo e que a modelagem matemática do mesmo não é incluída na estratégia empregada. Para tanto, o autor empregou uma representação de tempo morto para as parcelas que entram no duto através dos tanques do terminal. Más e Pinto (2003) estudaram um sistema dutoviário de petróleo composto por um conjunto de tanques em um terminal marítimo, onde os navios devem descarregar o petróleo e uma rede de dutos que conecta quatro refinarias. Os autores utilizam uma estratégia similar à adotada por Shah (1996), porém a representação contínua do tempo é empregada nesse caso. A estratégia de decomposição ainda considera a operação das estações de estocagem intermediária. O método de solução adotado ainda consta de formulações MILP, uma rotina auxiliar e uma formulação central MILP. As primeiras formulações definem os tanques a serem utilizados, enquanto a rotina auxiliar determina os valores das variáveis temporais, bem como os das vazões a serem utilizadas pelos dutos. A formulação central utiliza esses dados como parâmetros e decide a seqüência de produtos dentro das linhas dutoviárias. Magatão et al. (2004) utilizam uma estratégia de decomposição similar, onde um duto que opera em ambos os sentidos conecta um terminal marítimo a uma refinaria.

Com relação à estratégia de modelo único para o *scheduling* de operações dutoviárias, Magalhães e Shah (2003) estudam o transporte dutoviário de petróleo de um terminal marítimo para uma refinaria através de uma linha dutoviária. Operações de carregamento e de descarregamento dos tanques em ambas as localizações do sistema, o tempo de decantação da salmoura (água salgada) inicialmente no petróleo e o horário de pico de consumo de energia elétrica são alguns dos detalhes operacionais que são levados em conta no presente problema. Os autores minimizam a diferença entre a estratégia planejada anteriormente e a que é utilizada pelo sistema para as unidades de destilação de petróleo da refinaria.

Cafaro e Cerdá (2004) desenvolveram uma formulação MILP com representação em tempo contínuo para o *scheduling* de operações dutoviárias de derivados de petróleo para o sistema estudado por Rejowski Jr. e Pinto (2003), admitindo que o duto opera de forma ininterrupta. A formulação proposta determina o conjunto de produtos que alimenta o duto e as reduções volumétricas que cada batelada presente dentro da linha dutoviária sofre ao passar por um dado depósito conectado ao duto. Os autores comparam os resultados com a formulação proposta em tempo discreto por Rejowski Jr. e Pinto (2003), embora uma média dos custos de estocagem tenha sido adotada para evitar a bilinearidade que seria formada entre os volumes estocados e o

tempo em que estes permanecem em uma dada localidade do sistema. Os autores ainda contabilizam os custos de interface apenas no primeiro segmento do duto, enquanto a formulação proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003) detecta e contabiliza as interfaces em toda a extensão do duto. Surpreendentemente, os autores chegam à conclusão de que a operação em modo contínuo é mais eficaz do que a intermitente, mesmo quando o sistema dutoviário está sujeito a variações nos seus custos de bombeamento.

Embora as operações dutoviárias sejam bastante econômicas em modo contínuo, em alguns casos a operação destes meios de transporte em modo intermitente se mostra mais eficaz e em alguns casos ela se torna inevitável devido às altas demandas por energia elétrica e também pelo transporte dutoviário de petróleo e de seus derivados se dar em bateladas e para múltiplas localidades. Alguns sistemas dutoviários, como os estudados por Más e Pinto (2003) e por Magalhães e Shah (2003), estão sujeitos a variações nos seus custos de bombeamento de até cinco vezes nesses períodos. Dessa forma, a operação intermitente se mostra mais vantajosa quando comparada à em modo contínuo. Rejowski Jr. e Pinto (2003) desenvolveram uma formulação MILP para o *scheduling* de operações dutoviárias em um sistema que é composto por uma refinaria, um duto e múltiplos depósitos que são conectados a linha dutoviária em série. O duto deve transportar gasolina, óleo diesel, GLP e QAV para os depósitos. Duas formulações baseadas em lógica disjuntiva (Raman e Grossmann, 1994) e na representação discreta do tempo são propostas. A primeira segrega os segmentos do duto em lotes de capacidade volumétrica de mesma capacidade, ao passo que a segunda os divide em lotes em capacidades volumétricas distintas. Custos operacionais como os de estocagem, de bombeamento e de interfaces formadas dentro do duto são minimizados. As principais decisões das formulações propostas são as operações de carregamentos e de descarregamentos dos produtos para o duto e a alimentação dos depósitos, bem como a alimentação dos mercados consumidores. Cabe ressaltar que os dutos operam de modo intermitente e a decisão de quando as paradas devem ocorrer ao longo do horizonte de tempo operacional constitui um fator complicador para o referido problema.

Um outro aspecto da modelagem de operações do *scheduling* dutoviário é a representação do tempo. Esse assunto, que concerne a divisão do horizonte de tempo operacional, foi amplamente estudado em diversas aplicações de *scheduling* de processos químicos. A representação discreta do tempo (Shah, 1996; Pinto et al., 2000; Rejowski Jr. e Pinto, 2003; Magatão et al., 2004) divide o horizonte de tempo em parcelas duração fixa e conhecida, enquanto a representação



contínua relaxa tal hipótese (Pinto et al., 2000; Más e Pinto, 2003; Magalhães e Shah, 2003; Jia e Ierapetritou, 2004; Moro e Pinto, 2004).

A representação discreta do tempo assume que as decisões tomadas em um sistema de produção são tomadas na fronteira dos intervalos de tempo. Ela ainda considera que a duração dos intervalos de tempo seja o máximo divisor comum entre todos os tempos de processamento de todas as tarefas e que suas durações sejam constantes (Maravelias e Grossmann, 2003). As equações de balanços mássicos conectam os intervalos de tempo adjacentes e dessa forma não há necessidade de incluir variáveis temporais, uma vez que os instantes exatos de início e término de cada operação são predefinidos pela discretização do horizonte de tempo.

A principal vantagem da representação discreta do tempo quando comparada à contínua é a de que ela gera usualmente formulações muito mais intuitivas e de fácil entendimento. No entanto, para a maioria dos casos, ela necessita de um excessivo número de intervalos de tempo devido às diferentes durações das tarefas dos sistemas operacionais. Um exemplo ilustrativo é dado por Moro e Pinto (2004), onde as tarefas do sistema de tanques de recebimento de petróleo apresentam variações nas suas durações de 15 minutos a 24 horas.

De acordo com Maravelias e Grossmann (2003), a representação contínua do tempo pode ser classificada em duas categorias. A primeira define intervalos comuns para todas as unidades do sistema. Duas representações são definidas dentro desta categoria: a primeira estabelece que todas as tarefas devem ser iniciadas e terminadas em um dado ponto da operação, enquanto a segunda determina somente os instantes de tempo iniciais. A segunda categoria é a representação por eventos com diferentes intervalos de tempos para cada unidade do sistema. Como nesta categoria a duração de cada evento varia, é necessária a definição de uma variável temporal para cada unidade do sistema. As representações em tempo contínuo normalmente geram formulações não intuitivas e de difícil entendimento, porém as suas formulações matemáticas possuem um número consideravelmente menor de variáveis discretas quando comparadas à representação em tempo discreto.

### **3. O problema de distribuição dutoviária de derivados de petróleo**

Neste capítulo é descrito o problema de uma refinaria de petróleo que deve transportar alguns de seus produtos derivados através de um único duto para diversas bases de distribuição conectadas ao mesmo. Esta distribuição deve atender aos limites de estoques, na refinaria e nas bases de distribuição de produtos, às limitações de vazões, como por exemplo a vazão de alimentação do duto pela refinaria, ao tempo de percurso dos produtos que alimentam o duto para uma dada base.

Este trabalho foi baseado na operação do sistema de distribuição de derivados da Petrobras, do qual fazem parte a refinaria REPLAN, o duto denominado OSBRA, as bases regionais conectadas a ele, além dos mercados consumidores ligados às respectivas bases.

Este problema se apresenta extremamente interessante dos pontos de vista prático e teórico. Representações de problemas de *scheduling* podem ser investigadas, como por exemplo, a representação da variável tempo e do aspecto combinatório que, segundo Pinto e Grossmann (1998), constituem-se nos grandes desafios nesta área de pesquisa.

Devido ao curto horizonte de tempo operacional empregado neste caso que serviu de base para a realização deste trabalho, são utilizadas técnicas de *short-term scheduling*, uma vez que os valores dos requerimentos para os diversos produtos nas bases conectadas ao duto apresentam uma grande variação, retratando assim um ambiente de mercado instável.

Espera-se assim descrever de forma integrada e coerente todas as restrições operacionais referentes ao problema, com o objetivo de minimizar os custos referentes à operação de transporte e de interface dos derivados, bem como de inventário em todos os subsistemas de refino e de distribuição. A seguir, cada componente que constitui o referido sistema é descrito.

#### *3.1. Produtos a serem armazenados e distribuídos*

No sistema pertencente à Petrobras, quatro derivados de petróleo são armazenados e transferidos da refinaria REPLAN para as bases conectadas ao duto OSBRA. Estes são a gasolina, o óleo diesel, o GLP e a QAV. Para o óleo diesel existem diversas especificações, sendo o metropolitano classe B designado como óleo diesel I e o especial como óleo diesel II. O GLP por sua vez, é armazenado em esferas pressurizadas e transferido sob pressurização do duto

uma vez que em condições normais de pressão e temperatura este derivado se encontra em estado gasoso.

### *3.2. Refinaria*

Em um sistema como o descrito acima, cabe à refinaria as principais decisões operacionais. Este procedimento deve ser cuidadosamente realizado, pois a operação na refinaria e nas bases diferenciam-se para o funcionamento global do sistema. As decisões que compõem a operação convencional de uma refinaria para este caso são as seguintes:

- a escolha do produto a ser enviado para o duto;
- a quantidade total deste;
- como este total deve ser distribuído entre os depósitos e por fim;
- a escolha de qual deve ser o próximo produto a ser enviado.

Segundo Sasikumar et al. (1997), este conjunto de decisões é tomado a cada descarregamento e, uma vez que o produto seguinte foi escolhido, a próxima decisão é a quantidade deste. Assim, segue-se até que o fim da operação seja alcançado sempre seguindo um determinado critério, que de acordo com Sasikumar et al. (1997) é tratado como a minimização dos custos de interface dos produtos. O fluxograma de decisões da figura 3.1 ilustra melhor este conjunto de procedimentos.

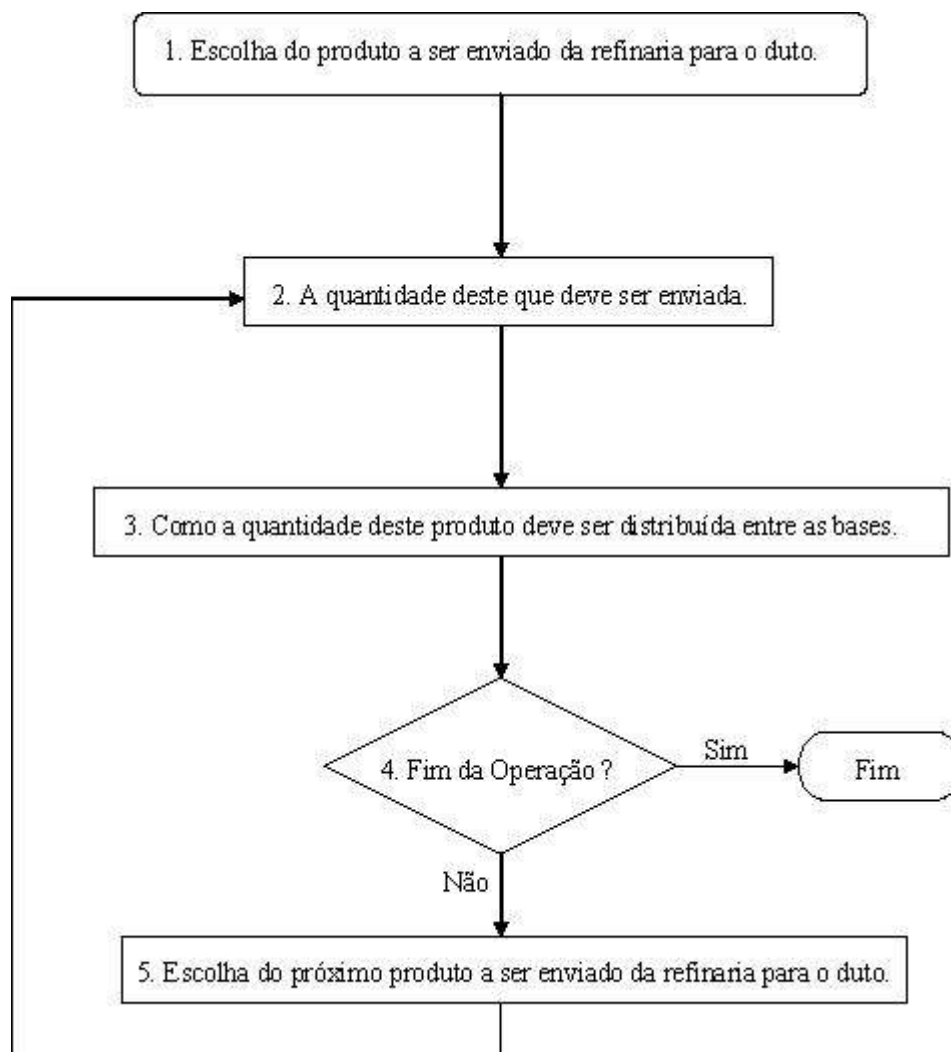


Figura 3.1 – Fluxograma de decisões em uma operação convencional

Vale salientar que neste trabalho a estratégia de operação será diferente da ilustrada na figura 3.1, bem como o objetivo de suas decisões. Para o presente caso, as decisões devem ser simultâneas segundo todos os custos envolvidos na operação. A operação convencional descrita na figura 3.1 é composta apenas pela decisão de escolha de interface entre produtos, o que não garante a geração de uma programação ótima para este caso, além da possibilidade desta ainda ser inviável operacionalmente, como por exemplo a violação da capacidade de estocagem de um determinado produto.

Para melhor entendimento do funcionamento do sistema em questão, a figura 3.2 ilustra o fluxograma de operações do referido sistema operacional.

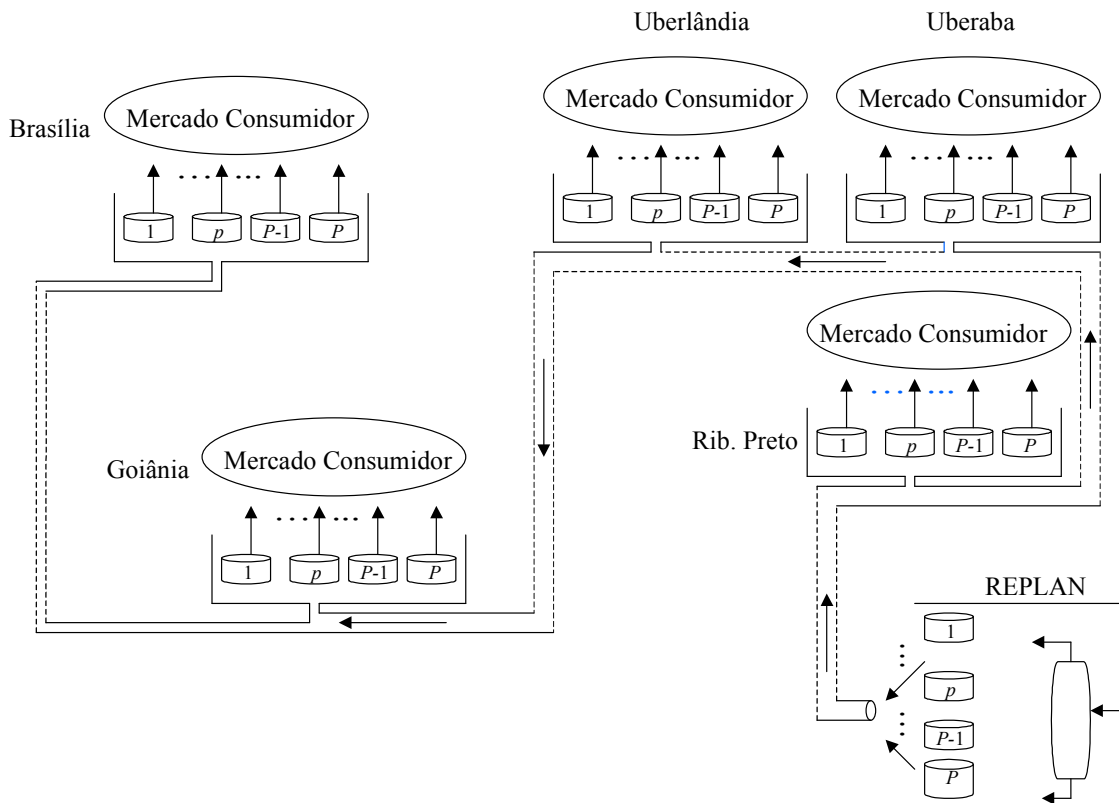


Figura 3.2 – Fluxograma operacional do sistema de distribuição

O sistema real na refinaria REPLAN é composto por vários tanques de cada produto listados na tabela 3.1. Nesta tabela estão listados somente as capacidades referentes aos tanques dos produtos que são dedicados ao duto OSBRA. Na realidade existem muitos outros tanques de diversos outros produtos que não são dedicados ao referido duto na REPLAN. Os tanques aqui listados são somente dedicados ao oleoduto OSBRA. Os tanques da refinaria recebem produtos ao longo de uma campanha de forma contínua e programada.

Segundo Más (2001), os produtos considerados “voláteis” pela empresa, como a gasolina, são armazenados em tanques de teto flutuante. Estes tanques são equipados com um dispositivo que não deve entrar em contato com a superfície inferior do tanque para evitar danos à base do mesmo. Desta forma, a empresa adota um volume mínimo, que varia de 10 a 15% da capacidade de cada tanque, o que representa uma altura de aproximadamente de dois metros de um derivado em um tanque. Exceção é feita ao GLP que é armazenado em esferas e, portanto não possui uma capacidade mínima inferior. Assim como uma capacidade mínima imposta, todo o tanque possui uma capacidade limitada de armazenamento (Más, 2001).

Tabela 3.1 - Descrição das capacidades de estocagem por produto na REPLAN

<i>Produto</i>	<i>Capacidade Máxima [m<sup>3</sup>]</i>	<i>Capacidade Mínima [m<sup>3</sup>]</i>
Óleo diesel I	88310	7327
Óleo diesel II	252534	34419
Gasolina	225754	30860
GLP	30328	774
QAV	56142	4184

As vazões de alimentação do duto podem variar de valores de 500m<sup>3</sup>/h até 1000m<sup>3</sup>/h. Vale salientar que tanto na refinaria quanto nas bases de distribuição de derivados existe mais de um tanque por produto. Uma característica operacional do sistema que facilita o uso das capacidades em todas as localidades é o fato de que é permitido a somente um tanque de qualquer produto a conexão para a alimentação ao duto.

### 3.3. Bases de distribuição conectadas ao duto

O correto gerenciamento das bases de distribuição requer essencialmente uma decisão. Esta se refere ao envio de produtos para os respectivos mercados consumidores. As restrições são compostas pelos limites máximo e mínimo de volume de estocagem para os produtos, pelo tempo de percurso de uma determinada quantidade dos derivados, e ainda pelas temporizações das operações de carregamentos e de descarregamentos. Uma situação em que os depósitos não possuam estoques de produtos pode afetar os consumidores locais. Uma situação oposta, além de paralisar o escoamento no duto, pode também interromper a produção da refinaria<sup>6</sup>. O sistema que serviu de base para a realização deste trabalho possui cinco bases conectadas ao duto. Estas são localizadas nas seguintes cidades: Ribeirão Preto (SP), Uberaba (MG), Uberlândia (MG), Goiânia (GO) e Brasília (DF). A seguir, seguem ilustrados na tabela 3.2 os dados limites de estocagem referentes a estas bases. As capacidades mínima e máxima nulas representam a inexistência de estoque de um determinado produto na base de distribuição indicada.

<sup>6</sup> Isto é possível caso o duto seja o único meio de transporte destes produtos.

Tabela 3.2 - Descrição das capacidades de estocagem por produto nas bases

<i>Base</i>	<i>Produto</i>	<i>Capacidade Máxima [m<sup>3</sup>]</i>	<i>Capacidade Mínima [m<sup>3</sup>]</i>
Ribeirão Preto	óleo diesel I	27059	4060
	óleo diesel II	0	0
	gasolina	19127	2489
	GLP	6366	0
	QAV	0	0
Uberaba	óleo diesel I	19118	1852
	óleo diesel II	0	0
	gasolina	9014	948
	GLP	0	0
	QAV	0	0
Uberlândia	óleo diesel I	26968	3161
	óleo diesel II	0	0
	gasolina	8988	1090
	GLP	6366	0
	QAV	0	0
Goiânia	óleo diesel I	72178	10636
	óleo diesel II	12578	1177
	gasolina	18993	2768
	GLP	17881	718
	QAV	4532	442
Brasília	óleo diesel I	72178	4023
	óleo diesel II	118	812
	gasolina	2638	18013
	GLP	162	9201
	QAV	1383	13689

Uma característica interessante ilustrada pela tabela 3.2 é o fato de que nem todas as bases de distribuição conectadas ao duto estocam todos os mesmos produtos gerados na refinaria. Um exemplo disto é o óleo diesel II, que uma vez enviado, só pode ser alocado nas bases localizadas

em Goiânia e Brasília. A base de Uberaba por exemplo, só pode receber óleo diesel I e gasolina<sup>7</sup>. Todas as bases também possuem uma vazão de retirada de derivados do duto de aproximadamente 150 m<sup>3</sup>/h. A vazão de envio dos produtos para os mercados consumidores é de aproximadamente 70 m<sup>3</sup>/h.

Ficam assim ilustradas todas as características quanto às bases de distribuição de derivados de petróleo. A seguir serão descritas as características principais de um duto genérico de distribuição para posterior exemplificação do duto OSBRA.

### 3.4. Dutos multiproduto

O duto OSBRA, como já foi descrito anteriormente, tem como único ponto de alimentação de derivados a refinaria REPLAN e todas as outras bases já citadas anteriormente como pontos de retirada de produtos. As capacidades volumétricas de cada segmento do duto, bem como os seus respectivos diâmetros são descritos na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Características dos trechos do duto OSBRA

<i>Segmento</i>	<i>Capacidade Volumétrica [m<sup>3</sup>]</i>	<i>Diâmetro [m]</i>
REPLAN – Ribeirão Preto	39759	0,5080
Ribeirão Preto - Uberaba	25879	0,5080
Uberaba- Uberlândia	25321	0,5080
Uberlândia - Goiânia	59676	0,5080
Goiânia – Brasília	13739	0,3048

As vazões do duto podem variar de valores da ordem de 500 m<sup>3</sup>/h até 1000 m<sup>3</sup>/h, exceto para o último trecho. É interessante ressaltar que para todos os trechos exceto o primeiro, o valores de sua vazão podem ser reduzidos caso a base de distribuição do trecho anterior estiver retirando derivados ao mesmo tempo. Como consequência disto, o tempo de percurso de uma determinada quantidade de produto a uma base qualquer conectada ao duto é aumentado.

Uma observação importante quanto aos dados ilustrados pela tabela 3.3 se refere aos diâmetros dos trechos do duto. Todos os segmentos possuem o mesmo valor, exceto o último. Isto se deve a uma melhor condição de operação do duto. Como todo e qualquer produto que seja

<sup>7</sup> Além destes produtos, esta base ainda estoca álcool etílico hidratado e puro. Os tanques destes derivados não foram incluídos na tabela por serem transferidos por outro meio de transporte que não o duto.



enviado para este segmento deve obrigatoriamente ser retirado pela última base de distribuição, é inviável que esta atue com uma vazão de mesma ordem dos trechos anteriores. Assim, para que ocorra uma diminuição da vazão do último trecho e para que seja atingida uma melhor condição de operação (velocidades próximas), torna-se necessária a diminuição do diâmetro do respectivo segmento.

Devido ao seqüenciamento de descarregamentos de derivados de diferentes espécies provenientes da refinaria para o duto, é inevitável que ocorram contaminações e perdas na região entre um produto e outro, denominada de interface por Joly (1999), devido ao contato entre os derivados dentro do duto. Esses custos são normalmente medidos pelos volumes da interface, que dependem da extensão do duto bem como do período de tempo em que os produtos permanecem dentro do mesmo. Cabe ressaltar que as propriedades físico-químicas dos derivados também influenciam estes custos. No caso de oleodutos, as refinarias geralmente adotam como medida de segurança a segregação de um dado volume antes e depois da chegada das interfaces, para que não ocorra contaminação entre os diferentes tipos de petróleo. Em dutos multiproduto, os depósitos estocam as interfaces em tanques separados e diversas opções existem para a recuperação dos produtos. Este aspecto operacional implica em um custo adicional na operação. A minimização destes custos se dá pela movimentação quando possível, dos produtos que estejam dentro da linha dutoviária até que a interface seja removida. Sasikumar et al. (1997) ainda retratam o fato de existirem seqüências proibidas de descarregamentos de diferentes produtos. Para o presente caso, uma quantidade de GLP só pode ser transportada entre duas parcelas de gasolina. As seqüências para o sistema são descritas na tabela 3.4, onde aquelas proibidas são denotadas por “X” e as permitidas por “√”. A interface Óleo diesel-QAV é permitida, embora deva se evitar a sua formação, devido ao seu alto custo.

Tabela 3.4 – Seqüenciamento de produtos dentro do duto

<i>Produto</i>	<i>Gasolina</i>	<i>Óleo Diesel</i>	<i>GLP</i>	<i>QAV</i>
<i>Gasolina</i>	√	√	√	√
<i>Óleo Diesel</i>	√	√	X	√
<i>GLP</i>	√	X	√	X
<i>QAV</i>	√	√	X	√

A seguir são descritos os aspectos hidráulicos de um sistema dutoviário, pois estes possuem direta influência nas suas operações.

### 3.5. Aspectos hidráulicos

A abordagem proposta deste item é a de descrever os aspectos hidráulicos no *scheduling* de distribuição dutoviária de derivados de petróleo. Para isto, são consideradas as perdas hidráulicas que os produtos sofrem ao serem movimentados pelo duto. Além disso, a influência da operação das estações de bombeamento, bem como a do seqüenciamento dos produtos no interior da linha dutoviária são apresentados.

Perdas hidráulicas podem ser traduzidas para um duto como decaimentos de pressão ao longo de sua extensão devido às perdas de energia potencial e pelo atrito dos fluidos com a parede do duto. Como os produtos devem ser transportados por longas distâncias, o principal custo operacional é o de bombeamento devido às enormes quantidades de energia elétrica consumidas pelas estações de bombeamento.

Outro fator que faz com que essas considerações tomem caráter fundamental é o número ínfimo de trabalhos de *scheduling* de sistemas dutoviários que levem em conta as suas características hidráulicas. Os trabalhos sobre *scheduling* de sistemas dutoviários não consideram estes cálculos, dentre estes os de Shah (1996), Más e Pinto (2003), Moro e Pinto (2004), Joly e Pinto (2003), Rejowski Jr. e Pinto (2004) e Magalhães e Shah (2003). O único trabalho que leva em consideração os aspectos hidráulicos de um sistema dutoviário é o de Van den Heever e Grossmann (2003), que estudam uma rede de distribuição de dutos que transporta apenas hidrogênio. Os autores empregam técnicas de decomposição Lagrangeana, devido ao grande porte do problema proposto. Acredita-se assim que estas possam ter enorme influência nos resultados dos problemas tratados, conforme relatado por especialistas de empresas como a Petrobras (Brasil), a *Ecopetrol* (Colômbia) e a *ExxonMobil* (EUA).

Considere um duto que deva transportar produtos de uma refinaria para depósitos e mercados consumidores. O duto possui estações de bombeamento que são responsáveis pelo suprimento de energia aos fluidos, pois estes sofrem perdas ao adentrarem a linha dutoviária. Estas são as seguintes:

- Perdas por energia potencial. Isto se dá quando os destinos conectados a um duto se localizam em cidades com menor altitude em relação à origem do duto. Note que há um perda

de energia potencial dos produtos caso os destinos se localizem em uma localidade com altitude menor em relação à origem do duto;

- Perdas por energia cinética. Isto se dá devido a variações no diâmetro do duto. No caso de diminuição dos diâmetros do duto, o fluido ganha energia cinética, e;
- Perdas por atrito. Os fluidos perdem energia devido ao contato com a parede do duto e a efeitos viscosos. Acredita-se que esta parcela seja responsável por grande parte de perda de energia em sistemas dutoviários.

A figura 3.3 mostra um sistema dutoviário de base única bem como o perfil do gradiente hidráulico dos produtos que se encontram dentro do segmento do duto.

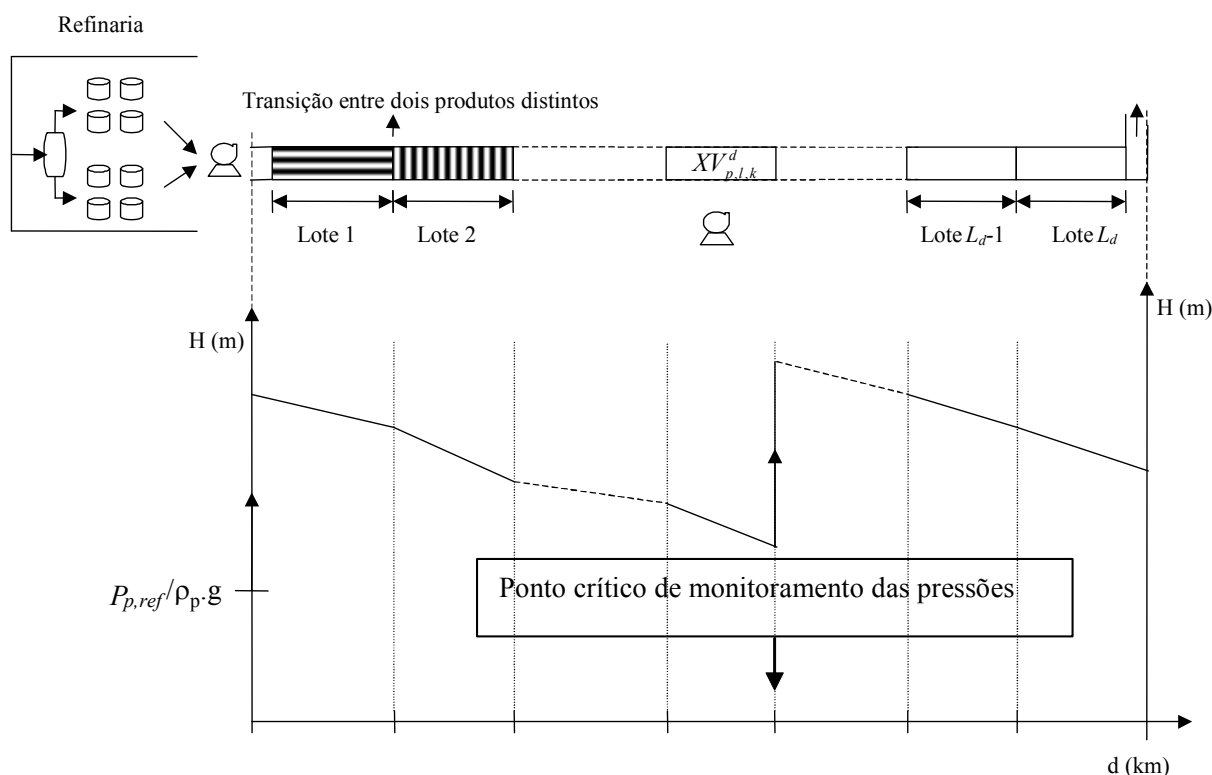


Figura 3.3 – Duto de segmento único e perfil de gradiente hidráulico típico

Os níveis de pressão dos produtos na refinaria são ilustrados em *m.c.l.* (metros de coluna de líquido), segundo os seguintes parâmetros:

- $P_{p,ref}$ : pressão (atm) a que o produto é armazenado na refinaria;
- $\rho_p$ : densidade do produto ( $\text{kg/m}^3$ );

- $g$ : aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ).

Admite-se que todos os produtos são armazenados em tanques a pressão atmosférica, com exceção do GLP que é armazenado em esferas, onde é estocado na forma líquida a uma pressão maior.

Com o objetivo de suprir as referidas perdas de energia, estações de bombeamento são instaladas ao longo do sistema dutoviário. Estas por sua vez, são compostas por uma série de estágios de bombeamento que consomem enormes quantidades de energia. Devido a este fato, deseja-se então gerar *schedules* viáveis para a configuração mínima de bombeamento das estações. É possível que as estações de bombeamento trabalhem acima desta capacidade mínima em um *schedule* gerado por um programa que não considere as características hidráulicas, porém elas podem consumir mais energia e como conseqüência os seus custos de bombeamento são elevados.

A figura 3.3 ainda mostra os níveis de pressão dos produtos ao longo de toda a extensão do duto, também denominado de gradiente hidráulico. Na refinaria, os produtos passam por uma estação de bombeamento antes de entrar no duto. Conseqüentemente, os níveis de pressão são aumentados e assim os produtos que se encontram dentro da linha dutoviária se movimentam a uma determinada vazão.

Quando os derivados não passam por uma estação de bombeamento, os seus níveis de pressão podem decrescer devido a diferentes níveis energia potencial e cinética e principalmente às perdas decorrentes de atrito. Os derivados sofrem ganhos de energia potencial quando se movimentam para um ponto que possui maior altitude que a sua origem. O efeito inverso (perda de energia potencial) ocorre quando os produtos são transportados para um ponto de menor altitude em relação a sua origem. Note que este termo ainda depende das densidades dos produtos. A variação de energia cinética dos fluidos dentro do duto se dá por variações no diâmetro da linha dutoviária e também devem ser consideradas. Quando o diâmetro do duto é reduzido, os fluidos são submetidos a velocidades maiores de escoamento e desta forma sofrem um ganho de energia cinética e o efeito inverso ocorre quando o diâmetro da linha é aumentado.

Uma parcela determinante para a queda de pressão dos fluidos é a perda por atrito dos mesmos com a parede do duto. No caso, as propriedades físico-químicas dos derivados, o material de construção do duto, a sua extensão, o diâmetro da linha e a vazão utilizada, contribuem para esta perda de energia.

Uma restrição operacional deste problema é que as pressões devem sempre se manter acima dos valores das suas pressões de vapor. Note que os seus menores valores ocorrem na sucção das estações intermediárias de bombeamento. Caso a pressão tome valores abaixo deste, o respectivo produto se vaporiza dentro da linha. Isto não é desejável, pois além da perda do derivado, esta vaporização causa danos a linha dutoviária e aos estágios de bombeamento.

O perfil do gradiente hidráulico depende de diversos fatores. As principais variáveis de decisão para o seu cálculo são as diferentes configurações das estações de bombeamento e o seqüenciamento dos produtos dentro do duto.

A figura 3.4 mostra uma estação de bombeamento genérica a título de ilustração. Ela é composta por diversos estágios que podem ser conectados em série ou em paralelo. Estas estações se localizam na refinaria (estação inicial) e em um ou mais pontos do duto (estações intermediárias). As diversas configurações fornecem diferentes ganhos de pressão aos produtos e valores para as vazões de operação do duto. Elas ainda trabalham sob diferentes valores de rendimentos, sendo este um fator crucial para a operação dutoviária.

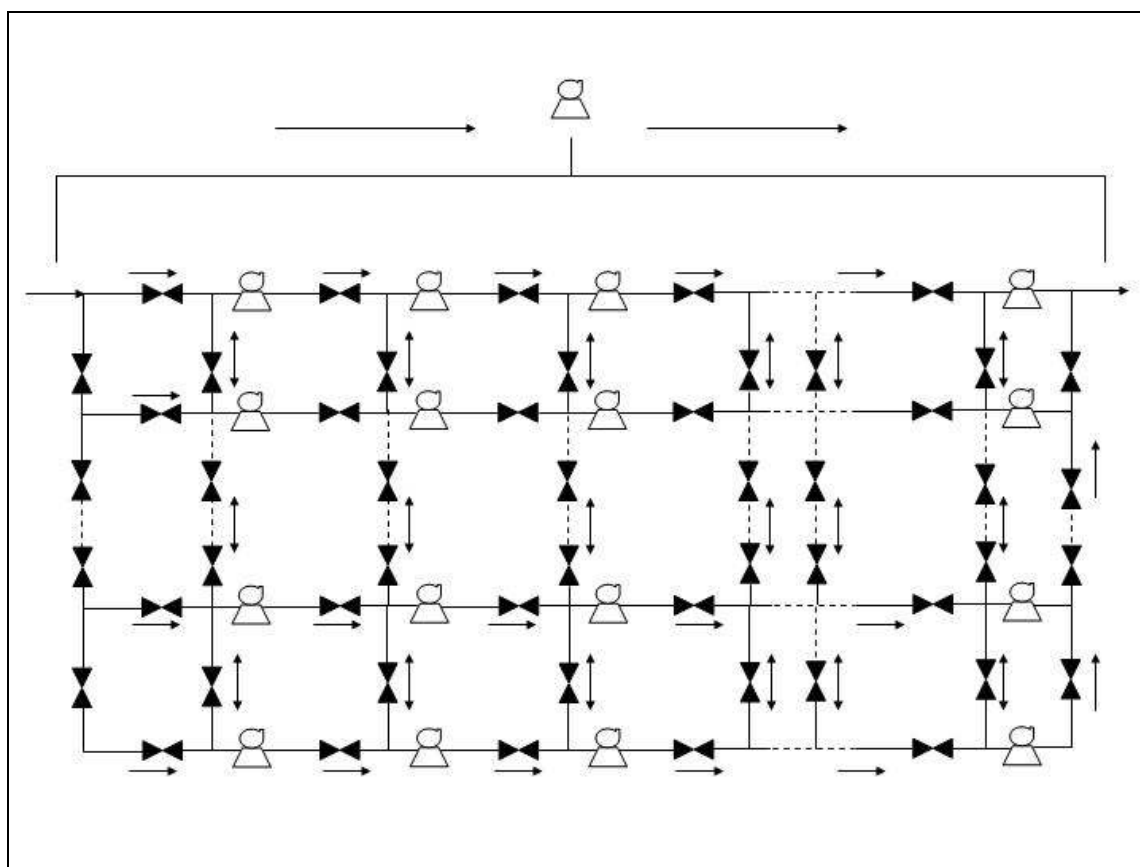


Figura 3.4 – Diagrama detalhado de uma estação de bombeamento

Os seqüenciamentos dos produtos dentro da linha dutoviária também afetam a operação de transporte, pois estes determinam diferentes perdas de carga para o sistema, devido às diferenças nas características físico-químicas dos produtos.

Um exemplo é proposto para ilustrar este problema. Considere um duto que deva transportar gasolina e óleo diesel para uma única base. Inicialmente, ele é preenchido totalmente por gasolina, porém a base necessita de óleo diesel. A tabela 3.5 mostra algumas propriedades físicas dos produtos envolvidos nesta transferência. O ponto de operação do duto se dá na intersecção das curvas das bombas que são ligadas durante a operação e das perdas de carga do sistema, conforme mostra a figura 3.5. As estações de bombeamento assumem diferentes curvas dependendo da configuração assumida e também das velocidades das rotações dos seus motores, caso estas possam ser ajustadas (Jones e Paddock, 1982).

Pode-se analisar a influência dos produtos nas curvas de operação do sistema através dos valores assumidos pelas viscosidades cinemáticas ( $\zeta_p$ ), dadas pelo quociente entre as viscosidades dinâmicas ( $\mu_p$ ) e as densidades ( $\rho_p$ ). Devido à maior viscosidade cinemática do óleo diesel em relação à gasolina, como mostra a tabela 3.5, a curva do sistema é deslocada, conforme os lotes do duto vão sendo preenchidos pelo primeiro produto e ao mesmo tempo a gasolina vai sendo retirada do mesmo<sup>8</sup>, conforme ilustra a figura 3.5. Isto ocorre pois o óleo diesel possui uma viscosidade cinemática maior que a da gasolina, e conseqüentemente o seu escoamento corresponde a um atrito consideravelmente maior que o da gasolina. A principal conseqüência do deslocamento da curva do sistema é a variação na vazão de operação do duto no caso de a mesma configuração de bombeamento ser utilizada. Note que a curva das bombas pode variar se as mesmas possuírem motores com velocidades de rotação ajustáveis.

Tabela 3.5 – Propriedades físico-químicas dos produtos

<i>Produto</i>	<i>Propriedades Físico-químicas (T=20°C)</i>		
	Densidade ( $\rho_p$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosidade dinâmica ( $\mu_p$ ) [N.s/m <sup>2</sup> ]	Viscosidade cinemática ( $\zeta_p$ ) [m <sup>2</sup> /s]
Gasolina	703	4,84x10 <sup>-4</sup>	6,88x10 <sup>-7</sup>
óleo diesel	850	4,51x10 <sup>-3</sup>	5,30 x10 <sup>-6</sup>

<sup>8</sup> Pela figura 7.3, note que a perda de carga do sistema varia de forma quadrática em relação à vazão de operação do sistema. No capítulo seguinte, as suas formas analíticas são detalhadas.

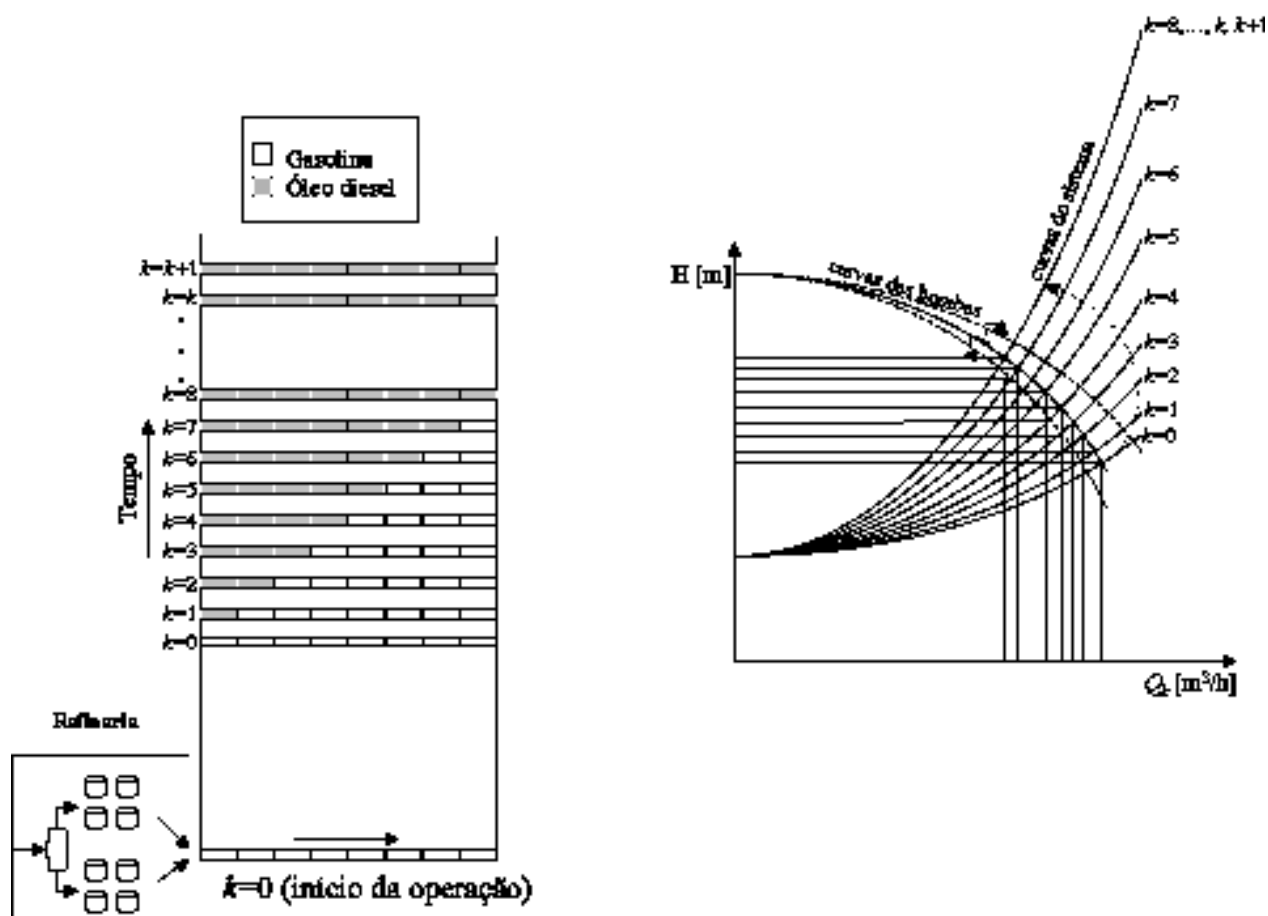


Figura 3.5 – Operação de transporte e seus principais aspectos hidráulicos

### 3.6. Custos envolvidos no sistema

Os custos envolvidos nesta operação são relativos à estocagem de produtos tanto na refinaria quanto nas bases de distribuição, além dos custos de transferência da refinaria para uma base de distribuição.

Os custos de estocagem são diretamente proporcionais às quantidades estocadas dos produtos em todos os subsistemas e ao período de tempo pelo qual estas mesmas permanecem armazenadas. Assim, cada parcela deste custo é composta pelo produto entre a quantidade estocada de um dado derivado, a duração de um dado descarregamento efetuado pela refinaria para alimentação do duto e um custo unitário que tem seu valor determinado para cada localidade do sistema.

As parcelas dos custos de transferência são referentes aos custos de bombeamento e aos de transição entre produtos.

O custo de bombeamento pode ser contabilizado de diversas formas. Inicialmente, onde somente o problema de *scheduling* é tratado, esta parcela é representada pelo produto formado pelo custo unitário de envio para cada produto às bases de distribuição e por suas quantidades enviadas. O custo unitário de bombeamento será tanto maior quanto mais longe a respectiva base estiver localizada da refinaria (Rejowski Jr. e Pinto, 2003). Estes termos são ainda divididos pelo rendimento das estações de bombeamento, que é inicialmente considerado constante quando se assume que o duto é operado a uma vazão fixa ao longo do horizonte de tempo operacional. Posteriormente, é descrito o caso em que o rendimento das estações de bombeamento varia de acordo com a vazão utilizada.

A parcela do custo mais difícil de ser contabilizada é sem dúvida a composta pelos custos de transição. Assim como no trabalho realizado por Joly (1999), será fixado um custo para cada interface presente no duto. Este custo representa perdas de produto dentro do duto, bem como o tratamento da interface formada por diferentes produtos, que é realizado nas bases de distribuição.

De todas as parcelas do custo global da operação, a única ilustrada é o custo de transferência, segundo a tabela 3.6. Estes valores servem de base para a estimativa dos parâmetros componentes das outras parcelas do custo total. Cabe ressaltar que a tarifa mostrada na tabela 3.6 é contabilizada sem os impostos e inclui o transporte pelo duto e a utilização da tancagem no destino.

Tabela 3.6 - Custos de bombeamento dos produtos para cada base de distribuição

<i>Origem</i>	<i>Destino</i>	<i>Produto</i>	<i>Tarifa [R\$/m<sup>3</sup>]</i>
REPLAN	Rib. Preto	Claros	8,17
REPLAN	Uberaba	Claros	13,20
REPLAN	Uberlândia	Claros	15,30
REPLAN	Uberlândia	GLP	17,96
REPLAN	Goiânia	Claros	26,37
REPLAN	Goiânia	GLP	28,31
REPLAN	Brasília	Claros	27,62

Fonte: <http://www.petrobras.com.br>

A Petrobras define produtos claros como a gasolina, o óleo diesel e a QAV.



### 3.7. *Sumário*

Ficam assim descritas as principais características de todo o sistema operacional citado anteriormente. Por se tratar de um problema complexo e de grande porte, este capítulo torna-se essencial para a correta interpretação dos modelos matemáticos a serem propostos no próximo capítulo para a otimização do referido complexo operacional. São ainda descritas as principais variáveis de decisão dos aspectos hidráulicos da operação dutoviária, a saber: as configurações adotadas pelas estações de bombeamento e o seqüenciamento dos produtos dentro da linha dutoviária.

O sistema possui apenas um duto como meio de transporte de derivados, o que torna esta operação de distribuição peculiar quando comparada a outras. É interessante salientar que a operação torna-se crítica, em termos de estocagem de produtos e de atendimento das demandas dos mesmos nas bases de distribuição dos derivados. Se o sistema fosse composto por dutos dedicados a cada produto, os estoques em todos os subsistemas conectados a ele seriam operados e controlados mais facilmente. No entanto, esta opção implica em um custo de investimento elevado.

## **4. Modelagem do problema de distribuição dutoviária de derivados de petróleo**

### *4.1. Introdução*

Neste capítulo são descritas as metodologias utilizadas para a modelagem do problema descrito no capítulo anterior. Para o presente caso, é desenvolvida uma formulação generalizada em relação à proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003).

O modelo matemático a ser apresentado tem o objetivo de retratar o comportamento adequado que uma refinaria, um duto e as bases de distribuição devem possuir durante a operação de transporte dos referidos produtos. Cabe ressaltar que neste trabalho o sistema dutoviário em questão opera em modo intermitente. Trabalhos como os de Más e Pinto (2003), Magalhães e Shah (2003) e Cafaro e Cerda (2004) apresentam exemplos interessantes de sistemas de transporte em regime ininterrupto de operação.

Finalmente, evidencia-se que esta formulação generalizada retrata a operação intermitente de dutos e que, diferentemente dos poucos trabalhos encontrados até o presente momento, ela permite paralisações no decorrer da operação de distribuição dos derivados em um ou mais segmentos do duto.

### *4.2 Hipóteses dos modelos de scheduling*

Para a formulação matemática proposta, as hipóteses consideradas para o sistema operacional em questão são:

**H1** - Os fluidos envolvidos nesta operação possuem densidades constantes.

**H2** - A refinaria é a única produtora destes produtos.

**H3** - O perfil de produção de cada produto na refinaria ao longo do horizonte de tempo operacional é conhecido.

**H4** - Os tanques de cada produto presentes na refinaria são dedicados somente ao duto.

**H5** - Para o sistema de modo geral, tanto na refinaria quanto nas bases, os tanques são tratados como capacidades agregadas com relação a um determinado produto.

**H6** - Somente um tanque da refinaria pode estar conectado ao duto em um dado instante de tempo.

**H7** - O duto possui fluxo unidirecional e somente a refinaria o alimenta com os produtos envolvidos nesta operação de transporte.

**H8** – O duto opera de modo intermitente. O mesmo opera com vazões de operação fixas e conhecidas durante todo o horizonte de tempo.

**H9** – Inicialmente, todos os segmentos do duto estão totalmente preenchidos, assim como durante e ao término da operação.

**H10** - Somente um tanque em cada base pode estar conectado ao duto em um dado instante de tempo.

**H11** – O tempo de *setup* (troca de tanques) em todas as localidades do sistema não é considerado.

**H12** - Toda e qualquer interface de produtos presente no duto pode ser recebida e posteriormente tratada em qualquer base conectada ao mesmo.

**H13** - Em qualquer instante, qualquer tanque do depósito pode estar conectado ao mercado consumidor correspondente e simultaneamente ao duto.

**H14** - Os valores para as demandas de produtos em cada mercado consumidor de uma respectiva base são fornecidos para o horizonte de tempo e devem ser exatamente atendidos pelas bases de distribuição correspondentes.

**H15** - Durante o horizonte de tempo de operação, os valores para todos os coeficientes de custos envolvidos são conhecidos.

A hipótese **H1** permite representar os balanços de massa do sistema em base volumétrica.

Para os produtos envolvidos nesta operação, vale salientar que como consequência da hipótese **H2** a refinaria é a única unidade produtora que supre os mercados consumidores com os produtos envolvidos na operação de transporte.

Segundo **H3**, os modelos tratam o perfil de produção como um parâmetro ao longo do horizonte de operação que é fornecido pela refinaria. Desta maneira, cabe à formulação proposta elaborar o melhor ordenamento de descarregamento dos produtos para o duto, a fim de que o gerenciamento ótimo dos custos operacionais seja alcançado. A refinaria também pode se dedicar a outros mercados consumidores, que não sejam aqueles abastecidos pelo duto.

De acordo com a hipótese **H4**, o duto se torna o único meio de transporte dos produtos para as bases de distribuição.

A hipótese **H5** impõe que os modelos matemáticos devem tratar os tanques em cada subsistema como capacidades agregadas. Esta hipótese pode muito bem representar um sistema real desde que apenas um tanque de cada produto seja dedicado ao duto em um dado instante de

tempo, segundo **H6** e **H9**. A ausência destas restrições implicaria no envio/recebimento do produto de/em diversos tanques ao mesmo tempo através do mesmo duto, o que não é desejável em termos operacionais.

A hipótese **H7** determina que o duto possui fluxo unidirecional e somente a refinaria o alimenta com os produtos a serem transportados. A hipótese **H8** postula que a operação se dá em modo intermitente. Esta hipótese ainda afirma que o duto opera com uma vazão fixa e conhecida durante todo o horizonte de tempo. Cabe ressaltar que esta condição é válida somente para a formulação apresentada neste capítulo. Em capítulos posteriores desta tese, esta condição é alterada permitindo que o duto apresente variações nas suas vazões durante a operação de envio dos derivados.

Segundo **H9**, todo e qualquer segmento do duto deve sempre permanecer totalmente preenchido durante a transferência de derivados, o que de fato ocorre na situação prática. A hipótese **H10** é análoga a **H6**, neste caso para os tanques de recebimento de produtos.

A hipótese **H11** determina que os tempos de troca ou de *setup* entre um tanque e outro não sejam considerados uma vez que estes são tratados como capacidades agregadas, segundo **H5**.

A hipótese **H12** postula que é permitido a qualquer base o recebimento de interfaces dos produtos, embora em uma situação real nem todas elas possuam unidades para separação e tratamento destas parcelas contaminadas, que são inevitáveis neste tipo de operação de transporte de produtos.

Os mercados consumidores podem receber todos os produtos ao mesmo tempo, segundo a hipótese **H13**. Esta operação é diferente das citadas anteriormente, pois os tanques dos depósitos possuem múltiplos meios de transporte, o que confere maior flexibilidade do que o sistema refinaria-bases. Os custos de bombeamento e transporte destas bases não são considerados nos modelos propostos.

A hipótese **H14** considera as demandas como parâmetros conhecidos para cada derivado e que a operação de envio de produtos deve satisfazer o seu exato valor que é determinado para cada produto. Esta hipótese pode ser alterada dependendo do contexto operacional do sistema. No caso de os mercados consumidores determinarem valores mínimos a serem atendidos, o montante de produtos enviados pelas respectivas bases de distribuição deve ser maior ou igual às demandas mínimas estabelecidas. O trabalho realizado por Escudero et al. (1999) trata as demandas como variáveis. O sistema então deve atender a estes requerimentos de modo a minimizar todos os custos envolvidos nesta operação. Além de conhecidas, as demandas não

possuem datas de entrega, ou seja, todas elas devem ser satisfeitas até o instante de tempo correspondente ao horizonte de tempo operacional.

A seguir são apresentadas as metodologias para a modelagem do sistema dutoviário descrito no capítulo 3 utilizando a representação de tempo discreta.

### 4.3. Notação

A nomenclatura para a formulação proposta é dada a seguir. Cabe ressaltar que todas as variáveis contínuas apresentadas para esta formulação assumem valores reais positivos não nulos.

#### *Índices e Conjuntos*

$d=1, \dots, D$	depósitos ou segmentos do duto
$D_c$	conjunto de segmentos que apresentam o mesmo diâmetro com relação ao seu subsequente
$DC_{p,d,r}$	conjunto de produtos $p$ e depósitos $d$ que pertencem a uma dada situação operacional $r$
$PD_d$	conjunto de produtos que são armazenados no depósito $d$
$FS_{p,p'}$	conjunto de seqüências proibidas entre os produtos $p$ e $p'$
$i=1, \dots, I$	lotes de produção enviados pela refinaria
$k=1, \dots, K$	intervalos de tempo
$KP_i$	conjunto de intervalos de tempo que recebem o lote de produção $i$
$l=1, \dots, L_d$	lotes que compõem o segmento $d$
$p=1, \dots, P$	produtos
$r=1, \dots, R$	situações operacionais
$TS_{p,p'}$	conjunto de todas as seqüências permitidas entre os produtos $p$ e $p'$

#### *Parâmetros*

$CED_{p,d}$	custo unitário de estocagem do produto $p$ no depósito $d$
-------------	--

$CER_p$	custo unitário de estocagem do produto $p$ na refinaria
$CONTACT_{p,p'}$	custo de transição entre os produtos $p$ e $p'$
$CP_{p,d,k}$	custo unitário de bombeamento do produto $p$ para o depósito $d$ no intervalo de tempo $k$
$DEM_{p,d}$	demanda do produto $p$ no mercado consumidor que é abastecido pelo depósito $d$
$H$	horizonte de tempo operacional
$K_d$	número de intervalos de tempo para os produtos percorrerem ininterruptamente o segmento $d$
$L_d$	número de lotes no segmento $d$
$LMAX_{p,d}$	lote do segmento $d$ mais próximo do respectivo depósito que contenha o produto $p$ no início da operação
$LMIN_{p,d}$	lote do segmento $d$ mais distante do respectivo depósito que contenha o produto $p$ no início da operação
$RP_{p,i,k}$	vazão do lote de produção $i$ composto pelo produto $p$ enviado pela refinaria aos seus tanques no intervalo de tempo $k$
$U_d$	volume dos lotes do segmento $d$
$UM_{p,d,k}$	limite superior para a vazão do produto $p$ que é enviado ao mercado consumidor abastecido pelo depósito $d$ no intervalo de tempo $k$
$VDMAX_{p,d,k}$	capacidade máxima de armazenamento do produto $p$ no depósito $d$ no intervalo de tempo $k$
$VDMIN_{p,d,k}$	capacidade mínima de armazenamento do produto $p$ no depósito $d$ no intervalo de tempo $k$
$VDZERO_{p,d}$	volume inicial do produto $p$ armazenado pelo depósito $d$
$VRMAX_{p,k}$	capacidade máxima de armazenamento do produto $p$ na refinaria no intervalo de tempo $k$
$VRMIN_{p,k}$	capacidade mínima de armazenamento do produto $p$ na refinaria no intervalo de tempo $k$

$VRZERO_p$	quantidade estocada na refinaria do produto $p$ no início da operação
$XDC_{d,r}$	1 se ao longo da operação de envio de produtos o depósito $d$ necessita retirar do duto qualquer produto que esteja contido no conjunto $DC_{p,d,r}$ ; 0 em caso contrário
$XDMIN_{p,d}$	número mínimo de intervalos de tempo que a base $d$ deve se conectar ao duto para retirar o produto $p$
$XSMIN_{d,r}$	número mínimo de vezes que o segmento $d$ deve ser acionado ao longo da operação de acordo com a operação $r$
$XVMIN_{p,d}$	número mínimo de intervalos de tempo necessário para que o produto $p$ chegue ao depósito $d$ do seu lote mais próximo/distante duração dos intervalos de tempo
$XVZERO_{p,d,l}$	1 se o produto $p$ ocupa o lote $l$ do segmento $d$ no início da operação
$TINI_{p,p',l}^d$	1 se a interface formada entre o produto $p$ e $p'$ no lote $l$ do segmento $d$ é detectada no início da operação
$\eta_k$	rendimento das estações de bombeamento no intervalo de tempo $k$
$\delta$	duração dos intervalos de tempo na representação discreta do tempo

#### *Variáveis Binárias*

$XD_{p,d,k}$	1 se o depósito $d$ recebe o produto $p$ no intervalo de tempo $k$
$XR_{p,k}$	1 se a refinaria descarrega o produto $p$ para o duto no intervalo de tempo $k$
$XT_{p,d,k}$	1 se o produto $p$ é enviado ao segmento $d$ no intervalo de tempo $k$
$XW_{p,d,k}$	1 se o lote $L_d$ do segmento $d$ que contém o produto $p$ é dividido entre o depósito $d$ e o segmento $d+1$ no intervalo de tempo $k$

#### *Variáveis Booleanas*

$Y_{d,k}$	verdadeira se o segmento do duto $d$ opera no intervalo de tempo $k$
$Z_{d,k}$	verdadeira se qualquer produto contido no último lote do segmento $d$ é enviado simultaneamente para a respectiva base e para o segmento $d+1$ no intervalo de tempo $k$

### *Variáveis Contínuas*

$C$	custos operacionais a serem minimizados
$TY_{p,p',k}^d$	indica se o produto $p$ sucede o produto $p'$ no segmento $d$ no intervalo de tempo $k$
$VD_{p,d,k}$	volume estocado do produto $p$ no depósito $d$ no intervalo de tempo $k$
$VOD_{p,d,k}$	volume do produto $p$ que é recebido pelo depósito $d$ proveniente do duto no intervalo de tempo $k$
$VOM_{p,d,k}$	volume do produto $p$ que é enviado do depósito $d$ ao seu respectivo mercado consumidor no intervalo de tempo $k$
$VOR_{p,k}$	volume do produto $p$ que é descarregado da refinaria para o duto no intervalo de tempo $k$
$VOT_{p,d+1,k}$	volume do produto $p$ que é enviado ao segmento $d+1$ no intervalo de tempo $k$
$VR_{p,k}$	volume do produto $p$ estocado na refinaria no intervalo de tempo $k$
$XS_{d,k}$	1 se o segmento $d$ do duto está em operação no intervalo de tempo $k$
$XV_{p,l,k}^d$	1 se o lote $l$ do segmento $d$ contém o produto $p$ no intervalo de tempo $k$

#### *4.4. Fundamentos da Formulação Matemática*

Um segmento genérico  $d$  de um duto pode ser definido como o trecho dutoviário compreendido entre a base de distribuição  $d-1$  e a base  $d$ . Exceção se faz ao primeiro segmento do mesmo, que se localiza entre a refinaria e a primeira base de distribuição.

A figura 4.1 mostra um sistema dutoviário com  $D$  bases de distribuição conectadas em série e uma possível configuração para os segmentos  $d$  e  $d+1$ . Cada segmento  $d$  é composto por  $L_d$  lotes de capacidade volumétrica  $U_d$  e cada lote possui apenas um produto no seu interior em um dado instante de tempo. A entrada de um volume  $VOT_{p,d,k}$  do produto  $p$  no segmento  $d$  no instante  $k$  implica o deslocamento do produto que está contido dentro do primeiro lote para o seguinte. O mesmo acontece com os demais lotes do mesmo segmento. Para esta configuração, uma quantidade igual de produto deve ser destinada à base de distribuição ( $VOD_{p,d,k}$ ) ou ao segmento



$d+1$  ( $VOT_{p,d+1,k}$ ). A ausência de alimentação do segmento  $d$  no instante  $k$  implica a manutenção do conteúdo de produtos dos lotes pertencentes ao mesmo.

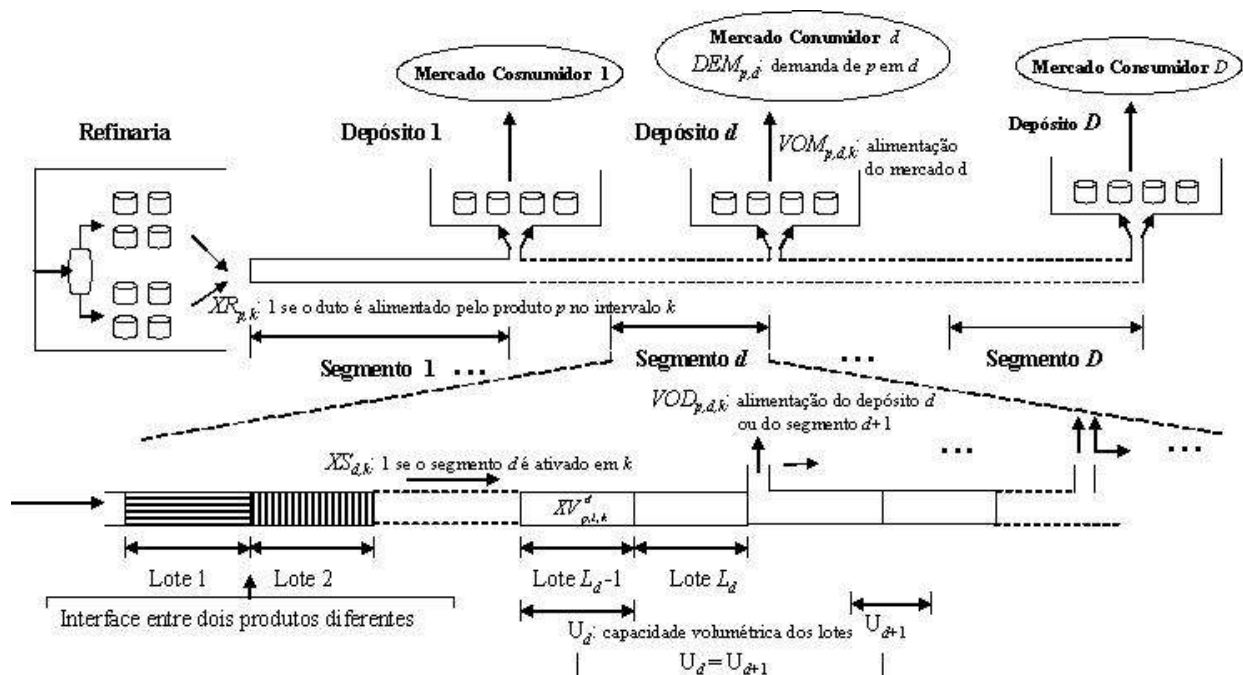


Figura 4.1 – Ilustração de lotes de produtos em um determinado segmento  $d$  do duto

A figura 4.2 ilustra uma configuração para sistemas dutoviários quando os lotes do segmento  $d$  e do  $d+1$  possuem diferentes capacidades, sendo que os lotes do segmento  $d$  possuem uma capacidade volumétrica maior em relação aos do segmento  $d+1$ . Essa configuração resulta da redução no diâmetro do segmento  $d+1$  em relação ao diâmetro do segmento  $d$ , ou de uma redução de capacidade volumétrica. Essa configuração ainda permite que dois depósitos sejam alimentados pelo duto simultaneamente. O produto contido no lote  $L_d$  do segmento  $d$  pode ser integralmente enviado para a sua respectiva base ( $XD_{p,d,k}$ ), ou então pode ser enviado para o segmento  $d+1$  ( $XW_{p,d,k}$ ) simultaneamente. Assim como na configuração descrita na figura 4.1, se os segmentos não estiverem em operação, os produtos se mantêm nos lotes em que estavam anteriormente alocados.

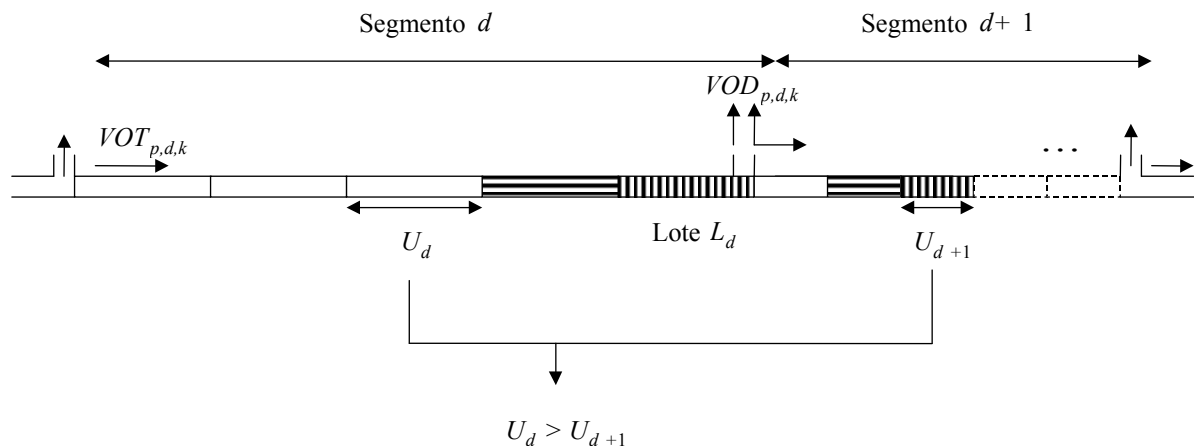


Figura 4.2 – Sistema dutoviário de segmentos compostos por lotes de diferentes capacidades

Os modelos descritos neste capítulo utilizam a representação discreta dos intervalos de tempo. Na representação de tempo discreto a duração dos intervalos de tempo é dada pelo máximo divisor comum dos tempos de processamento de uma operação do problema (Maravelias e Grossmann, 2003). Note que para o presente caso, este parâmetro deve ser ajustado conforme os valores de vazão de operação do duto e das capacidades volumétricas dos lotes dos seus segmentos.

Maiores detalhes dos fundamentos desta formulação são encontrados no trabalho desenvolvido por Rejowski Jr. (2001), que explica os fundamentos de formulações matemáticas para sistemas dutoviários, bem como ilustra formulações matemáticas para diversas configurações destes sistemas operacionais.

A seguir é apresentada a versão generalizada da formulação MILP para sistemas dutoviários proposta inicialmente por Rejowski Jr. e Pinto (2003) baseada em lógica disjuntiva (Raman e Grossmann, 1994).

#### 4.5. Formulação

A formulação MILP apresentada neste item é uma versão generalizada da proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003). A função objetivo do modelo é apresentada pela equação (4.1).

$$\begin{aligned}
\text{Min } C = & \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{p=1}^P CER_p \cdot VR_{p,k} + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D CED_{p,d} \cdot VD_{p,d,k} \right] \cdot \delta + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K \frac{CP_{p,d,k} \cdot XD_{p,d,k}}{\eta_k} \cdot U_d + \\
& \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K \frac{CP_{p,d,k} \cdot XW_{p,d,k}}{\eta_k} \cdot (U_d - U_{d+1}) + \sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K CONTACT_{p,p'} \cdot TY_{p,p',k}^d
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Os dois primeiros termos contabilizam os custos de estocagem na refinaria e nas bases, respectivamente. Estes são compostos pelo custo unitário, pelas quantidades estocadas nas localidades conectadas ao duto e pela duração  $\delta$  dos intervalos de tempo em que elas são estocadas. Note que a linearidade destes termos é mantida devido à utilização da representação discreta do tempo. Caso uma representação contínua fosse utilizada, a duração dos intervalos de tempo seria variável, o que caracterizaria a formulação como não linear e não convexa, devido aos termos bilineares formados pelo produto dos volumes dos produtos estocados e a duração dos intervalos de tempo.

Os dois termos seguintes representam os custos de bombeamento. Note que estes são compostos pelo custo unitário de bombeamento, e pelas quantidades que são entregues em cada depósito, que no caso são formadas pelas variáveis  $XD_{p,d,k}$  e  $XW_{p,d,k}$ , pelos parâmetros  $U_d$  e pela diferença entre este último e a capacidade volumétrica dos lotes do segmento subsequente  $U_{d+1}$ . Ambos os termos ainda são divididos pelos rendimentos utilizados pelas estações de bombeamento. O rendimento das estações de bombeamento é adotado como um parâmetro da operação dutoviária devido à utilização da representação discreta do tempo, que impõe ao duto uma operação com vazões fixas, segundo a hipótese **H8**. Note que a variável binária  $XD_{p,d,k}$  corresponde à entrega da quantidade integral do produto contido no último lote do segmento para a respectiva base, enquanto a variável  $XW_{p,d,k}$  indica uma entrega parcial, pois parte do conteúdo presente no último lote do segmento é direcionada simultaneamente para o segmento subsequente. Estas variáveis ainda retratam os custos de bombeamento na origem.

Finalmente, a última parcela dos custos operacionais representa os custos de interface. Esta parcela é composta pela variável  $TY_{p,p',k}^d$ , que detecta as interfaces entre os produtos  $p$  e  $p'$ , e pelo parâmetro  $CONTACT_{p,p'}$ , que representa os custos de interface entre estes produtos.

A seguir são apresentadas as restrições pertinentes à operação dos tanques da refinaria.

#### 4.5.1. Restrições da refinaria

A figura 4.3 mostra um perfil de produção típico de uma refinaria. Diversos lotes ( $i$ ) que são compostos por um único produto  $p$  são enviados aos tanques com as suas respectivas quantidades e composições definidas *a priori*. As vazões dos lotes enviados são representadas pelo parâmetro  $RP_{i,p,k}$ . Note pela figura 4.3 que os tanques da refinaria devem satisfazer tanto as temporizações dos lotes de produção que são enviados pela refinaria como as dos possíveis descarregamentos efetuados para o duto. Outro aspecto importante é que a representação discreta do tempo não necessita definir variáveis de temporização para esta sincronização de atividades, fato que a caracteriza como uma formulação intuitiva quando comparada às que utilizam a representação em tempo contínuo. Porém, ela pode requerer um número excessivo de intervalos de tempo para satisfazer a sincronização de ambas as atividades, especialmente quando as durações delas variam de alguns minutos até diversas horas (Moro e Pinto, 2004). Note que todos os intervalos de tempo possuem duração fixa e igual ao parâmetro  $\delta$ .

Os balanços de massa da refinaria são dados pela restrição (4.2). A quantidade estocada do produto  $p$  na refinaria em um dado intervalo de tempo  $k$  é dada pela quantidade inicial estocada ( $VRZERO_p$ ), pelos lotes enviados pela refinaria ( $RP_{i,p,k}$  e  $\delta$ ) e pelos descarregamentos efetuados para o duto ( $VOR_{p,k}$ ). Note que os lotes de produção são contabilizados somente nos intervalos de tempo em que os tanques da refinaria os recebem, de acordo com o conjunto  $KP_i$ . As quantidades estocadas devem respeitar os limites mínimos e máximos impostos pela restrição (4.3). Os descarregamentos efetuados pela refinaria seguem a variável binária  $XR_{p,k}$  e o parâmetro volumétrico  $U_1$ .

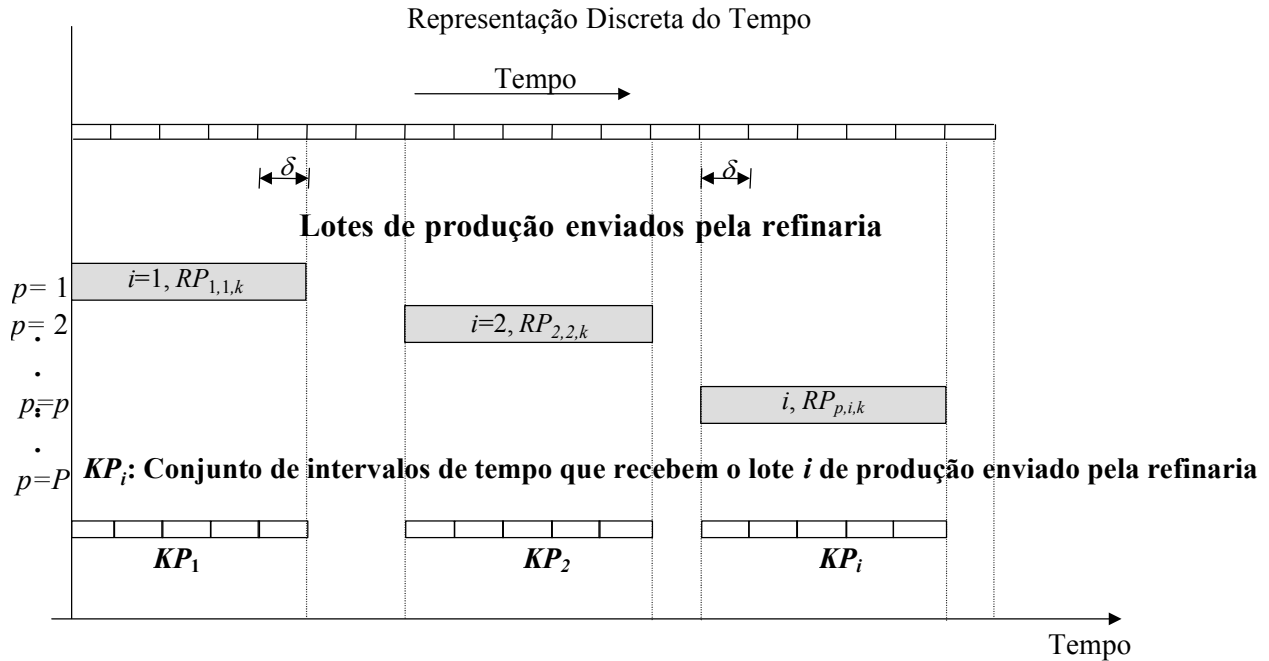


Figura 4.3 – Representação do tempo e perfil de produção da refinaria

$$VR_{p,k} = VRZERO_p + \sum_{i=1}^I \sum_{\substack{k' \in KP_i \\ k' \leq k}} (RP_{p,i,k'} \times \delta) - \sum_{k' \leq k} VOR_{p,k'} \quad \forall p, k \quad (4.2)$$

$$VRMIN_{p,k} \leq VR_{p,k} \leq VRMAX_{p,k} \quad \forall p, k \quad (4.3)$$

$$VOR_{p,k} = XR_{p,k} \times U_d \quad \forall p, k, d=1 \quad (4.4)$$

#### 4.5.2. Restrições do duto

A operação do duto pode ser expressa por disjunções lineares. As variáveis contínuas 0-1  $XV_{p,l,k}^d$  (produto  $p$ , segmento  $d$ , lote  $l$  e intervalo de tempo  $k$ ) são utilizadas para representar a operação do duto.

As disjunções lineares (4.5) representam a operação do primeiro segmento do duto. Estas são similares às propostas por Rejowski Jr. e Pinto (2003); no entanto, estas estão escritas em função das variáveis lógicas  $XV_{p,l,k}^d$ , enquanto os autores as escrevem em função de variáveis volumétricas. Cabe ressaltar que estas variáveis lógicas são incorporadas às disjunções, pois representam de forma mais natural as operações nos segmentos do duto.

Se a variável *Booleana*  $Y_{1,k}$  for verdadeira, o primeiro lote do segmento do duto toma os valores do descarregamento efetuado pela refinaria. Os produtos contidos do primeiro ao

penúltimo lote são deslocados para o lote seguinte, enquanto o que estava contido no último lote deve ser transferido para a primeira base ( $XD_{p,1,k}$ ) ou para o segundo segmento ( $XT_{p,2,k}$ ). Em caso de  $Y_{1,k}$  ser falsa, os lotes mantêm os seus produtos e tanto a primeira base como o segundo segmento não recebem nenhum produto.

$$\left[ \begin{array}{c} Y_{1,k} \\ XV_{p,1,1}^1 = XR_{p,k} \quad \forall p \\ XV_{p,l,1}^1 = XVZERO_{p,1,l-1} \quad \forall p, l = 2, \dots, L_1 \\ XD_{p,1,k} + XT_{p,2,k} = XVZERO_{p,1,L_1} \quad \forall p \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{c} \neg Y_{1,k} \\ XV_{p,1,1}^1 = XVZERO_{p,1,1} \quad \forall p \\ XV_{p,l,1}^1 = XVZERO_{p,1,l} \quad \forall p, l = 2, \dots, L_1 \\ XD_{p,1,k} + XT_{p,2,k} = 0 \quad \forall p \end{array} \right] \quad k=1 \quad (4.5a)$$

$$\left[ \begin{array}{c} Y_{1,k} \\ XV_{p,1,k}^1 = XR_{p,k} \quad \forall p \\ XV_{p,l,k}^1 = XV_{p,l-1,k-1}^1 \quad \forall p, l = 2, \dots, L_1 \\ XD_{p,1,k} + XT_{p,2,k} = XV_{p,L_1,k-1}^1 \quad \forall p \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{c} \neg Y_{1,k} \\ XV_{p,1,k}^1 = XV_{p,l,k-1}^1 \quad \forall p \\ XV_{p,l,k}^1 = XV_{p,l,k-1}^1 \quad \forall p, l = 2, \dots, L_1 \\ XD_{p,1,k} + XT_{p,2,k} = 0 \quad \forall p \end{array} \right] \quad k=2, \dots, K \quad (4.5b)$$

As disjunções (4.6) são referentes a todos os segmentos do duto, com exceção do primeiro, do último e dos que não possuam reduções nos valores dos seus diâmetros, ou seja, que pertençam ao conjunto  $D_c$ . A única diferença em relação às disjunções (4.5) se encontra na composição do primeiro lote em caso de a variável *Booleana*  $Y_{d,k}$  ser verdadeira. No caso, a composição do primeiro lote destes segmentos deve assumir os valores das variáveis binárias de alimentação do respectivo segmento  $d$ , dadas por  $XT_{p,d,k}$ .

$$\left[ \begin{array}{c} Y_{d,k} \\ XV_{p,1,k}^d = XT_{p,d,k} \quad \forall p \\ XV_{p,l,k}^d = XVZERO_{p,d,l-1} \quad \forall p, l = 2, \dots, L_d \\ XD_{p,d,k} + XT_{p,d+1,k} = XVZERO_{p,d,L_d} \quad \forall p \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{c} \neg Y_{d,k} \\ XV_{p,1,k}^d = XVZERO_{p,d,1} \quad \forall p \\ XV_{p,l,k}^d = XVZERO_{p,d,l} \quad \forall p, l = 2, \dots, L_d \\ XD_{p,d,k} + XT_{p,d+1,k} = 0 \quad \forall p \end{array} \right] \quad d=2, \dots, D-1, d \in D_c, k=1 \quad (4.6a)$$

$$\left[ \begin{array}{c} Y_{d,k} \\ XV_{p,1,k}^d = XT_{p,d,k} \\ XV_{p,l,k}^d = XV_{p,l-1,k-1}^d \\ XD_{p,d,k} + XT_{p,d+1,k} = XV_{p,L_d,k-1}^d \end{array} \quad \forall p \right] \vee \left[ \begin{array}{c} -Y_{d,k} \\ XV_{p,1,k}^d = XV_{p,1,k-1}^d \\ XV_{p,l,k}^d = XV_{p,l,k-1}^d \\ XD_{p,d,k} + XT_{p,d+1,k} = 0 \end{array} \quad \forall p, l = 2, \dots, L_d \right]$$

(4.6b)

As disjunções (4.7) se referem à operação do último segmento do duto. A única diferença em relação às disjunções (4.6) ocorre no último termo. No caso, o produto contido no último lote só pode ser enviado para a última base que é conectada ao duto ( $XD_{p,D,k}$ ).

$$\left[ \begin{array}{c} Y_{d,k} \\ XV_{p,1,k}^d = XT_{p,d,k} \\ XV_{p,l,k}^d = XVZERO_{p,d,l-1} \\ XD_{p,d,k} = XVZERO_{p,d,L_d} \end{array} \quad \forall p \right] \vee \left[ \begin{array}{c} -Y_{d,k} \\ XV_{p,1,k}^d = XVZERO_{p,d,1} \\ XV_{p,l,k}^d = XVZERO_{p,d,l} \\ XD_{p,d,k} = 0 \end{array} \quad \forall p, l = 2, \dots, L_d \right]$$

(4.7a)

$$\left[ \begin{array}{c} Y_{d,k} \\ XV_{p,1,k}^d = XT_{p,d,k} \\ XV_{p,l,k}^d = XV_{p,l-1,k-1}^d \\ XD_{p,d,k} = XV_{p,L_d,k-1}^d \end{array} \quad \forall p \right] \vee \left[ \begin{array}{c} -Y_{d,k} \\ XV_{p,1,k}^d = XV_{p,1,k-1}^d \\ XV_{p,l,k}^d = XV_{p,l,k-1}^d \\ XD_{p,d,k} = 0 \end{array} \quad \forall p, l = 2, \dots, L_d \right]$$

(4.7b)

As disjunções embutidas (4.8) se referem à operação de um segmento  $d'$  que possui um diâmetro maior em relação ao seu subsequente  $d'+1$  e consideram que os seus lotes possuem capacidades distintas, conforme mostra a figura 4.2. Essa configuração permite que o duto alimente mais de uma base simultaneamente (Rejowski Jr. e Pinto, 2003).

$$\left[ \begin{array}{c} Y_{d',k} \\ XV_{p,1,1}^{d'} = XT_{p,d',1} \\ XV_{p,l,1}^{d'} = XVZERO_{p,d',l-1} \\ \left[ \begin{array}{c} Z_{d',k} \\ XV_{p,1,1}^{d'+1} = XVZERO_{p,d',L_{d'}} \\ XV_{p,d',k} = XVZERO_{p,d',L_{d'}} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{c} -Z_{d',k} \\ XV_{p,1,1}^{d'+1} = XVZERO_{p,d'+1,1} \\ XD_{p,d',k} = XVZERO_{p,d',L_{d'}} \end{array} \right] \end{array} \quad \forall p \right] \vee \left[ \begin{array}{c} -Y_{d',k} \\ XV_{p,1,1}^{d'} = XVZERO_{p,d',1} \\ XV_{p,l,1}^{d'} = XVZERO_{p,d',l} \\ XD_{p,d',1} = 0 \end{array} \quad \forall p, l = 2, \dots, L_{d'} \right]$$

$$d' < D, d' \notin D_c, k=1 \quad (4.8a)$$

$$\left[ \begin{array}{c} Y_{d',k} \\ \forall p \\ \forall p, l = 2, \dots, L_{d'} \\ \forall p \\ \forall p \end{array} \left[ \begin{array}{c} XW_{p,1,k}^{d'} = XT_{p,d',k} \\ XW_{p,l,k}^{d'} = XW_{p,l-1,k-1}^{d'} \\ \left[ \begin{array}{c} Z_{d',k} \\ XW_{p,1,k}^{d'+1} = XW_{p,L_{d'},k-1}^{d'} \\ XW_{p,d',k} = XW_{p,L_{d'},k-1}^{d'} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{c} -Z_{d',k} \\ XW_{p,1,k}^{d'+1} = XW_{p,1,k-1}^{d'+1} \\ XD_{p,d',k} = XW_{p,L_{d'},k-1}^{d'} \end{array} \right] \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{c} -Y_{d',k} \\ XW_{p,1,k}^{d'} = XW_{p,1,k-1}^{d'} \\ XW_{p,l,k}^{d'} = XW_{p,l,k-1}^{d'} \\ XD_{p,d',k} = 0 \end{array} \right] \right] \quad (4.8b)$$

Para o presente caso, as relações lógicas são dadas pelas variáveis *Booleanas*  $Y_{d',k}$  e  $Z_{d',k}$ . A primeira indica se o segmento  $d'$  está em operação ou não, enquanto a última denota se o produto contido no último lote  $L_{d'}$  é enviado parcialmente para o segmento  $d'+1$  e para a base ( $XW_{p,d',k}$ ). Se esta variável *Booleana* for falsa, este produto é integralmente enviado para a respectiva base ( $XD_{p,d',k} = XW_{p,L_{d'},k-1}^{d'}$ ) caso o segmento  $d'$  esteja operando ( $Y_{d',k}$ ) e desta forma, o segmento  $d'+1$  não entra em operação. Se ambas as variáveis forem falsas os lotes mantêm os seus produtos e os segmentos  $d'$  e  $d'+1$  não transferem nenhum produto.

Uma representação mista-inteira é proposta para as disjunções apresentadas. Ela se baseia na formulação *convex hull* (casca convexa) (Raman e Grossmann, 1994). Esta gera uma formulação com um número maior de variáveis quando comparada às formulações intuitivas *Big-M*, porém os valores dos problemas relaxados são mais próximos da solução ótima e essa característica é determinante para o melhor desempenho computacional de modelos que apresentem um número elevado de variáveis e equações (Vecchiotti et al., 2003).

Finalmente, associam-se as variáveis  $Y_{d,k}$  às variáveis lógicas  $XS_{d,k}$  que assumem valores iguais a 1 no caso de o segmento  $d$  estar operando no intervalo de tempo  $k$ , enquanto a variável  $Z_{d',k}$  é desagregada nas variáveis binárias  $XW_{p,d',k}$  e  $XD_{p,d',k}$ .

A conversão das disjunções (4.5), (4.6), (4.7) e (4.8) em restrições mistas-inteiras é dada a seguir. A formulação ainda mostra a operação dos depósitos (restrições (4.29) a (4.32)). A operação do duto é dada segundo as restrições (4.9) a (4.28).

### Operação do Duto

#### *Operação intermitente e integridade dos lotes*



$$\sum_{p=1}^P XR_{p,k} = XS_{d,k} \quad \forall d=1, k \quad (4.9)$$

$$XS_{d,k} \leq 1 \quad \forall d, k \quad (4.10)$$

$$\sum_{p=1}^P XV_{p,l,k}^d = 1 \quad \forall d, l, k \quad (4.11)$$

*Primeiro lote do primeiro segmento*

$$XV_{p,l,k}^d \geq XR_{p,k} \quad \forall p, d=1, l=1, k \quad (4.12)$$

*Transferência de produtos*

$$XV_{p,l,k}^d \geq XVZERO_{p,d,l-1} - [1 - XS_{d,k}] \quad \forall p, d, l=2, \dots, L_d, k=1 \quad (4.13a)$$

$$XV_{p,l,k}^d \geq XV_{p,l-1,k-1}^d - [1 - XS_{d,k}] \quad \forall p, d, l=2, \dots, L_d, k=2, \dots, K \quad (4.13b)$$

*Parada dos segmentos do duto*

$$XV_{p,l,k}^d \geq XVZERO_{p,d,l} - XS_{d,k} \quad \forall p, d, l, k=1 \quad (4.14a)$$

$$XV_{p,l,k}^d \geq XV_{p,l,k-1}^d - XS_{d,k} \quad \forall p, d, l, k=2, \dots, K \quad (4.14b)$$

*Alimentação do primeiro ao penúltimo depósitos ou dos seus segmentos subseqüentes*

$$\sum_{p=1}^P [XT_{p,d,k} + XW_{p,d-1,k}] = XS_{d,k} \quad \forall k, d=2, \dots, D \quad (4.15)$$

$$XD_{p,d,k} + XT_{p,d+1,k} + XW_{p,d,k} \geq XVZERO_{p,d,L_d} - [1 - XS_{d,k}] \quad \forall p, d < D, k=1 \quad (4.16a)$$

$$XD_{p,d,k} + XT_{p,d+1,k} + XW_{p,d,k} \geq XV_{p,L_d,k-1}^d - [1 - XS_{d,k}] \quad \forall p, d < D, k=2, \dots, K \quad (4.16b)$$

$$VOD_{p,d,k} = XD_{p,d,k} \times U_d + XW_{p,d,k} \times [U_d - U_{d+1}] \quad \forall p, d < D, k \quad (4.17)$$

$$VOT_{p,d+1,k} = XT_{p,d+1,k} \times U_{d+1} \quad \forall p, d < D, k \quad (4.18)$$

$$\sum_{p=1}^P [XD_{p,d,k} + XT_{p,d+1,k} + XW_{p,d,k}] = XS_{d,k} \quad \forall k, d < D \quad (4.19)$$

*Alimentação do último depósito*

$$XD_{p,d,k} \geq XVZERO_{p,d,L_d} - [1 - XS_{d,k}] \quad \forall p, d=D, k=1 \quad (4.20a)$$

$$XD_{p,d,k} \geq XV_{p,L_d,k-1}^d - [1 - XS_{d,k}] \quad \forall p, d=D, k=2, \dots, K \quad (4.20a)$$

$$\sum_{p=1}^P [XD_{p,d,k}] = XS_{d,k} \quad \forall k, d=D \quad (4.21)$$

$$VOD_{p,d,k} = XD_{p,d,k} \times U_d \quad \forall p, d=D, k \quad (4.22)$$

*Primeiro lote do segundo ao ultimo segmento*

$$XV_{p,l,k}^d \geq XT_{p,d,k} + XW_{p,d-1,k} \quad \forall p, d > 1, d < D, l=1, k \quad (4.24)$$

*Redução de diâmetro dos segmentos do duto e estoques específicos de cada base*

$$XW_{p,d,k} = 0 \quad \forall p \notin PD_d, d \in D_c, \forall k \quad (4.25)$$

$$XD_{p,d,k} = 0 \quad \forall p \notin PD_d, d, \forall k \quad (4.26)$$

*Restrições de Interface*

$$TY_{p,p',k}^d \geq XV_{p,1,k}^d + XV_{p',2,k}^d - 1 \quad \forall p, p', d \in TS_{p,p'}, \forall k \quad (4.27)$$

$$TY_{p,p',k}^d = 0 \quad \forall p, p', d \in FS_{p,p'}, \forall k \quad (4.28)$$

*Operações dos depósitos*

$$VD_{p,d,k} = VDZERO_{p,d} + \sum_{k' \leq k} (VOD_{p,d,k'} - VOM_{p,d,k'}) \quad \forall p \in PD_d, \forall d, k \quad (4.29)$$

$$VDMIN_{p,d,k} \leq VD_{p,d,k} \leq VDMAX_{p,d,k} \quad \forall p \in PD_d, \forall d, k \quad (4.30)$$

$$VOM_{p,d,k} \leq UM_{p,d,k} \cdot \delta \quad \forall p \in PD_d, \forall d, k \quad (4.31)$$

$$\sum_{k=1}^K VOM_{p,d,k} = DEM_{p,d} \quad \forall p \in PD_d, \forall d, k \quad (4.32)$$

A variável lógica  $XS_{d,k}$  indica se o primeiro segmento do duto está em operação no instante  $k$ , segundo a equação (4.9). O regime de operação dos segmentos do duto se dá de modo descontínuo, segundo a restrição (4.10). Somente um produto deve estar contido em qualquer lote de qualquer segmento, conforme a equação (4.11). Os conteúdos dos lotes do primeiro segmento são dados de acordo com (4.12) e (4.13) em caso de movimentação de produtos e segundo (4.14) quando o mesmo se encontra inativo. Para os demais segmentos a restrição (4.24) deve substituir (4.12). Estes segmentos entram em operação quando a variável  $XS_{d,k}$  é ativada segundo a restrição (4.15). O conteúdo contido no último lote de qualquer segmento que não o último ( $d \neq D$ ) pode ser enviado integralmente para a respectiva base ( $XD_{p,d,k}$ ) ou para o segmento seguinte ( $XT_{p,d+1,k}$ ), ou ainda ele pode ser destinado simultaneamente para ambos quando há uma redução no diâmetro do duto ( $XW_{p,d,k}$ ), segundo as restrições (4.16). Note que as restrições (4.16a) e (4.16b) são ativadas quando a variável  $XS_{d,k}$  assume valores iguais a 1 e que elas correspondem ao produto que está contido no último lote do segmento do duto. As restrições

(4.17) e (4.18) correspondem, nesta ordem, à alimentação da primeira à penúltima base e aos seus respectivos segmentos subsequentes. A restrição (4.19) mostra a ativação dos segmentos subsequentes, que determina que a variável  $XS_{d,k}$  deve assumir valores iguais a 1 no caso de as variáveis  $XT_{p,d,k}$  ou  $XW_{p,d-1,k}$  também assumirem esse valor. As restrições referentes à operação do último segmento (4.15) a (4.19) e alimentação do último depósito (4.20) a (4.22), são similares às dos anteriores; porém, note que o produto contido no último lote só pode ser enviado para a última base, segundo as restrições (4.20) e (4.21). A restrição (4.25) impõe que todas as variáveis  $XW_{p,d,k}$  devem ser iguais a zero quando não há redução de diâmetro na transição de um segmento para o seu subsequente, segundo o conjunto  $D_c$ . Devido ao fato de que nem todos os produtos são estocados em todas as bases, as variáveis  $XD_{p,d,k}$  são iguais a zero, segundo a equação (4.26), para todos os produtos  $p$  que não são armazenados na base  $d$ , segundo o conjunto  $PD_d$ .

As restrições de interface são dadas segundo (4.27) e (4.28). Estas detectam o contato entre dois produtos distintos dentro da linha dutoviária ( $TY_{p,p',k}^d$ ). Esta condição é caracterizada sempre que os dois primeiros lotes de cada segmento armazenam produtos distintos, segundo a restrição (4.27). Os custos são contabilizados de acordo com o parâmetro  $CONTACT_{p,p'}$ . O seqüenciamento restrito do duto é dado pela equação (4.28), onde a variável de detecção de interfaces ( $TY_{p,p',k}^d$ ) assume valor zero sempre que os produtos pertencem ao conjunto de seqüências proibidas  $FS_{p,p'}$ .

Os balanços de massa dos produtos nas bases são dados em base volumétrica de acordo com (4.29). As capacidades máxima e mínima nas bases são impostas segundo a restrição (4.30). A alimentação dos mercados consumidores deve ser limitada segundo os parâmetros  $UM_{p,d,k}$  e  $\delta$ , conforme mostra a restrição (4.31). Finalmente, a restrição (4.32) mostra que as demandas devem ser exatamente atendidas ao final do horizonte de tempo operacional.

Uma característica importante a ser mencionada é que o duto OSBRA da Petrobras, que serve de referência de aplicação para este trabalho, possui somente uma redução de diâmetro do quarto para o quinto segmento. Isto implica que a variável  $XW_{p,d,k}$  só deve ser ativada para  $d=4$ . Para todos os outros segmentos, o conteúdo do último lote só pode ser enviado para a respectiva base, ou para o segmento seguinte, ou seja,  $XW_{p,d,k}$  deve ser igual a zero para qualquer segmento do duto que não o quarto ( $d \neq 4$ ).

#### 4.6. Sumário

Este capítulo mostra uma versão generalizada da formulação proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003), que é baseada em lógica disjuntiva (Raman e Grossmann, 1994) e na representação discreta do tempo. Esta formulação assume que o duto opera em modo intermitente e a uma vazão fixa durante todo o horizonte de tempo operacional. No presente caso, as disjunções originalmente enunciadas por Rejowski Jr. e Pinto (2003), são reescritas em função das variáveis lógicas  $XV_{p,l,k}^d$ .

A busca de uma maior eficiência computacional também se torna fundamental, pois Rejowski Jr. e Pinto (2003) reportam que o modelo possui um grande número de variáveis e equações, quando aplicado ao referido sistema operacional da Petrobras. Neste sentido, o capítulo seguinte ilustra o desenvolvimento de restrições especiais que devem ser incluídas na presente formulação que relacionam a minimização da contaminação dos produtos dentro da linha dutoviária. Desta forma, visando melhorar o desempenho computacional da presente formulação, são propostos cortes inteiros que diminuem a região viável do mesmo. Estes são baseados nas demandas estabelecidas para cada produto em cada depósito e nas suas relações com os preenchimentos iniciais dos seus respectivos segmentos do duto.

## **Capítulo 5. Desenvolvimento de Restrições Especiais e dos Cortes de Entrega**

### *5.1. Introdução*

O modelo descrito no capítulo anterior gera bons resultados quando aplicado a um sistema operacional real. No entanto, dois aspectos devem ainda ser considerados. O primeiro decorre da contaminação dos produtos dentro da linha dutoviária, o que pode ser um fator crítico quando os segmentos do duto possuem interfaces no seu interior e permanecem inoperantes; tal aspecto requer a geração de restrições especiais que impedem tal situação.

O segundo aspecto se refere ao aumento da eficiência computacional do modelo, em que cortes inteiros denominados cortes de entrega são propostos para o referido sistema operacional. Estes estabelecem um número mínimo de vezes que os segmentos do duto devem operar durante a operação de transporte de derivados. Eles são baseados em relações lógicas entre as demandas estabelecidas para os produtos em cada mercado consumidor conectado ao depósito e os preenchimentos iniciais dos respectivos segmentos.

### *5.2. Restrições especiais*

Com o objetivo de minimizar a contaminação dos produtos dentro do duto, um conjunto de restrições adicionais deve ser incluído na formulação proposta no capítulo 4, que impõe uma parada a um dado segmento do duto caso o mesmo contenha somente um derivado ao longo de sua extensão. Essa nova condição operacional é crucial, especialmente quando produtos de baixa viscosidade são transportados em uma única linha dutoviária. O custo da interface formada dentro da linha dutoviária entre dois produtos distintos é medido pelo seu volume, que tende a crescer à medida que os derivados permaneçam em contato enquanto os segmentos do duto permanecem inoperantes. O volume da interface formada ainda depende das propriedades físico-químicas dos produtos. Estes custos são críticos para a operação intermitente de sistemas dutoviários. Atualmente, a Indústria Petrolífera dispõe de uma série de alternativas para a detecção de interfaces em linhas dutoviárias. Sistemas de instrumentação que medem a diferença de densidade entre os produtos e fazem análises ultra-sonográficas (Moro e Pinto, 2004) são os mais utilizados. Grande parte das refinarias adota por medida de segurança uma prática operacional que consiste em separar um volume antes e depois da chegada da interface. Desta forma, se assegura que nenhum tanque que armazene produtos seja contaminado.

Em dutos multiproduto, as interfaces são usualmente estocadas em tanques à parte e diversas estratégias operacionais com diferentes taxas de recuperação dos derivados e custos existem para a separação dos produtos. Jones e Paddock (1982) sugerem que um regime laminar tende a aumentar drasticamente o volume da interface fazendo com que os produtos atinjam um grau de mistura elevado. Outro fator operacional crítico é que imediatamente após uma parada, o volume de uma interface tende a aumentar devido ao transporte difusivo de massa. Jones e Paddock (1982) ainda adotam valores críticos para o número de *Reynolds* que minimizam a contaminação dos produtos segundo valores de diâmetros de dutos. Cabe ressaltar que a vazão de operação da linha dutoviária também exerce influência no volume da interface. No entanto, este fenômeno é rigorosamente explicado pela dispersão de líquidos em misturas. É importante ressaltar que uma representação matemática rigorosa dos efeitos difusivos e dispersivos está fora do escopo deste trabalho por requerer inúmeros parâmetros de difícil obtenção experimental e ainda trazer não linearidades ao MILP proposto no capítulo 4.

Desta forma, restrições especiais são incluídas na formulação. Estas devem permitir paradas a um segmento  $d$  do duto ( $XS_{d,k}=0$ ) no caso deste somente conter um produto ao longo de sua extensão, segundo a hipótese **H16**, dada a seguir.

**H16** - Um dado segmento do duto não pode estar inoperante ou parado caso este esteja com uma interface em um dado instante de tempo.

Assim, é necessário relacionar o parâmetro  $K_d$ , que denota o número de intervalos para os produtos percorrerem ininterruptamente o segmento  $d$  do duto a extensão dos segmentos do duto, com as variáveis de detecção de interfaces ( $TY_{p,p',k}^d$ )<sup>9</sup>. A figura 5.1 ilustra uma situação típica onde uma interface é detectada ao entrar no segmento do duto, bem como o instante da sua saída.

---

<sup>9</sup> Note que o parâmetro  $K_d$ , que denota o número de intervalos necessários para que os produtos percorram ininterruptamente o segmento  $d$  do duto, toma valores iguais ao parâmetro  $L_d$  que representa o número de lotes do segmento  $d$ .

### Segmento d

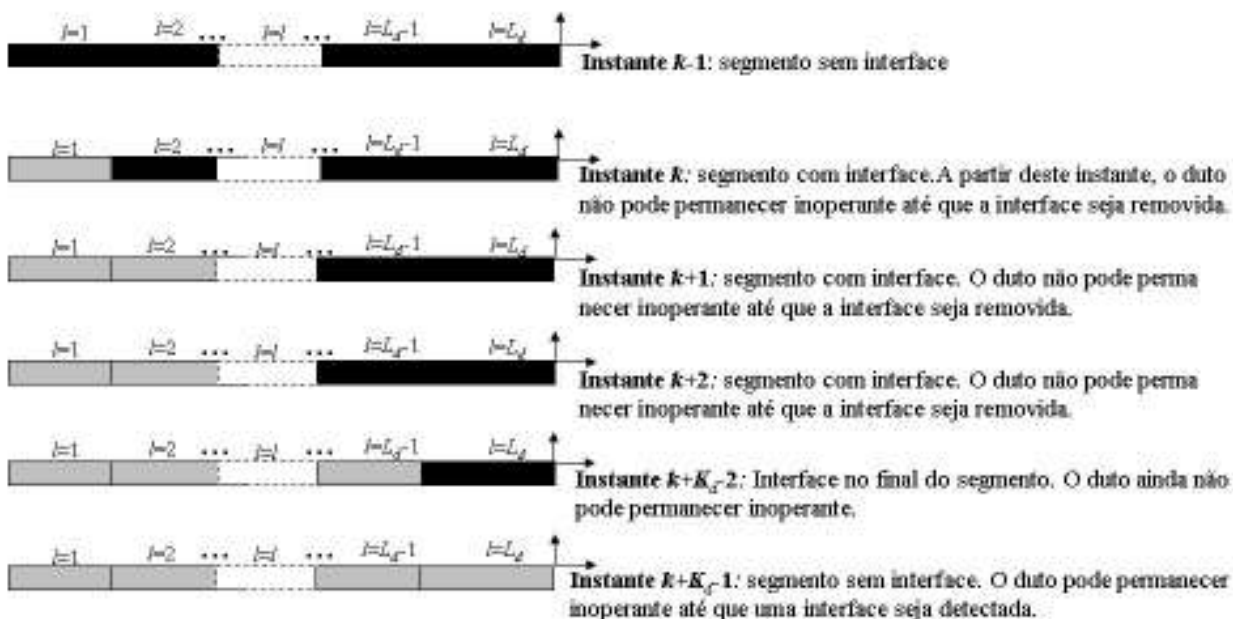


Figura 5.1 – Operação do segmento do duto segundo hipótese H16

De acordo com a figura 5.1, no intervalo de tempo  $k-1$ , o segmento do duto não contém nenhuma interface. Neste intervalo de tempo, o segmento do duto pode movimentar os produtos que estão no seu interior ( $XS_{d,k-1}=1$ ) ou pode permanecer fora de operação ( $XS_{d,k-1}=0$ ). De acordo com a referida figura, é assumido que o mesmo se encontra em operação neste instante e que no intervalo de tempo seguinte ( $k$ ), um outro produto entra no segmento e conseqüentemente uma interface é formada ( $TY_{p,p',k}^d=1$ ). Sob essa nova condição, o segmento do duto deve permanecer em operação nos intervalos de tempo seguintes até que a interface detectada no intervalo de tempo  $k$  seja completamente removida. Note que tal condição é atingida no intervalo de tempo  $k+K_d-1$ , ou seja, quando os dois lotes formadores de uma interface são completamente removidos do segmento do duto. Essa nova condição operacional faz com que um novo conjunto de restrições (5.1) seja considerado na formulação apresentada no capítulo anterior. Estas impõem que a variável  $XS_{d,k}$  deve assumir valores iguais a 1 sempre que uma interface de qualquer par de

produtos  $p$  e  $p'$  seja detectada (intervalo de tempo  $k$ ) e subsequentemente removida (intervalo de tempo  $k+K_d-1$ ).

$$XS_{d,k+1} \geq \sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P TY_{p,p',k}^d \quad \forall d \quad (5.1a)$$

$$XS_{d,k+2} \geq \sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P TY_{p,p',k}^d \quad \forall d \quad (5.1b)$$

...

$$XS_{d,k+K_d-1} \geq \sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P TY_{p,p',k}^d \quad \forall d \quad (5.1c)$$

Note que a interface é removida em  $K_d-1$  intervalos de tempo após ser detectada. Porém, para se assegurar de que todos os lotes de produtos contaminados por interfaces não permaneçam parados dentro do duto, é adotado que ambos os lotes formadores de uma dada interface sejam removidos do segmento do duto após  $K_d-1$  intervalos de tempo. Desta forma, se assegura de que os segmentos do duto permaneçam fora de operação com apenas um produto no seu interior livre de qualquer contaminação. Estas restrições podem ser agregadas, segundo a restrição (5.2). Esta última restrição só é válida até o intervalo de tempo  $K-K_d+1$ .

$$\sum_{k'=k+1}^{k+L_d-1} XS_{d,k'} \geq \sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P TY_{p,p',k}^d \cdot [K_d - 1] \quad \forall d, k \leq K-K_d+1 \quad (5.2)$$

Embora a restrição (5.2) seja necessária, ela não é suficiente para cobrir todo o horizonte de tempo quando o número necessário de intervalos de tempo para que os produtos percorram ininterruptamente o segmento  $d$  do duto ( $K_d$ ) é maior do que o número total de intervalos de tempo ( $K$ ) da operação. Dessa forma, a restrição (5.3) é aplicada entre os intervalos  $K-K_d$  e  $K-1$ . A sua forma agregada é mostrada pela restrição (5.4).

$$XS_{d,k'} \geq \sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P TY_{p,p',k}^d \quad \forall d, k' > k, K-K_d+1 < k < K \quad (5.3)$$

$$\sum_{k'=k+1}^K XS_{d,k'} \geq \sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P TY_{p,p',k}^d \cdot [K - k] \quad \forall d, K-K_d+1 < k < K \quad (5.4)$$



As restrições (5.2) e (5.4) consideram todos os intervalos de tempo de uma operação de transporte, mesmo que o segmento do duto seja maior do que o número de intervalos de tempo da mesma. Mesmo assim elas só contabilizam as interfaces que são formadas nesta operação, ou seja, as que foram formadas após o início da operação de transporte de produtos. Desta forma, é necessário ainda considerar a presença de interfaces que estejam presentes no interior do duto no início da operação. Para isso, o parâmetro  $TINI_{p,p',l}^d$  é calculado segundo a equação (5.5). Este parâmetro define as posições das interfaces que estão presentes dentro dos segmentos do duto. O seu cálculo considera os conteúdos iniciais dos lotes  $l$  e  $l+1$ , segundo os parâmetros  $XVZERO_{p,d,l}$ .

$$TINI_{p,p',l}^d = \max \{0, (XVZERO_{p,d,l} + XVZERO_{p',d,l+1} - 1)\} \forall p, p' \in TS_{p,p}; d, \forall l < L_d \quad (5.5)$$

Finalmente, a restrição (5.6) determina que o segmento  $d$  do duto deve operar nos primeiros  $K_d-l$  intervalos da operação quando o mesmo possui qualquer interface inicial localizada entre os lotes  $l$  e  $l+1$ . A restrição (5.7) mostra a sua forma agregada para os intervalos de tempo iniciais menores ou iguais à diferença entre o número necessário de intervalos de tempo para que os produtos percorram ininterruptamente o segmento  $d$  do duto ( $K_d$ ) e a interface localizada no lote  $l$ . No caso de não existirem interfaces iniciais, as restrições (5.6) e (5.7) são trivialmente satisfeitas.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P TINI_{p,p',l}^d \leq XS_{d,k} \quad \forall d, l \leq L_d, k \leq K_d-l \quad (5.6)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P TINI_{p,p',l}^d \cdot [L_d - l] \leq \sum_{k \leq K_d-l} XS_{d,k} \quad \forall d, l \leq L_d, \quad (5.7)$$

Estas restrições e o parâmetro  $TINI_{p,p',l}^d$  garantem que os segmentos do duto somente sofram paradas durante a operação de envio dos produtos no caso em que os mesmos não contiverem interfaces ao longo de toda a sua extensão durante o horizonte de tempo considerado.

Cabe ressaltar que a forma agregada constituída pelas restrições (5.2), (5.4) e (5.7) é adotada no próximo capítulo, embora a composta pelas restrições (5.1), (5.3) e (5.6) possa ser adotada para o problema proposto. Segundo Williams (1995), esta última formulação fornece soluções dos problemas relaxados com valores mais próximos das respectivas soluções ótimas mistas inteiras. Por outro lado, a forma com as restrições agregadas (5.2), (5.4) e (5.7) geram uma

formulação matemática com um menor número de restrições. Desta forma, no próximo capítulo é mostrado um estudo de desempenho computacional, onde ambas são testadas.

Ficam assim descritas as restrições que impõem paradas aos segmentos do duto somente quando os mesmos estocam somente um produto ao longo de sua extensão. A seguir, cortes inteiros são propostos para a inclusão na formulação descrita no capítulo anterior.

### 5.3. Cortes inteiros

Rejowski Jr. e Pinto (2003) propuseram um conjunto de cortes inteiros que melhoram a performance computacional do modelo proposto, baseado no número mínimo de vezes que um dado depósito  $d$  deve se conectar ao duto para retirar o produto  $p$  ao longo da operação. Os autores definem o parâmetro  $XDMIN_{p,d}$  segundo a equação (5.8), que relaciona a demanda do produto  $p$  estabelecida por um mercado consumidor com a diferença entre o estoque inicial do mesmo e o seu estoque mínimo na respectiva base. Note que esta diferença deve ser dividida pelo tamanho do lote do segmento  $d$ , dado pelo parâmetro  $U_d$ . Finalmente, para que este valor assuma valores inteiros válidos, arredonda-se o termo para o seu menor valor inteiro que seja maior do que o mesmo. Quando o estoque do produto disponível é maior do que a demanda estabelecida, o parâmetro  $XDMIN_{p,d}$  assume valores iguais a zero. A versão generalizada destes cortes é mostrada na restrição (5.9), onde se ressalta que a variável  $XW_{p,d,k}$  é apenas considerada para segmentos do duto que possuam uma redução de diâmetro. O parâmetro  $XDMIN_{p,d}$  considera que o limite de estocagem mínimo não sofre alterações ao longo da operação de transporte. Por fim,  $XDMIN_{p,d}$  estabelece um limite inferior válido para o número de vezes em que a base de distribuição  $d$  deve se conectar ao duto para retirar o produto  $p$  ao longo da operação.

$$XDMIN_{p,d} = \max \left\{ 0, \left\lceil \frac{DEM_{p,d} - (VDZERO_{p,d} - VDMIN_{p,d})}{U_d} \right\rceil \right\} \quad \forall p, d \quad (5.8)$$

$$\sum_{k=1}^K [XD_{p,d,k} + XW_{p,d,k}] \geq XDMIN_{p,d} \quad \forall p, d \quad (5.9)$$

onde  $\lceil x \rceil$  denota o menor valor inteiro maior que  $x$ .

### 5.3.1. Cortes de entrega

Os cortes de entrega podem ser gerados relacionando-se o parâmetro  $XDMIN_{p,d}$  com as quantidades iniciais estocadas dentro dos respectivos segmentos do duto ( $XVZERO_{p,d,l}$ ). Estes cortes fornecem limites inferiores válidos para o número de intervalos de tempo em que os segmentos do duto devem ser acionados ao longo da operação de distribuição. Ao todo, seis situações operacionais ( $r$ ) surgem para estes cortes, que são descritas a seguir. Adicionalmente, o conjunto  $DC_{p,d,r}$  relaciona os produtos ( $p$ ), os depósitos ( $d$ ) e as situações operacionais ( $r$ ). O parâmetro binário  $XDC_{d,r}$  assume valores unitários quando a base de distribuição  $d$  deve ao menos retirar um produto  $p$  que esteja relacionado à situação operacional  $r$ .

Primeiramente, considere uma situação operacional em que o depósito  $d$  deve retirar um produto  $p$  do duto ( $XDMIN_{p,d} > 0$ ) e que este produto não se encontra inicialmente no respectivo segmento ( $\sum_l XVZERO_{p,d,l} = 0$ ). Um conjunto de pares ordenados é então definido para o conjunto  $DC_{p,d,1}$  de acordo com a expressão lógica (5.10). Seja  $XSMIN_{d,1}$  o número mínimo de intervalos de tempo em que o segmento  $d$  deva ser acionado ao longo da operação. Nesta presente situação ( $r=1$ ), este parâmetro de limite inferior é dado pelo número de intervalos para os produtos percorrerem ininterruptamente o segmento do duto  $d$  e pela soma do número mínimo de vezes que a respectiva base  $d$  deve se conectar para retirar os produtos que se encontram nesta situação, dado pelo parâmetro  $XDMIN_{p,d}$ , segundo a equação (5.11). Note que para a sua correta aplicação a extensão do duto deve ser multiplicada pelo parâmetro  $XDC_{d,1}$ .

$$DC_{p,d,1} = \left\{ (p, d) \left| \left( XDMIN_{p,d} > 0 \right) \wedge \left( \sum_l XVZERO_{p,d,l} = 0 \right) \right. \right\} \quad \forall p, d \quad (5.10)$$

$$XSMIN_{d,1} = K_d \cdot XDC_{d,1} + \sum_{p \in DC_{p,d,1}} XDMIN_{p,d} \quad \forall d \quad (5.11)$$

Outra possível situação ( $r=2$ ) é caracterizada pelas quantidades iniciais dos produtos que se encontram dentro do segmento do duto, porém em quantidades insuficientes para satisfazer a demanda ( $\sum_l XVZERO_{p,d,l} < XDMIN_{p,d}$ ). O conjunto  $DC_{p,d,2}$  relaciona os pares de produtos e depósitos que se encontram sob essa situação operacional, segundo a expressão lógica (5.12).

$$DC_{p,d,2} = \left\{ (p, d) \left| \left( \sum_l XVZERO_{p,d,l} > 0 \right) \wedge \left( \sum_l XVZERO_{p,d,l} < XDMIN_{p,d} \right) \right. \right\} \quad \forall p, d \quad (5.12)$$

No presente caso, o número mínimo de vezes que o segmento  $d$  deve ser acionado é dado pela equação (5.13). Para qualquer segmento  $d$  do duto sob essa situação, o limite inferior  $XSMIN_{d,2}$  depende de dois termos. O primeiro é dado pelo número de intervalos para os produtos percorrerem ininterruptamente o segmento do duto  $d$ , segundo o parâmetro  $K_d$  multiplicado pelo parâmetro  $XDC_{d,2}$ , enquanto o segundo termo em colchetes representa a diferença entre as demandas e as quantidades iniciais dos produtos que são relacionados pelo conjunto  $DC_{p,d,2}$  presentes inicialmente no duto.

$$XSMIN_{d,2} = K_d \cdot XDC_{d,2} + \left[ \sum_{p \in DC_{p,d,2}} \left( XDMIN_{p,d} - \sum_l XVZERO_{p,d,l} \right) \right] \quad \forall d \quad (5.13)$$

A expressão lógica de definição de  $DC_{p,d,3}$  (5.14) juntamente com as equações (5.15) a (5.17) são aplicadas quando as quantidades dos produtos presentes dentro do duto no início da operação são exatamente suficientes para satisfazer as demandas estabelecidas nos mercados consumidores ( $r=3$ ,  $\sum_l XVZERO_{p,d,l} = XDMIN_{p,d}$ ). O parâmetro  $LMIN_{p,d}$  representa o lote do segmento do duto  $d$  mais distante referente à respectiva base que contenha o produto  $p$ , segundo a equação (5.15). O parâmetro  $XVMIN_{p,d}$  define o número mínimo de intervalos de tempo para o produto  $p$  que se encontra dentro deste lote no início da operação alcançar a respectiva base de distribuição, segundo a equação (5.16). Finalmente, o parâmetro  $XSMIN_{d,3}$  é dado pela equação (5.17), onde este limite inferior é dado pelo maior valor assumido pelos parâmetros  $XVMIN_{p,d}$  dentre todos os produtos.

$$DC_{p,d,3} = \left\{ (p, d) \left| \left( \sum_l XVZERO_{p,d,l} > 0 \right) \wedge \left( \sum_l XVZERO_{p,d,l} = XDMIN_{p,d} \right) \right. \right\} \quad \forall p, d \quad (5.14)$$

$$LMIN_{p,d} = \min_{l \mid XVZERO_{p,d,l} > 0} \{ l \cdot XVZERO_{p,d,l} \} \quad \forall p, d \in DC_{p,d,3} \quad (5.15)$$

$$XVMIN_{p,d} = K_d - LMIN_{p,d} + 1 \quad \forall p, d \in DC_{p,d,3} \quad (5.16)$$

$$XSMIN_{d,3} = \left[ \max_{p \in DC_{p,d,3}} (XVMIN_{p,d}) \right] \quad \forall d \quad (5.17)$$

O conjunto  $DC_{p,d,4}$ , correspondente à situação operacional  $r=4$ , relaciona os produtos  $p$  que possuem quantidades dentro dos segmentos do duto  $d$  que são superiores às demandas estabelecidas ( $\sum_l XVZERO_{p,d,l} > XDMIN_{p,d}$ ). Para este conjunto, o parâmetro  $XVMIN_{p,d}$  depende do número de intervalos para os produtos percorrerem ininterruptamente o segmento do duto  $d$ , do parâmetro  $XDMIN_{p,d}$  e do lote que contenha qualquer produto relacionado pelo conjunto  $DC_{p,d,4}$  que se localiza mais próximo da base de distribuição  $d$ . O limite mínimo  $XSMIN_{d,4}$  é dado então pela equação (5.21).

$$DC_{p,d,4} = \left\{ (p, d) \left| \left( XDMIN_{p,d} > 0 \right) \wedge \left( \sum_l XVZERO_{p,d,l} > 0 \right) \wedge \left( \sum_l XVZERO_{p,d,l} > XDMIN_{p,d} \right) \right. \right\} \quad \forall p, d \quad (5.18)$$

$$LMAX_{p,d} = \max_l \{ l \cdot XVZERO_{p,d,l} \} \quad \forall p, d \in DC_{p,d,4} \quad (5.19)$$

$$XVMIN_{p,d} = K_d - LMAX_{p,d} + XDMIN_{p,d} \quad \forall p, d \in DC_{p,d,4} \quad (5.20)$$

$$XSMIN_{d,4} = \left[ \max_{p \in DC_{p,d,4}} (XVMIN_{p,d}) \right] \quad \forall d \quad (5.21)$$

A quinta situação operacional ( $r=5$ ) presente para um dado segmento  $d$  do duto relaciona a primeira e a segunda situação operacional. Ela leva em conta os pares de produtos  $p$  e bases  $d$  que pertençam ao conjunto  $DC_{p,d,1}$  e por um outro par de produtos  $p'$  tal que  $p' \neq p$  para o mesmo depósito  $d$ , que é relacionado pelo conjunto  $DC_{p',d,2}$ . Note que para este caso, não é necessário se definir o conjunto  $DC_{p,d,5}$ . O limite inferior  $XSMIN_{d,5}$  é então dado pela equação (5.22). O primeiro termo é composto pelo número de intervalos para os produtos percorrerem ininterruptamente o segmento do duto  $d$  ( $K_d$ ), pelas demandas dos produtos relacionados pelo conjunto  $DC_{p,d,1}$  dado pelo parâmetro  $XDMIN_{p,d}$  e pelos parâmetros  $XDC_{d,1}$  e  $XDC_{d,2}$ . O segundo termo considera a diferença entre as demandas, dadas pelo parâmetro  $XDMIN_{p',d}$  e pelas quantidades iniciais dos produtos relacionados pelo conjunto  $DC_{p',d,2}$  contidas na linha dutoviária no segmento  $d$  no início da operação. Note que para a correta aplicação da equação, é necessário que ambos os termos sejam multiplicados pelo produto dos parâmetros binários  $XDC_{d,1}$  e  $XDC_{d,2}$ .

$$\begin{aligned}
XSMIN_{d,5} = & \left\{ K_d + \left[ \sum_{p \in DC_{p,d,1}} XDMIN_{p,d} \right] \right\} \cdot (XDC_{d,1} \cdot XDC_{d,2}) \\
& + \left[ \sum_{p' \in DC_{p',d,2}} \left( XDMIN_{p',d} - \sum_l XVZERO_{p',d,l} \right) \right] \cdot (XDC_{d,1} \cdot XDC_{d,2})
\end{aligned} \quad \forall d \quad (5.22)$$

Finalmente, quando o estoque disponível nas bases de distribuição é suficiente para suprir as demandas ( $XDMIN_{p,d}=0$ ), todos os parâmetros são igualados a zero.

Note que todas as equações apresentadas neste capítulo são lineares. Os cortes de entrega propostos são então descritos pela restrição (5.23). Eles são formulados como cortes inteiros e impõem um limite inferior válido para o número de vezes em que os segmentos do duto devem ser acionados ao longo da operação de transporte de derivados. O limite é dado pelo máximo valor fornecido pelos parâmetros  $XSMIN_{d,r}$  dentre todas as situações operacionais  $r$  descritas anteriormente.

$$\sum_{k=1}^K XS_{d,k} \geq \max_r \{ XSMIN_{d,r} \} \quad \forall d \quad (5.23)$$

São mostrados a seguir exemplos ilustrativos com a finalidade de elucidar o comportamento dos parâmetros descritos neste capítulo, bem como dos cortes propostos.

### 5.3.2. Exemplos ilustrativos para os cortes de entrega

Nesta seção são propostos exemplos para a elucidação dos cortes de entrega para cada situação operacional. Isto se faz necessário, pois o comportamento dos diversos parâmetros definidos anteriormente pode ser melhor observado através destes exemplos.

A figura 5.2 ilustra os exemplos (E5) para cada um das cinco primeiras situações operacionais. Cabe ressaltar que a sexta situação é omitida, devido à sua trivialidade por não envolver transferência dos produtos para a base. Esta figura consta de um segmento genérico de um sistema dutoviário com valores de demandas e com preenchimento inicial dos seus lotes componentes conhecidos. O respectivo segmento do duto é dividido em 4 lotes ( $L_d=4$ ), número que é igual ao número de intervalos de tempo necessários para que os produtos percorram

ininterruptamente o segmento do duto ( $K_d=4$ ). Note também que a operação de transporte dutoviário envolve 3 produtos.

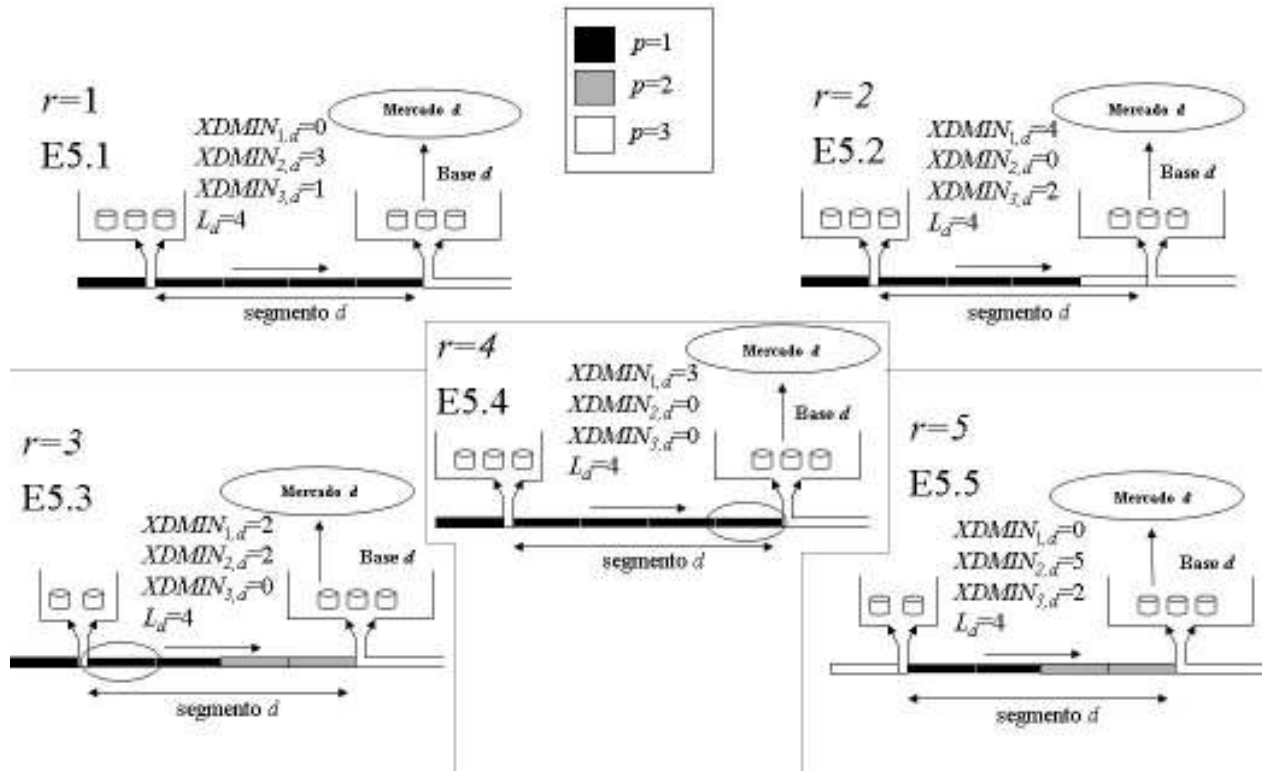


Figura 5.2 – Exemplos E5

O exemplo E5.1 relaciona a primeira situação operacional ( $r=1$ ), onde a base necessita se conectar 3 vezes ao duto para retirar o produto  $p=2$  ( $XDMIN_{2,d}=3$ ) e 1 vez para retirar o produto  $p=3$  ( $XDMIN_{3,d}=1$ ), porém nenhum deles se encontra dentro da linha dutoviária no início da operação. Primeiramente, o conjunto  $DC_{p,d,1}$  é composto pelos pares ordenados formados entre estes referidos produtos e a base  $d$  ( $DC_{p,d,1}=\{(2,d), (3,d)\}$ ). O parâmetro  $XDC_{d,1}$  assume o valor unitário, pois um ou mais produtos se encontram nesta situação. Portanto, conforme a equação (5.11), o parâmetro  $XSMIN_{d,1}$  toma os seguintes valores:

$$XSMIN_{d,1} = K_d \cdot XDC_{d,1} + (XDMIN_{2,d} + XDMIN_{3,d}) = 4 \cdot 1 + (3 + 1) = 8$$

O exemplo E5.2 considera a segunda situação operacional ( $r=2$ ), onde a base de distribuição necessita se conectar 4 vezes ao duto para retirar o produto  $p=1$  e 2 vezes para o produto  $p=3$ , no entanto somente os três primeiros lotes do segmento  $d$  se encontram preenchidos por  $p=1$  e somente o último contém  $p=3$ . Desta forma, o conjunto  $DC_{p,d,2}$  é então formado pelo par composto pela base  $d$  e pelo produto  $p=1$  e pelo produto  $p=3$  ( $DC_{p,d,2}=\{(1,d), (3,d)\}$ ). O parâmetro  $XDC_{d,2}$  é igualado a 1, pois o conjunto  $DC_{p,d,2}$  não é vazio. Segundo a equação (5.13), o parâmetro  $XSMIN_{d,2}$  toma o seguinte valor.

$$XSMIN_{d,2} = K_d \cdot XDC_{d,2} + \left[ \sum_{p \in DC_{p,d,2}} \left( XDMIN_{p,d} - \sum_l XVZERO_{p,d,l} \right) \right] = 4 \cdot 1 + [(4-3) + (2-1)] = 6$$

O exemplo E5.3 relaciona a terceira situação operacional ( $r=3$ ), em que a base  $d$  necessita retirar os produtos  $p=1$  e  $p=2$  duas vezes e cada um destes ocupa dois lotes do respectivo segmento  $d$ . Logo, o conjunto  $DC_{p,d,4}$  é composto pelos produtos  $p=1$  e  $p=2$  ( $DC_{p,d,4}=\{(1,d), (2,d)\}$ ). Portanto, o parâmetro que denota os lotes que se localizam mais distantes da base de distribuição  $d$  e que ao mesmo tempo contenham os produtos sob essa circunstância dentro da linha dutoviária ( $LMIN_{p,d}$ ) assume os seguintes valores, segundo a equação (5.15):

$$LMIN_{1,d} = \min_{l \mid XVZERO_{p,d,l} > 0} \{l \cdot XVZERO_{p,d,l}\} = \min_{l=1,2} (1 \cdot 1, 1 \cdot 2) = 1$$

$$LMIN_{2,d} = \min_{l \mid XVZERO_{p,d,l} > 0} \{l \cdot XVZERO_{p,d,l}\} = \min_{l=3,4} (1 \cdot 3, 1 \cdot 4) = 3$$

O parâmetro  $XVMIN_{p,d}$  que determina o número mínimo de intervalos de tempo necessários para que os produtos alcancem a respectiva base é dado conforme a equação (5.16):

$$XVMIN_{1,d} = K_d - LMIN_{p,d} + 1 = 4 - 1 + 1 = 4$$

$$XVMIN_{2,d} = K_d - LMIN_{p,d} + 1 = 4 - 3 + 1 = 2$$

Finalmente, a equação (5.17) determina que para esta situação ( $r=3$ ), o produto localizado mais distante da base  $d$  impõe o limite inferior mínimo para o número de intervalos de tempo em que o respectivo segmento deva operar.



$$XSMIN_{d,3} = \left[ \max_{p \in DC_{p,d,3}} (XVMIN_{p,d}) \right] = \max_{p=\{1,2\}} (4,2) = 4$$

A quarta situação operacional ( $r=4$ ) é ilustrada pelo exemplo E5.4. No caso, os 4 lotes do segmento  $d$  do duto são ocupados pelo produto  $p=1$  e a respectiva base necessita retirá-lo ao menos por 3 vezes ao longo da operação de envio. Desta forma, o conjunto  $DC_{p,d,4}$  é formado pelo par composto entre o produto  $p=1$  e a base de distribuição  $d$  ( $DC_{p,d,4}=\{(1,d)\}$ ). Nesta situação, o parâmetro que indica o lote mais próximo da base que armazena os produtos e que ao mesmo tempo pertença ao conjunto  $DC_{p,d,4}$  denotado por ( $LMAX_{p,d}$ ), é dado pela equação (5.19).

$$LMAX_{1,d} = \max_l \{l \cdot XVZERO_{p,d,l}\} = \max_{l=1,2,3,4} \{1 \cdot 1, 2 \cdot 1, 3 \cdot 1, 4 \cdot 1\} = 4$$

O parâmetro  $XVMIN_{p,d}$  que indica o número mínimo de intervalos de tempo para o produto mais próximo alcançar a respectiva base é dado então pela equação (5.20):

$$XVMIN_{1,d} = K_d - LMAX_{p,d} + XDMIN_{p,d} = 4 - 4 + 3 = 3$$

Neste exemplo, como só há um produto sob essa condição operacional, o parâmetro  $XSMIN_{d,4}$  assume valores iguais a  $XVMIN_{1,d}$ , segundo a equação (5.21):

$$XSMIN_{d,4} = \left[ \max_{p \in DC_{p,d,4}} (XVMIN_{p,d}) \right] = \max_{p=1} (3) = 3$$

Finalmente, o exemplo E5.5 mostra um caso onde a base  $d$  necessita retirar os produtos 2 e 3, caracterizando assim a situação operacional  $r=5$ . O produto  $p=2$  se encontra em quantidades insuficientes para atender a demanda ( $r=2$ ), enquanto o produto  $p=3$  não preenche nenhum dos lotes do segmento  $d$  do duto ( $r=1$ ). Desta forma, o parâmetro  $XSMIN_{d,5}$  é dado segundo a equação (5.22):

$$\begin{aligned}
XSMIN_{d,5} &= \left\{ K_d + \left[ \sum_{p \in DC_{p,d,1}} XDMIN_{p,d} \right] \right\} \cdot (XDC_{d,1} \cdot XDC_{d,2}) \\
&+ \left[ \sum_{p' \in DC_{p',d,2}} \left( XDMIN_{p',d} - \sum_l XVZERO_{p',d,l} \right) \right] \cdot (XDC_{d,1} \cdot XDC_{d,2}) = (4+2) \cdot 1 \cdot 1 + (5-2) \cdot 1 \cdot 1 = 9
\end{aligned}$$

Esta última situação ( $r=5$ ) fornece altos valores para os limites inferiores de funcionamento dos segmentos do duto, pois ela considera os casos mais drásticos de incompatibilidade entre as demandas requeridas e o preenchimento inicial do respectivo segmento do duto. O corte proposto para esta situação operacional gera melhores limites em relação às aplicações individuais das situações  $r=1$  e  $r=2$ .

No caso de um segmento estar sujeito a duas situações operacionais distintas, o maior valor do parâmetro é sempre utilizado pelo corte inteiro, mostrado pela equação (5.22).

Ficam assim descritos os exemplos que mostram com mais detalhes o funcionamento dos parâmetros e equações que compõem os cortes de entrega.

#### 5.4. Sumário

Este capítulo desenvolveu restrições que buscam aumentar a eficiência computacional do modelo MILP para o *scheduling* de operações dutoviárias. Ficam assim descritas:

1. As restrições especiais que impõem a um dado segmento do duto uma parada somente quando o mesmo não contenha interfaces ao longo de sua extensão; e
2. Os cortes de entrega, que são baseados em relações lógicas entre as demandas estabelecidas e as quantidades dos produtos estocados dentro do duto no início da operação.

No próximo capítulo são mostrados diversos exemplos para testar o impacto das restrições especiais propostas neste capítulo e dos cortes de entrega na formulação originalmente proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003).

## **6. Estudos de casos para as restrições especiais e para os cortes de entrega**

### *6.1. Introdução*

Os exemplos mostrados neste capítulo consideram o sistema dutoviário da Petrobras, mostrado na figura 3.2. Os exemplos consideram que o duto transporta até 4 produtos, sendo eles gasolina, óleo diesel, GLP e QAV. Estes devem ser distribuídos entre 5 bases que se conectam em série à linha dutoviária.

O sistema dutoviário considerado ainda contém apenas uma redução de diâmetro, entre o quarto e o quinto segmentos do duto. Portanto, o conjunto  $D_c$  é composto pelos segmentos ( $d=1, 2, 3, 5$ ). De acordo com a equação (4.25), as respectivas variáveis  $XW_{p,d,k}$  são iguais a zero para qualquer produto  $p$  para estes depósitos. As variáveis  $XW_{p,4,k}$  podem ser declaradas como contínuas. O produto GLP ( $p=3$ ) não é estocado na terceira base ( $d=3$ ), enquanto o produto QAV ( $p=4$ ) não é estocado nas 3 primeiras bases ( $d=1, 2, 3$ ). Logo, as variáveis  $XD_{p,d,k}$  destes produtos para as bases que não os estocam devem ser nulas, pois estes produtos não pertencem ao conjunto  $PD_d$ . Todos os exemplos ainda são compostos por 15 intervalos de tempo com 5 horas de duração cada, totalizando um horizonte de tempo operacional de 75 horas.

Neste capítulo são mostrados diversos aspectos da formulação proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003), das restrições especiais e dos cortes entrega. Formulações alternativas para as restrições especiais e o efeito isolado dos cortes de entrega na formulação de Rejowski Jr. e Pinto (2003) são estudados a seguir. Posteriormente, os relaxamentos das restrições especiais e do não atendimento das demandas dos mercados consumidores ao final do horizonte de tempo são considerados nas formulações. Finalmente, o efeito de janelas de tempo para o recebimento dos produtos por parte dos mercados consumidores é estudado nas formulações propostas. Os exemplos consideram diferentes cenários de demandas estabelecidas pelos mercados consumidores. Cenários de baixas, médias e altas demandas são utilizados para testar o impacto das restrições especiais e dos cortes de entrega. Os 3 exemplos são considerados a seguir:

- (E6.1) exemplos de baixas demandas dos produtos;
- (E6.2) exemplos de médias demandas dos produtos, e;
- (E6.3) exemplos de altas demandas dos produtos.

As seguintes formulações são consideradas:

- (M1) formulação original proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003);
- (M2) formulação original com as restrições especiais;
- (M3) formulação original com as restrições especiais e os cortes de entrega;
- (M4) formulação original e os cortes de entrega;
- (M5) formulação original com as restrições especiais na sua forma desagregada;
- (M6) formulação original com as restrições especiais na sua forma desagregada e os cortes de entrega;
- (M7) formulação original sem restrições de atendimento de demanda com penalidades por paradas dos segmentos do duto com interfaces e pelo não atendimento das demandas ao final do horizonte de tempo, e;
- (M8) formulação original sem restrições de atendimento de demanda com penalidades por paradas dos segmentos do duto com interfaces e pelo não atendimento das demandas ao final do horizonte de tempo e com janelas de tempo para o recebimento dos produtos por parte dos mercados consumidores.

As tabelas 6.1 a 6.4 mostram os dados comuns a todos os exemplos propostos neste capítulo. A tabela 6.1 compara a capacidade real dos segmentos dutoviários com as discretizadas e que são adotadas nos exemplos. A mesma também ilustra os parâmetros  $U_d$  e  $L_d$ .

Tabela 6.1 – Capacidades reais e discretizadas dos segmentos e dos lotes do duto OSBRA

Segmento	Capacidade	Capacidade	Diferença	$U_d$	$L_d$
	Real [m <sup>3</sup> ]	Discretizada [m <sup>3</sup> ]	(%)	[x 10 <sup>-2</sup> m <sup>3</sup> ]	Lotes
REPLAN- Rib. Preto	39759	40000	0,61	50	8
Rib. Preto- Uberaba	25879	25000	3,52	50	5
Uberaba- Uberlândia	25321	25000	1,27	50	5
Uberlândia- Goiânia	59676	60000	0,54	50	12
Goiânia- Brasília	13739	13500	1,74	27	5

A figura 6.1 mostra o perfil de produção determinado pela refinaria para todos os derivados envolvidos na operação de transporte. Nos primeiros 10 intervalos de tempo, os tanques da refinaria recebem apenas gasolina ( $p=1$ ) e óleo diesel ( $p=2$ ) e nos últimos 5 intervalos de tempo o parque de tanques recebe GLP e QAV. Todos os lotes de produção possuem uma vazão ( $RP_{i,p,k}$ ) igual a 500 m<sup>3</sup>/h.

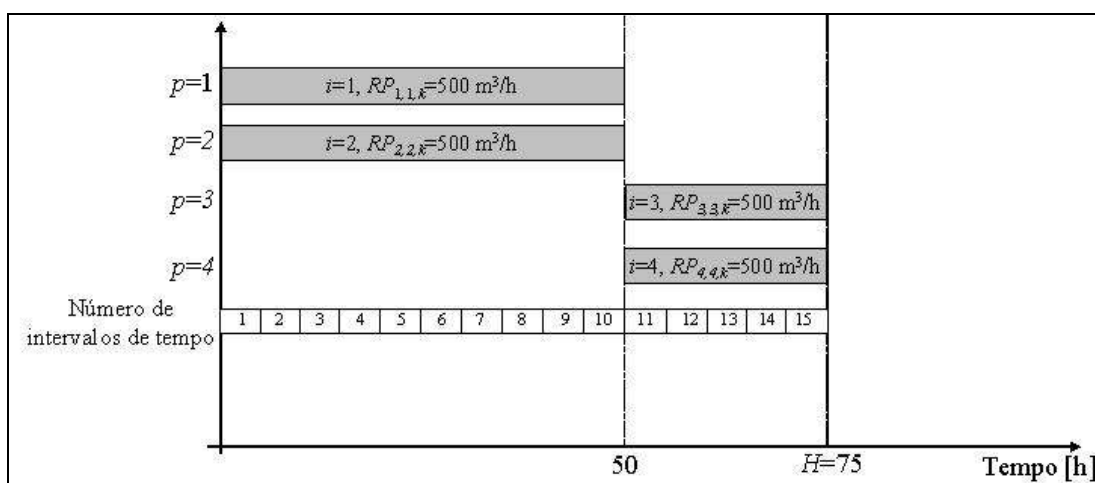


Figura 6.1 – Perfil de produção fornecido pela refinaria

A tabela 6.2 fornece os parâmetros para os modelos propostos, bem como as condições iniciais de preenchimento para o duto. As tabelas 6.3 e 6.4 mostram as condições iniciais de estocagem na refinaria e nos depósitos respectivamente, bem como os seus limites superiores e inferiores. Estes exemplos admitem que as estações de bombeamento operam com uma taxa de rendimento ( $\eta_k$ ) fixa durante todo o horizonte de tempo e de valor igual a 0,50.

Tabela 6.2 – Dados comuns para os exemplos do capítulo 6

<i>Produto</i>	<i>Custos de estocagem</i>		<i>Estoques iniciais do duto</i>		
	$CER_p$ [\$/m <sup>3</sup> .h]	$CED_{p,d}$ [\$/m <sup>3</sup> .h]	$XVZERO_{p,1,l}$	$XVZERO_{p,2,l}$	$XVZERO_{p,3,l}$
Gasolina (1)	0,020	0,100	1(l=1,2,3,4,5,6,7,8)	1(l=4,5)	1(l=1,2,3,4,5)
Óleo diesel (2)	0,023	0,155	0	1(l=1,2,3)	0
GLP (3)	0,070	0,200	0	0	0
QAV (4)	0,025	0,170	0	0	0

<i>Produto</i>	<i>Estoques iniciais do duto</i>		<i>Custos de</i>	<i>CONTACT<sub>p,p'</sub> [x 10<sup>-2</sup> \$]</i>			
	$XVZERO_{p,4,l}$	$XVZERO_{p,5,l}$	<i>Bombeamento</i> $CP_{p,d}$ [\$/m <sup>3</sup> ]	$p'=1$	$p'=2$	$p'=3$	$p'=4$
Gasolina (1)	1(l=1, ...,10)	0	7/ 9/ 11/ 12/ 13,8	0	30	37	35
Óleo diesel (2)	0	1(l=1,2,...,5)	7,2/ 9,2/ 11,2/ 12,4/ 14,6	30	0	X	X
GLP (3)	1(l=11,12)	0	9,6/ X/ 13,6/ 15,8/ 17,8	37	X	0	X
QAV (4)	0/0	0	X / X/ X/ 12,2/ 14,0	35	X	X	0

Tabela 6.3 – Condições iniciais de estocagem e seus limites na refinaria

<i>Produto</i>	<i>Estoques na Refinaria [x 10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup>]</i>	
	$VRZERO_p$	$VRMAX_{p,k}/ VRMIN_{p,k}$
Gasolina (1)	1000	2500/300
Óleo diesel (2)	1050	2250/300
GLP (3)	100	300/30
QAV (4)	315	600/120

Tabela 6.4 – Condições iniciais de estocagem e seus limites nos depósitos

Depósitos	Produtos	Capacidades max/ min	Condição inicial
		[x 10 <sup>-2</sup> m <sup>3</sup> ] $VDMAX_{p,d,k}/VDMIN_{p,d,k}$	[x 10 <sup>-2</sup> m <sup>3</sup> ] $VDZERO_{p,d}$
(1)	Gasolina	190/50	100
	Óleo Diesel	270/90	180
	GLP	120/20	90
	QAV	0/0	0
(2)	Gasolina	90/30	40
	Óleo Diesel	190/50	150
	GLP	0/0	0
	QAV	0/0	0
(3)	Gasolina	90/20	50
	Óleo Diesel	270/90	180
	GLP	120/20	60
	QAV	0/0	0
(4)	Gasolina	190/50	110
	Óleo Diesel	720/150	350
	GLP	180/20	40
	QAV	140/30	90
(5)	Gasolina	180/50	90
	Óleo Diesel	720/150	330
	GLP	92/20	40
	QAV	136/25	110

Todos os exemplos deste capítulo foram implementados com a ferramenta computacional *GAMS (General Algebraic Modeling System)*, (Brooke et al., 2000) em uma plataforma computacional equipada com processador *Pentium II 400 MHz*. As formulações MILP são resolvidas através do sistema *CPLEX (ILOG, 2000)*.

## 6.2. Efeito das demandas em scheduling de sistemas dutoviários

Esta seção considera as formulações M1 a M3, comparando-as em situações de baixas, médias e altas demandas.

### 6.2.1. Série E6.1 – demandas baixas

O cenário 1 (E6.1) é caracterizado por baixas demandas estabelecidas pelos mercados consumidores. Estas são mostradas na tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Demandas para a série E6.1

<i>Produto</i>	<i>Demandas [x 10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup>]</i>				
	<i>DEM<sub>p,1</sub></i>	<i>DEM<sub>p,2</sub></i>	<i>DEM<sub>p,3</sub></i>	<i>DEM<sub>p,4</sub></i>	<i>DEM<sub>p,5</sub></i>
Gasolina (1)	0	0	0	60	10
Óleo Diesel (2)	50	70	0	0	120
GLP (3)	0	0	0	50	0
QAV (4)	0	0	0	0	0

Esta série de exemplos é caracterizada pela situação em que a grande maioria dos depósitos possuem estoques para atender as demandas estabelecidas, exceto a quarta base de distribuição ( $d=4$ ) que necessita retirar GLP ( $p=3$ ) do duto. A tabela 6.6 mostra os resultados computacionais para os exemplos E6.1M1, E6.1M2 e E6.1M3. O primeiro corresponde à formulação original proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003), enquanto o exemplo E6.1M2 considera a formulação original proposta pelos referidos autores e as restrições especiais. O exemplo E6.1M3 leva em conta a formulação original, as restrições especiais e os cortes de entrega.



Tabela 6.6 – Resultados para a série E6.1

<i>Formulação</i>	E6.1M1	E6.1M2	E6.1M3
Solução relaxada (C [\$ x 10 <sup>-2</sup> ])	24740,85	27495,44	27495,44
Solução inteira (C [\$ x 10 <sup>-2</sup> ])	24888,62	31042,50	31042,50
<i>Gap</i> <sup>10</sup> (%)	0,000	0,000	0,000
Número de Equações	9603	9703	9708
Número de Variáveis Contínuas	6316	6596	6596
Número de Variáveis Binárias	420	420	420
Tempo computacional [s]	124	250	250
Nós visitados	101	278	278

Em todos os casos as soluções ótimas dos exemplos são encontradas. Embora a formulação E6.1M1 forneça um bom *schedule*, os seus resultados levariam os produtos que se encontram dentro da linha dutoviária a um grau de contaminação muito elevado. Neste exemplo, os segmentos do duto devem ser somente acionados para atender as demandas no final do horizonte de tempo.

O exemplo E6.1M2 mostra o efeito das restrições especiais. Note que a região viável do problema é reduzida, pois este exemplo apresenta um número maior de equações em relação ao exemplo E6.1M1. Isso também pode ser explicado pela necessidade de o duto ativar os seus segmentos sempre que uma interface é detectada. Dessa forma, um valor ótimo maior para a função objetivo do problema é encontrado em relação ao valor do exemplo E6.1M1. Para o *scheduling* de dutos, é desejável que os procedimentos de parada e de início de suas operações seja evitado devido aos altos custos correspondentes. Embora a presente formulação não imponha explicitamente tal condição, a solução ótima mostra que o duto permanece ativo somente nos primeiros 10 intervalos de tempo. Isso ocorre devido às diferenças presentes nos custos de estocagem na refinaria e nos depósitos. A solução ótima é encontrada em 250 segundos. Neste caso, as interfaces formadas no começo da operação ( $k=0$ ) devem ser retiradas do interior da linha dutoviária antes do final do horizonte de tempo. Um outro aspecto importante é que as restrições especiais impõem um aumento nas quantidades estocadas dos produtos nas bases e para alguns casos o seu nível se aproxima da sua capacidade máxima. Como as interfaces

<sup>10</sup> Para problemas de minimização o *Gap* é definido pela diferença relativa entre a melhor solução inteira encontrada e o maior limite inferior pelo algoritmo *Branch&Bound*. Quando a solução ótima do problema é encontrada, estes valores coincidem e portanto, o seu valor é igual a zero.

formadas devem ser removidas dos segmentos do duto, os custos de bombeamento também são aumentados, pois estes devem ser acionados mais vezes que no exemplo E6.1M1.

O exemplo E6.1M3 fornece a mesma solução que a obtida pelo E6.1M2. No entanto, este exemplo não oferece nenhuma melhoria no desempenho computacional, mesmo com a redução da região viável do problema com a adição de 5 restrições ao problema em relação ao exemplo E6.2M2. Esta característica pode ser observada na tabela 6.6, onde os valores das soluções relaxadas dos problemas para os exemplos E6.1M2 e E6.1M3 são os mesmos, assim como o número de nós visitados na busca da solução ótima.

### 6.2.2. Série E6.2 – demandas médias

A tabela 6.7 mostra os valores que caracterizam um cenário de demandas médias. Note que a única diferença entre as séries E6.1 e E6.2 é que nesta última, o depósito ( $d=5$ ) deve retirar gasolina ( $p=1$ ) do duto. Porém este derivado não se encontra inicialmente no respectivo segmento.

Tabela 6.7 – Demandas para a série E6.2

<i>Produto</i>	<i>Demandas [x 10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup>]</i>				
	$DEM_{p,1}$	$DEM_{p,2}$	$DEM_{p,3}$	$DEM_{p,4}$	$DEM_{p,5}$
Gasolina (1)	0	0	0	60	80
Óleo Diesel (2)	50	70	0	0	120
GLP (3)	0	0	0	50	0
QAV (4)	0	0	0	0	0

Três exemplos são propostos para a série. O exemplo E6.2M1 considera a formulação original proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003). O exemplo E6.2M2 leva em conta a formulação original e as restrições especiais, enquanto o caso E6.2M3 contempla a formulação original, as restrições especiais e os cortes inteiros de entrega. A tabela 6.8 mostra os resultados computacionais para esta série.

Tabela 6.8 – Resultados para a série E6.2

<i>Formulação</i>	E6.2M1	E6.2M2	E6.2M3
Solução relaxada (C [\$ x 10 <sup>-2</sup> ])	25669,02	27125,49	28072,47
Solução inteira (C [\$ x 10 <sup>-2</sup> ])	30199,75	31401,62	31401,62
<i>Gap</i> (%)	8,4	0,000	0,000
Número de Equações	9603	9703	9708
Número de Variáveis Contínuas	6316	6596	6596
Número de Variáveis Binárias	420	420	420
Tempo computacional [s]	10000	2807	5274
Nós visitados	938	5695	6507

O exemplo E6.2M2 encontrou a solução ótima com um valor superior ao valor encontrado pelo caso E6.2M1, que representa apenas uma solução viável. Os custos de bombeamento no caso E6.2M2 aumentam o valor da função objetivo em relação ao caso E6.2M1. É importante ressaltar que a solução original proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003) não foi capaz de encontrar a solução ótima para o problema em 10000 segundos. Note que para a enumeração de nós percorridos deste exemplo foi utilizada a opção de *strong branch* (ramificação forte), onde a árvore binária do problema gerado é menor, porém o algoritmo percorre em tempo maior em relação aos outros exemplos. Para maiores detalhes das variantes desta opção, sugere-se a consulta do manual do *solver* MILP *CPLEX* (ILOG, 2000). Esta opção também é utilizada nos exemplos da seção subsequente que utilizam o modelo M1.

No exemplo E6.2M2 o duto deve ser operado para atender as demandas de gasolina ( $p=1$ ) no último depósito e retirar as interfaces do duto. Embora este cenário seja caracterizado por demandas médias, as restrições especiais impõem que o duto deva ser acionado em todos os intervalos de tempo. Neste caso, a solução ótima é encontrada em aproximadamente 2800 segundos.

A solução ótima também foi encontrada no exemplo E6.2M3. Surpreendentemente, os cortes inteiros propostos no capítulo anterior geram um efeito negativo no desempenho computacional do modelo. Apesar de haver um acréscimo no valor da solução relaxada do problema, um número maior de nós foi examinado. No caso, a solução ótima foi encontrada em aproximadamente 5300 segundos, o que corresponde a um tempo quase duas vezes maior que o necessário para o caso E6.2M2.

### 6.2.3. Série E6.3 – demandas altas

A tabela 6.9 fornece as demandas para as séries E6.3, onde estas assumem altos valores para a operação de transporte. Neste cenário, duas séries são propostas (E6.3.1 e E6.3.2). Para cada uma destas, três exemplos são propostos onde primeiramente a formulação de Rejowski Jr. e Pinto (2003) é testada (E6.3.1M1 e E6.3.2M1). Posteriormente, somente as restrições especiais são incluídas na formulação (E6.3.1M2 e E6.3.2M2) e por fim, tanto estas restrições, como os cortes de entrega são considerados (E6.3.1M3 e E6.3.2M3).

Tabela 6.9 – Demandas para os exemplos propostos para a série E6.3

<i>Produto</i>	<i>Demandas [x 10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup>]</i>				
	<i>DEM<sub>p,1</sub></i>	<i>DEM<sub>p,2</sub></i>	<i>DEM<sub>p,3</sub></i>	<i>DEM<sub>p,4</sub></i>	<i>DEM<sub>p,5</sub></i>
Gasolina (1)	0	0	0	300	80
Óleo Diesel (2)	90 (150)	150	0	0	120
GLP (3)	0	0	0	50	0
QAV (4)	0	0	0	0	0

Existe apenas uma diferença para as demandas entre as 2 séries. As demandas da E6.3.2 são as mesmas impostas para a série E6.3.1, com exceção da demanda estabelecida para o óleo diesel no depósito localizado em Ribeirão Preto ( $d=1$ ), que é mostrada na tabela 6.9 entre parênteses.

Note que há uma grande diferença entre os valores das demandas assumidas nestas séries e as anteriores, como pode ser observado pelas tabelas 6.5, 6.7 e 6.9. Um exemplo desta situação é composto pelo óleo diesel na primeira base ( $d=1$ ), onde ao menos um lote deve ser coletado ao longo da operação para o exemplo 2 desta série, porém o mesmo derivado não se encontra inicialmente dentro deste segmento. Os resultados computacionais para ambos os exemplos são apresentados na tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Resultados computacionais para a série E6.3

<i>Formulação</i>	E6.3.1			E6.3.2		
	E6.3.1M1	E6.3.1M2	E6.3.1M3	E6.3.2M1	E6.3.2M2	E6.3.2M3
Sol. relaxada [C (x10 <sup>-2</sup> \$)]	25170,4	26485,3	27423,2	24999,6	26082,8	27277,9
Sol. inteira [C (x10 <sup>-2</sup> \$)]	29267,3	30196,2	30196,2	29333,9	30245,9	30245,9
<i>Gap</i> (%)	5,6	0,000	0,000	5,6	0,000	0,000
Número de Equações	9603	9703	9708	9603	9703	9708
Número de Variáveis Contínuas	6316	6596	6596	6316	6596	6596
Número de Variáveis Binárias	420	420	420	420	420	420
Tempo computacional [s]	10000	7775	1209	10000	5386	1775
Nós visitados	6482	19716	2698	5258	13758	5007

Os exemplos E6.3.1M1 e E6.3.2M1 encontraram uma solução com 5,6% de *Gap* em 10000 segundos de tempo computacional. Embora a formulação originalmente proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003) forneça um bom *schedule* para ambos os casos, ela leva os produtos que se encontram dentro da linha dutoviária a um grau de contaminação muito elevado, devido aos altos volumes formados pelas interfaces pela ausência das restrições especiais.

Os exemplos E6.3.1M2 e E6.3.2M2 mostram o efeito das restrições especiais nesta série. Note que o valor da solução ótima é inferior aos valores obtidos para os exemplos E6.2M2 e E6.1M2. Neste cenário, o duto deve ser acionado em todos os intervalos de tempo. No entanto, a solução possui um custo menor devido às menores quantidades estocadas dos derivados pelas bases de distribuição. Para o exemplo E6.3.1M2, a solução ótima foi encontrada em mais de 7700 segundos, enquanto no exemplo E6.3.2M2, a mesma foi encontrada em mais de 5300 segundos.

Nos exemplos E6.3.1M3 e E6.3.2M3, o valor da solução relaxada é melhorado quando comparado aos obtidos pelos exemplos E6.3.1M2 e E6.3.2M2, respectivamente. A adição dos cortes de entrega reduziu drasticamente o tempo computacional para 1200 segundos (84%) para o exemplo E6.3.1M3 e também para o caso E6.3.2M3, onde a melhora alcançada foi de 67% no tempo computacional.

As figuras 6.2 e 6.3 mostram os resultados operacionais obtidos para os exemplos E6.3.2M2 e E6.3.2M3.

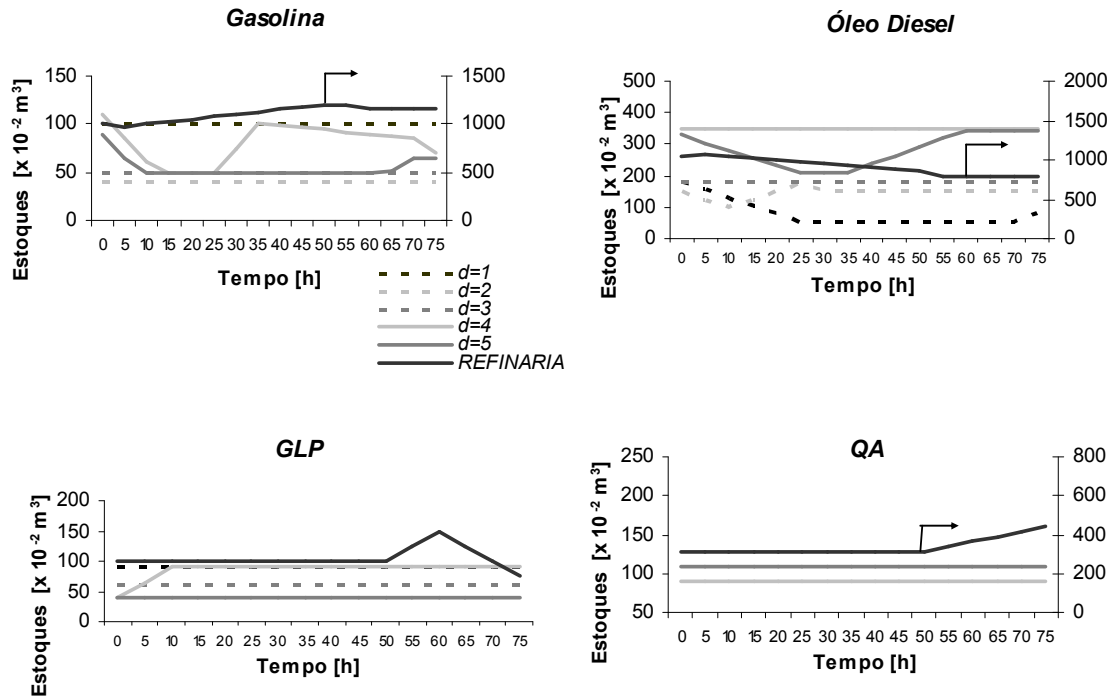


Figura 6.2 – Níveis de estoques obtidos para os exemplos E6.3.2M2 e E6.3.2M3

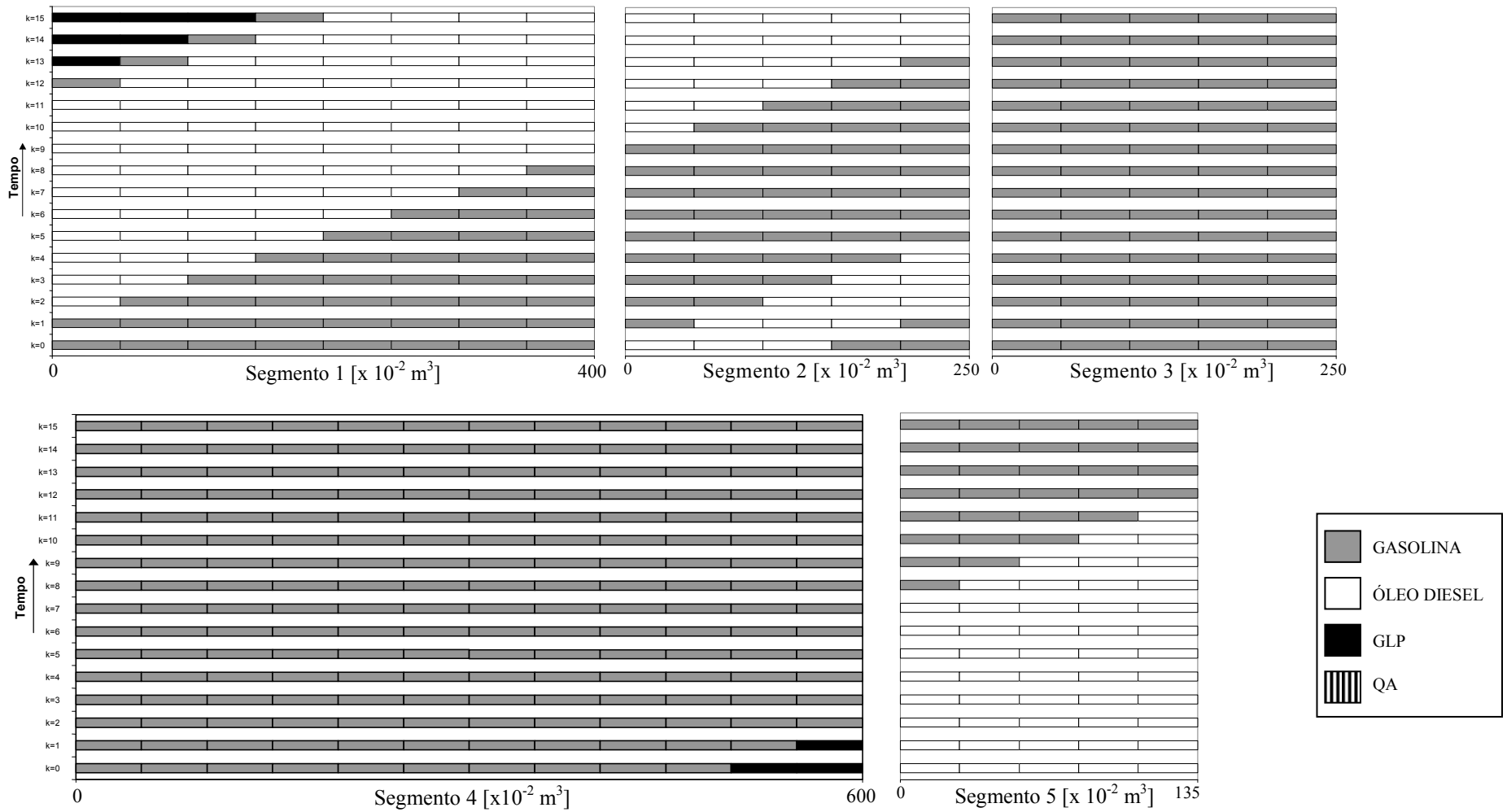


Figura 6.3 – Operação dos segmentos do duto para os exemplos E6.3.2M2 e E6.3.2M3

A figura 6.3 mostra a operação dos segmentos. Note que estes são sempre acionados quando qualquer interface é detectada. Ao longo da operação, a refinaria alimenta o duto com gasolina ( $p=1$ ) no primeiro intervalo, seguido de óleo diesel ( $p=2$ ) do segundo ao décimo primeiro intervalos de tempo. Posteriormente, o duto é alimentado novamente com gasolina ( $p=1$ ) e nos 3 últimos intervalos de tempo o mesmo recebe GLP. Cabe ressaltar que o GLP é inserido no duto devido ao seu alto custo de estocagem na refinaria assumido para estes exemplos.

Nos 2 primeiros intervalos de tempo, os dois últimos lotes do quarto segmento que contêm inicialmente GLP são enviados integralmente para a respectiva base. Isto ocorre, pois se estes fossem divididos entre a quarta base e o quinto segmento, uma interface proibida entre GLP e óleo diesel seria formada no quinto segmento. Posteriormente, nos intervalos  $k=(3,4,5)$ , os lotes preenchidos por óleo diesel no segundo segmento ( $d=2$ ) são integralmente enviados para que a demanda estabelecida seja devidamente atendida. Nos intervalos  $k=(6,7)$  grandes quantidades de gasolina são enviadas integralmente para o quarto depósito. Do oitavo ao décimo quarto intervalos de tempo, o quarto e o quinto depósitos retiram produtos do duto simultaneamente. Do oitavo ao décimo segundo intervalos de tempo, a última base de distribuição retira óleo diesel. Finalmente, no último intervalo de tempo, apenas o primeiro segmento ( $d=1$ ) é acionado para fazer com as demandas de óleo diesel ( $p=2$ ) sejam atendidas nos seus respectivos depósitos.

Para todos os casos dos cenários de médias e altas demandas, os cortes de entrega melhoram o valor da solução relaxada para o problema proposto. Isso ocorre, pois as restrições especiais e os cortes de entrega impõem limites inferiores para o número de intervalos de tempo que os segmentos do duto devam ser acionados. As restrições especiais impõem esses limites devido à contaminação dos produtos dentro da linha dutoviária.

Por outro lado, os cortes de entrega fornecem limites inferiores através de relações lógicas entre as demandas estabelecidas e os estoques iniciais dentro dos segmentos do duto. No entanto, para cenários de médias e baixas demandas, a inclusão dos cortes de entrega não se mostra vantajosa com relação ao desempenho computacional dos modelos. Nos cenários de médias demandas, os limites impostos pelos cortes de entrega não garantem uma melhoria no desempenho computacional, porém estes melhoram drasticamente o desempenho computacional nos modelos propostos para cenários de altas demandas.

A seguir, os cortes de entrega são testados nas formulações originais que não consideram as restrições especiais a fim de se verificar o quanto este pode melhorar as soluções inteiras obtidas para os cenários de médias e altas demandas.



### 6.3. Resultados para formulações alternativas dos cortes de entrega e das restrições especiais

Neste exemplo, são mostrados alguns aspectos especiais das formulações propostas no capítulo anterior. Primeiramente, o efeito isolado dos cortes de entrega na formulação original proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003) é estudado. Posteriormente, as restrições especiais são adicionadas na formulação original do problema, porém desagregando-as em relação à variável tempo. Este estudo é realizado a partir da formulação M4.

Este estudo tem o intuito de verificar o quanto as soluções viáveis encontradas nos cenários de médias e altas demandas pelas formulações originais podem ser melhoradas. A tabela 6.11 mostra o desempenho computacional para os referidos exemplos, onde apenas soluções viáveis foram encontradas, e ainda os seus máximos respectivos *gaps* em relação à solução ótima. Note que foi adotado um tempo computacional máximo de 10000 segundos para todos os exemplos.

Tabela 6.11 – Resultados para a formulação original e o modelo M4

<i>Formulação</i>	<i>Demandas Médias</i>		<i>Demandas Altas</i>			
	E6.2M1	E6.2M4	E6.3.1M1	E6.3.1M4	E6.3.2M1	E6.3.2M4
Solução relaxada*	25669,0	26789,1	25170,4	26286,8	24999,6	26143,9
Solução encontrada*	30199,7	29838,4	29267,3	29176,6	29333,9	28932,6
Número de Equações	9603	9608	9603	9608	9603	9608
Número de Var. Contínuas	6316	6316	6316	6316	6316	6316
Número de Var. Binárias	420	420	420	420	420	420
<i>Gap</i> (%)	8,4	5,9	5,6	2,7	5,6	2,3

\*Unidades para os valores das soluções relaxadas e encontradas: [C (x10<sup>-2</sup>\$)]

A tabela 6.11 mostra que os resultados computacionais para os exemplos referentes ao modelo M4 são de qualidade superior aos obtidos por Rejowski Jr. e Pinto (2003). No entanto, as soluções ótimas dos problemas não foram encontradas dentro do limite para o tempo computacional estabelecido (10000 segundos). Para estes exemplos, os cortes inteiros melhoram

o valor da solução relaxada dos problemas, a qualidade da solução viável obtida e conseqüentemente o *gap* relativo encontrado na busca. Os problemas possuem um número maior de soluções viáveis quando as restrições especiais não são consideradas, mesmo para o cenário de demandas altas (E6.3), onde o duto deve ser acionado em todos os intervalos de tempo. Adicionalmente, a ausência das restrições especiais na formulação torna os problemas de demandas médias (E6.2) como os de mais difícil resolução. Isto pode ser explicado, pois uma vez que o duto opera em modo descontínuo, o número de alternativas a serem examinadas pelo algoritmo *Branch&Bound* é maior, quando comparado aos problemas do cenário de demandas altas (E6.3). Neste caso, a operação de transporte pode ser conduzida no começo do horizonte de tempo, ou próximo do seu final, ou ainda, ela pode ser uniformemente distribuída ao longo do tempo de operação.

Finalmente, as restrições especiais do problema são adicionadas na formulação original do problema na sua forma desagregada em relação à variável tempo. Desta forma, os modelos M5 e M6 substituem as restrições (5.2), (5.4) e (5.7) por (5.1), (5.3) e (5.6), respectivamente. A diferença entre ambos é que o primeiro citado (M5) não contempla os cortes de entrega, enquanto o último (M6) os considera em sua formulação. Estas últimas restrições consideram as imposições de operação para um dado segmento do duto no caso de existir uma interface no mesmo, porém para cada intervalo de tempo até que a mesma seja removida. Segundo Williams (1995), as restrições escritas sob esta forma fornecem uma relaxação mais justa para os problemas. O autor afirma que a idéia de se desagregar uma restrição em várias se baseia em adicionar mais restrições ao problema de maneira que o mesmo se torne mais restrito e desta forma, soluções relaxadas de melhor qualidade podem ser obtidas para os problemas. Por outro lado, elas adicionam mais restrições aos mesmos, podendo assim prejudicar a busca pela solução ótima do algoritmo *Branch&Bound*.

Os exemplos de melhor desempenho computacional nas séries de demandas médias e altas mostradas no item anterior são escolhidos para este estudo. Cabe ressaltar que para a série de demanda média, o exemplo escolhido é o E6.2M2, pois este foi o que obteve o melhor desempenho computacional dentre os modelos propostos. No entanto, para a série de demandas altas, os melhores resultados escolhidos são os dos exemplos E6.3.1M3 e o E6.3.2M3, cuja formulação contempla os cortes de entrega. Desta forma, estes exemplos são comparados aos respectivos exemplos E6.3.1M6 e E6.3.2M6. A tabela 6.12 mostra os resultados.

Tabela 6.12 – Resultados comparativos para as formulações M5 e M6

<i>Formulação</i>	<i>Demandas Médias</i>		<i>Demandas Altas</i>			
	E6.2M2	E6.2M5	E6.3.1M3	E6.3.1M6	E6.3.2M3	E6.3.2M6
Solução relaxada	27125,49	27213,41	27423,2	27430,2	27277,9	27282,70
Solução inteira*	31401,62	31401,62	30196,2	30196,2	30245,9	30245,9
<i>Gap (%)</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Número de Equações	9703	10053	9708	10058	9708	10058
Número de Var. Contínuas	6596	6596	6596	6596	6596	6596
Número de Var. Binárias	420	420	420	420	420	420
Tempo CPU [s]	2807	3700	1209	1199	1775	2607
Nós visitados	5695	10468	2698	2505	5007	5687

\*Unidades para os valores das soluções relaxadas e encontradas: [C ( $\times 10^{-2}$  \$)]

Para o caso de demanda média, conforme Williams (1995), o exemplo E6.2M5 gera uma solução relaxada de melhor qualidade, embora o tempo computacional para a obtenção da solução ótima tenha sido 31,8% superior ao obtido pelo exemplo E6.2M2. O exemplo E6.2M5 possui 350 equações a mais do que o E6.2M2 e, para o presente caso, estas prejudicam a busca pela solução ótima no algoritmo do solver *CPLEX 7.0* (ILOG, 2000). Note que a melhoria na solução relaxada do exemplo E6.2M5 para o E6.2M2 foi de apenas 0,32%. Desta forma, esta melhora na solução relaxada obtida não se mostrou suficiente para que um melhor desempenho computacional também fosse encontrado, de acordo com Williams (1995).

Para os casos de demandas altas, o exemplo E6.3.1M6 mostrou uma melhora no desempenho computacional de 0,82% em relação ao exemplo E6.3.1M3, enquanto o E6.3.2M6 obteve um tempo computacional 47% superior ao obtido pelo exemplo E6.3.2M3. Desta forma, as restrições especiais, quando escritas sob a sua forma desagregada em relação à variável tempo não fornecem necessariamente uma melhora no tempo computacional, embora as mesmas obtenham melhores soluções relaxadas para os problemas. Uma hipótese para que isto aconteça se deve ao fato de o algoritmo empregado pelo solver *CPLEX 7.0* (ILOG, 2000) utilizar regras heurísticas na busca pela solução ótima dos problemas. Embora o número de restrições adicionais que as restrições especiais na sua forma desagregada incluem na formulação, elas aumentam o tamanho

dos problemas a serem calculados durante a busca, prejudicando o desempenho computacional do algoritmo. Para os presentes exemplos, as melhorias geradas pelas restrições especiais na sua forma desagregada nos valores das soluções relaxadas para os problemas não foram suficientes para compensar o acréscimo de restrições que estas geram nos mesmos e por esta razão, o algoritmo do *solver* CPLEX (ILOG, 2000) apresentou um desempenho computacional pior em relação ao obtido pela formulação com as restrições especiais na forma agregada.

#### *6.4. Relaxações das restrições especiais e do atendimento das demandas*

Nesta seção é mostrada uma nova formulação que propõe modificações nas formulações mostradas até este ponto do trabalho. A primeira relaciona a penalidade da operação dutoviária quando os segmentos do duto param de operar e contêm interfaces, ao invés da sua proibição conforme proposto pelas restrições especiais no capítulo anterior. A segunda modificação concerne penalidades na operação dutoviária devido ao atraso no atendimento das demandas por parte dos clientes. Posteriormente são mostrados exemplos em que esta nova formulação é comparada com as previamente desenvolvidas neste trabalho. Tais formulações são denotadas por M5 e M6.

##### *6.4.1. Penalidade pelo não atendimento das demandas*

Um problema recorrente em atividades de programação de produção e de *scheduling* consiste da incapacidade das unidades produtoras e/ou distribuidoras de não atender as demandas estabelecidas. No caso específico do sistema estudado neste trabalho, as bases conectadas ao duto devem suprir os seus respectivos mercados consumidores. Todos os modelos apresentados anteriormente assumem que as demandas dos produtos devem ser exatamente satisfeitas ao final do horizonte de tempo operacional.

O atendimento das demandas requer que não só as quantidades sejam atendidas, mas que os prazos também sejam satisfeitos. No caso do não atendimento de um destes requisitos, um custo associado a estes deve ser adicionado à função objetivo. A forma de como as penalidades afetam a operação depende dos contratos firmados entre os clientes e a empresa responsável pela produção e distribuição dos produtos envolvidos. Para os exemplos mostrados nesta seção assume-se que as quantidades dos produtos adotadas nos exemplos E6.3.1M2 e E6.3.2M3 podem ou não ser exatamente atendidas, estando sujeitas a penalidades de acordo com o contrato

firmado entre ambas as partes envolvidas na operação. Desta forma, a hipótese **H14** deve ser substituída pela **H17**, dada a seguir:

**H17** – As demandas estabelecidas por alguns mercados consumidores devem preferencialmente ser exatamente atendidas ao final do horizonte de tempo, com a imposição de penalidades na operação dutoviária no caso de não serem exatamente satisfeitas.

As penalidades no custo da operação dutoviária são proporcionais à diferença entre as demandas estabelecidas e as quantidades entregues aos mercados consumidores. Esta condição só é aplicada para demandas com valores maiores do que zero. Desta forma, o conjunto  $DEMP_d$ , o parâmetro  $CDEL_{p,d}$  e a variável  $SF_{p,d}$  são definidos a seguir:

- $DEMP_d$  conjunto que indica se o mercado consumidor conectado à base  $d$  penaliza o atraso da entrega do produto  $p$  ao final do horizonte de tempo;
- $CDEL_{p,d}$  parâmetro que representa o custo unitário pelo não atendimento da quantidade do produto  $p$  não entregue ao mercado consumidor conectado à base  $d$  no término da operação;
- $SF_{p,d}$  variável não negativa que denota a quantidade do produto  $p$  não entregue ao mercado consumidor conectado à base  $d$  no término da operação.

Para os presentes exemplos, somente os produtos com demandas não-nulas na base  $d$  compõem o conjunto  $DEMP_d$ . Desta forma, para os produtos que pertençam ao conjunto  $DEMP_d$ , a equação de atendimento de demandas (4.32) mostrada no capítulo 4 deve ser substituída pela (6.1), mostrada a seguir. Os atendimentos das demandas para os produtos que não pertencem a este conjunto continuam a ser representados pela equação (4.32). A variável  $SF_{p,d}$  representa a quantidade não entregue do produto  $p$  ao mercado consumidor ao final da operação (*shortfall*). Para os exemplos mostrados nesta seção, assume-se que esta variável é não negativa, ou seja, a empresa operadora do sistema dutoviário não é gratificada no caso de suprir o mercado com uma quantidade maior do que a acordada previamente. Note que esta condição pode ser facilmente representada se a variável  $SF_{p,d}$  puder assumir valores reais negativos.

$$\sum_{k=1}^K VOM_{p,d,k} + SF_{p,d} = DEM_{p,d} \quad \forall d, p \in DEM P_d \quad (6.1)$$

$$\sum_{k=1}^K VOM_{p,d,k} = DEM_{p,d} \quad \forall d, p \notin DEM P_d \quad (4.32)$$

Finalmente, para que o não atendimento das demandas ao final da operação seja contemplado no problema operacional, dois aspectos devem ser levados em conta. O primeiro é que um termo envolvendo a variável  $SF_{p,d}$  e o custo unitário  $CDEL_{p,d}$  seja adicionado à função objetivo do problema original. O segundo é que além das restrições especiais, as restrições auxiliares (5.9) e os cortes de entrega (5.23) não façam parte da formulação em presença da hipótese **H17**.

Neste contexto de não obrigatoriedade do atendimento de demandas, novas decisões conflituosas se tornam presentes. Considere um cenário caracterizado pela impossibilidade do atendimento de todas as demandas. Neste caso, duas situações extremas podem ocorrer. A primeira é a minimização dos custos agregados às penalidades do não atendimento. Estas situações decorrem das altas penalidades unitárias impostas pelo não atendimento de demandas. Neste caso, o sistema dutoviário deve distribuir os derivados entre as bases continuamente e os estoques destas devem ser utilizados ao máximo a fim de se minimizar as penalidades desta natureza ao final do horizonte de tempo. A segunda situação extrema é a minimização dos custos operacionais do sistema, ou seja, quando as penalidades pelo não atendimento às demandas são inferiores aos custos operacionais. Neste caso, o sistema de distribuição deve operar durante um curto período do horizonte de tempo. Desta forma, altas quantidades de demandas não são atendidas ao final do horizonte de tempo.

Ressalta-se que o não atendimento das demandas pode ser tratado não somente pela quantidade, mas pelo atraso da data de entrega acordada. Se a representação uniforme do tempo for adotada, a estratégia utilizada por Rejowski Jr. (2001) com janelas de tempo pode ser utilizada, embora esta característica operacional seja melhor representada através de uma formulação que utilize a representação contínua do tempo.

#### 6.4.2. Penalidade por paradas do duto com interfaces

As restrições especiais se mostram eficientes e os exemplos propostos retratam fielmente a condição de proibição de parada operacional do sistema dutoviário quando o mesmo possui

qualquer interface. No entanto, as mesmas podem fazer com que modelo MILP proposto para o *scheduling* de sistemas dutoviários se torne altamente restritivo. As principais consequências de tais restrições são verificadas na estocagem dos derivados nas bases de distribuição conectadas ao sistema dutoviário. As restrições especiais podem fazer com que uma dada base seja obrigada a retirar produtos do duto até que uma interface seja totalmente removida do seu respectivo segmento e por outro lado estas levam as bases de distribuição a uma condição de estocagem inviável devido às suas baixas capacidades de estocagem. Isto é uma situação comum em uma operação dutoviária, principalmente quando os clientes não retiram os produtos continuamente das bases de distribuição ao longo do *schedule*. Desta forma, as bases são obrigadas a estocar determinados produtos ao longo de um período do *schedule* mesmo sem retirada por parte dos clientes e, em outros momentos, os estoques são reduzidos devido às retiradas dos produtos nos depósitos por parte dos clientes. Por outro lado, esta condição também pode obrigar as bases a uma condição de antecipação de estocagem dos derivados devido à falta dos mesmos dentro da linha dutoviária ou pela possibilidade de o duto alimentar outras bases.

Desta forma, em determinadas situações a interface necessita residir no interior da linha dutoviária por um determinado período devido às limitações de estocagem nas bases conectadas ao duto. No entanto, qualquer interface, especialmente as de produtos com difusividades altas têm o seu volume acrescido em altas quantidades quando permanecem sob esta condição no duto, representando um custo adicional para o posterior tratamento. Para o presente caso, estes custos dependem do período de tempo (número de intervalos de tempo) em que as interfaces permanecem paradas dentro do duto, das propriedades físico-químicas dos seus produtos componentes e dos valores agregados dos mesmos. Portanto, nesta seção do trabalho são propostas novas formulações, em que as restrições especiais (5.2), (5.4) e (5.7) devem ser substituídas por novas restrições e variáveis adicionais que representem uma condição que penalize a parada de um sistema dutoviário quando o mesmo estoca interfaces ao longo de sua extensão, ao contrário dos modelos M2 e M3. Adicionalmente, a hipótese **H16** deve ser substituída pela **H18**, descrita a seguir:

**H18** – Um dado segmento do duto pode estar inoperante ou parado caso este contenha uma interface em um dado instante de tempo.

A primeira formulação assume que os custos de parada de interface dependem dos seus produtos componentes e do tempo em que estes permanecem sob esta condição dentro da linha dutoviária; a equação que representa a função objetivo do problema (4.1) é substituída por (6.2). No presente caso, esta contempla todos os termos dados por (4.1) e dois adicionais sendo o primeiro deles composto pelas variáveis relativas ao não atendimento das demandas determinadas e o último por um custo de parada do segmento  $d$  com interfaces formadas pelos produtos  $p$  e  $p'$  nos intervalos de tempo  $k$  ( $CYSTOP_{p,p',k}^d$ ).

$$\begin{aligned} \text{Min } C = & \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{p=1}^P CER_p \cdot VR_{p,k} + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D CED_{p,d} \cdot VD_{p,d,k} \right] \cdot \delta + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K \frac{CP_{p,d,k} \cdot XD_{p,d,k}}{\eta_k} \cdot U_d + \\ & \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K \frac{CP_{p,d,k} \cdot XW_{p,d,k}}{\eta_k} \cdot (U_d - U_{d+1}) + \sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K CONTACT_{p,p'} \cdot TY_{p,p',k}^d + \\ & \sum_{d=1}^D \sum_{p \in DEMP_d} CDEL_{p,d} \cdot SF_{p,d} + \sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K CYSTOP_{p,p',k}^d \end{aligned} \quad (6.2)$$

O último termo da equação (6.2) influencia a operação dutoviária a partir da definição dos seguintes parâmetros e variáveis:

- $CYSTOP_{p,p',k}^d$  variável que representa o custo de parada de interfaces entre os produtos  $p$  e  $p'$  detectadas no intervalo de tempo  $k$  no segmento  $d$  do duto
- $CSTOP_{p,p'}$  parâmetro que representa o custo unitário de parada de interfaces entre os produtos  $p$  e  $p'$
- $TYS\_INI_{p,p',l}^d$  variável contínua que indica quantos intervalos de tempo uma interface entre os produtos  $p$  e  $p'$  detectada no início da operação permanece parada dentro do segmento;
- $TYS_{p,p',k}^d$  variável contínua que indica quantos intervalos de tempo uma interface entre os produtos  $p$  e  $p'$  detectada no intervalo de tempo  $k$  permanece parada dentro do segmento;



O parâmetro  $CSTOP_{p,p'}$ , que representa o custo unitário de parada de uma interface formada pelos produtos  $p$  e  $p'$ , é definido pela miscibilidade dos mesmos, dependendo de suas propriedades físico-químicas e de seus valores agregados<sup>11</sup>. Para os exemplos mostrados neste trabalho, este parâmetro é baseado nesta última característica, embora uma análise mais detalhada seja necessária para que os mesmos sejam mais precisamente determinados. Note também que este parâmetro assume valores significativamente maiores em relação à  $CONTACT_{p,p'}$ , por retratar um grau mais elevado dos produtos formadores das interfaces. Desta forma, o custo de detecção de interfaces ( $CONTACT_{p,p'}$ ) deve ser interpretado como um custo inicial pela formação de interfaces e pelo contato dos produtos caso os mesmos percorram o segmento dutoviário sem paradas. O parâmetro  $CSTOP_{p,p'}$  representa o custo de contato entre os produtos formadores da interface enquanto o segmento do duto estiver ocioso.

O custo de contaminação que compõe o último termo da equação (6.2) é função deste parâmetro e das variáveis definidas anteriormente, segundo a restrição (6.3). Note que esta é linear, pois a duração dos intervalos de tempo é fixa e dada pelo parâmetro  $\delta$ ; para uma formulação em tempo contínuo, esta equação se tornaria não linear, uma vez que a duração dos intervalos de tempo é variável neste tipo de formulação.

$$CYSTOP_{p,p',k}^d \geq \left[ CSTOP_{p,p'} \cdot \left( TYS_{p,p',k}^d + \sum_{l \leq L_d} TYS\_INI_{p,p',l}^d \right) \right] \cdot \delta \quad \forall p,p' \in TS_{p,p'}, \forall d, k \quad (6.3)$$

Finalmente, as restrições (5.2), (5.4) e (5.7) são substituídas respectivamente por (6.4), (6.5) e (6.6), dadas a seguir:

$$TYS\_INI_{p,p',l}^d \geq TRAN\_INI_{p,p',l}^d \cdot [L_d - l] - \sum_{k \leq K_d - l} XS_{d,k} \quad \forall p,p' \in TS_{p,p'}, \forall d, \forall l \leq L_d \quad (6.4)$$

$$TYS_{p,p',k}^d \geq TY_{p,p',k}^d \cdot [K_d - 1] - \sum_{k'=k+1}^{k+K_d-1} XS_{d,k'} \quad \forall p,p' \in TS_{p,p'}, \forall d, k \leq K - K_d + 1 \quad (6.5)$$

$$TYS_{p,p',k}^d \geq TY_{p,p',k}^d \cdot [K - k] - \sum_{k'=k+1}^K XS_{d,k'} \quad \forall p,p' \in TS_{p,p'}, \forall d, K - K_d \leq k < K \quad (6.6)$$

<sup>11</sup> Para o presente caso, define-se valor agregado de um produto como o seu preço de venda. Este valor pode ser representado por preços unitários em bases mássicas ou volumétricas comumente utilizados em formulações que maximizam o lucro de uma dada operação.

As variáveis  $TYS\_INI_{p,p',l}^d$  e  $TYS_{p,p',k}^d$  indicam o número de intervalos de tempo uma dada interface permanece parada dentro do segmento  $d$  do duto após a sua detecção no início da operação ( $TYS\_INI_{p,p',l}^d$ ) ou no intervalo de tempo  $k$  ( $TYS_{p,p',k}^d$ ). A restrição (6.4) impõe valores inteiros positivos quando uma interface detectada no início da operação entre o lote  $l$  e o seu subsequente ( $TRAN\_INI_{p,p',l}^d$ ) permanece parada no interior de um dado segmento  $d$  do duto.

As restrições (6.5) e (6.6) são válidas para a penalidade de paradas dos segmentos do duto quando interfaces são formadas no decorrer da operação ( $TY_{p,p',k}^d$ ). A primeira citada é válida para intervalos de tempo menores ou iguais a  $K-K_d+1$  e a última para maiores do que este limite. Sempre que uma destas variáveis ( $TYS\_INI_{p,p',l}^d$  e  $TYS_{p,p',k}^d$ ) tomar valores maiores do que zero, a restrição (6.3) é ativada. Quando nenhuma interface é detectada nos segmentos do duto, estas restrições (6.4), (6.5) e (6.6) são relaxadas e as variáveis  $TYS\_INI_{p,p',l}^d$  e  $TYS_{p,p',k}^d$  se igualam a zero por serem não negativas, mesmo quando o segmento do duto opera nos intervalos de tempo relacionados nas respectivas restrições. Cabe ressaltar que para esta situação, a restrição (6.3) é trivialmente satisfeita.

Note que se os termos envolvidos nas restrições especiais  $\left( (TY_{p,p',k}^d \cdot [L_d - 1]) \text{ e } \left( \sum_{k'} XS_{d,k'} \right) \right)$  fossem simplesmente transferidos para a função objetivo associada ao custo  $CYSTOP_{p,p'}$ , a contabilização dos custos operacionais não seria corretamente aplicada. Esta condição seria satisfeita somente quando uma interface fosse detectada, porém em uma situação caracterizada pela ausência de interfaces no segmento do duto ( $TY_{p,p',k}^d = 0 \forall p, p', d, k$ ), as variáveis de operação do segmento do duto  $\left( \sum_{k'} XS_{d,k'} \right)$  podem assumir valores positivos. Portanto, nesta situação o custo seria contabilizado de maneira incorreta, justificando a consideração das variáveis  $TYS\_INI_{p,p',l}^d$  e  $TYS_{p,p',k}^d$  nesta formulação.

As restrições (6.7) e (6.8) mostram que estas variáveis lógicas assumem valores iguais a zero para produtos que pertençam ao conjunto de interfaces proibidas na operação ( $FS_{p,p'}$ ). Estas restrições não necessitam compor esta formulação, pois as variáveis ( $TY_{p,p',k}^d$ ) que pertencem ao conjunto  $FS_{p,p'}$  assumem valores iguais a zero.

$$TYS\_INI_{p,p',k}^d = 0 \quad \forall p,p' \in FS_{p,p'}, \forall d,k \quad (6.7)$$

$$TYS_{p,p',k}^d = 0 \quad \forall p,p' \in FS_{p,p'}, \forall d,k \quad (6.8)$$

As restrições (6.4), (6.5) e (6.6) são análogas às (5.2), (5.4) e (5.7), respectivamente. No entanto, note que estas novas restrições não proíbem a parada de um segmento do duto quando uma interface é detectada, mas penalizam tal condição. Ressalta-se que as variáveis  $TYS\_INI_{p,p',l}^d$  e  $TYS_{p,p',k}^d$  estão associadas a uma variável presente na função objetivo e assumem valores inteiros sempre que as restrições (6.4), (6.5) e (6.6) são ativadas, e desta forma podem ser definidas como contínuas. Em uma situação em que estas restrições são relaxadas, tais variáveis assumem valores nulos, pois são definidas como não negativas. Finalmente, define-se o modelo M7 com as mesmas restrições mostradas no capítulo 4, com a nova função objetivo (6.2), com as variáveis  $SF_{p,d}$ ,  $CYSTOP_{p,p',k}^d$ ,  $TYS\_INI_{p,p',l}^d$  e  $TYS_{p,p',k}^d$  e com as restrições (6.1), (6.3), (6.4), (6.5), (6.6), (6.7) e (6.8) em substituição a (5.2), (5.4) e (5.7). Note também que devido à não obrigatoriedade do atendimento das demandas, as restrições auxiliares (5.9) e os cortes de entrega (5.23) não fazem parte do modelo M7.

A seguir, o modelo M7 é aplicado à série E6.3.2, onde se define o exemplo E6.3.2M7 que estuda a operação dutoviária sujeita aos custos de não atendimento de demandas e de parada do duto com interfaces são estudados.

#### 6.4.3. Exemplo com não atendimento de demanda e com penalidade de parada do duto com interfaces

A tabela 6.13 mostra os custos de parada do duto com diferentes interfaces e os custos de não atendimento de demandas ao final do horizonte de tempo para o exemplo E6.3.2M7, enquanto a tabela 6.14 ilustra os seus resultados computacionais. Note que para este exemplo, somente os pares produtos/bases com demandas não nulas estão submetidos a penalidades pelo não atendimento das demandas estabelecidas, ou seja, compõem o conjunto  $DEMP_d$ .

Tabela 6.13 – Custos de parada do duto com diferentes interfaces e penalidades pelo não atendimento em relação às demandas

<i>Custo de parada do duto com diferentes interfaces [x 10<sup>-2</sup> (\$)]</i>					
<i>Produto</i>	<i>CSTOP<sub>1,p'</sub></i>	<i>CSTOP<sub>2,p'</sub></i>	<i>CSTOP<sub>3,p'</sub></i>	<i>CSTOP<sub>4,p'</sub></i>	
Gasolina (1)	0	30	37	35	
Óleo Diesel (2)	30	0	X	X	
GLP (3)	37	X	0	X	
QAV (4)	35	X	X	0	

<i>Custo de não atendimento para cada produto e cada mercado consumidor [x 10<sup>-2</sup> (\$)/m<sup>3</sup>]</i>					
<i>Produto</i>	<i>CDEL<sub>p,1</sub></i>	<i>CDEL<sub>p,2</sub></i>	<i>CDEL<sub>p,3</sub></i>	<i>CDEL<sub>p,4</sub></i>	<i>CDEL<sub>p,5</sub></i>
Gasolina (1)	50	25	50	200	175
Óleo Diesel (2)	100	25	75	100	175
GLP (3)	50	0	85	150	50
QAV (4)	0	0	0	50	50

Tabela 6.14 – Resultados computacionais para o exemplo E6.3.2M7

<i>Formulação</i>	E6.3.2M7
Sol. relaxada [C (x10 <sup>-2</sup> \$)]	27571,10
Sol. encontrada [C (x10 <sup>-2</sup> \$)]	30111,30
<i>Gap (%)</i>	5,41
Número de Equações	12707
Número de Variáveis Contínuas	8852
Número de Variáveis Binárias	420
Tempo computacional [s]	30000
Nós visitados <sup>12</sup>	6127

<sup>12</sup> Para a enumeração de nós percorridos dos exemplos que utilizam os modelos M7 e M8, foi utilizada a opção de *strong branch* (ramificação forte), (ILOG, 2000), justificando desta forma o baixo número de nós visitados para estes exemplos.

O modelo foi testado em um microcomputador *Pentium II* 400 MHz utilizando-se o sistema CPLEX 7.0 (ILOG, 2000). O tempo computacional máximo estipulado para este exemplo foi de 30000 segundos. Como mostra tabela 6.14, uma solução inteira com *gap* de 5,41% foi encontrada para este exemplo. Isto pode ser justificado pelo aumento excessivo no número de variáveis que esta formulação gera e ao mesmo tempo pelo menor número de restrições em relação aos modelos M2, M3 e M5, fazendo com que a região viável do problema seja maior. Note que o valor da solução ótima deste exemplo (\$30111,30) é no mínimo 5,41% inferior ao da solução encontrada e é, portanto superior ao valor encontrado pela solução ótima dos exemplos E6.3.2M2 e E6.3.2M3. Desta forma, a solução ótima do problema também é distinta das encontradas pelos modelos estudados anteriormente.

O exemplo E6.3.2M7 conseguiu satisfazer todas as demandas ao final do horizonte de tempo. Desta forma, a penalidade das demandas não trouxe custos adicionais para a função objetivo, embora esta característica aumente o número de soluções viáveis do problema.

Entretanto, os custos de parada dos segmentos dutoviários alteraram o custo total obtido para a operação e no *schedule* proposto em relação ao exemplo E6.3.2M3. Uma interface foi detectada no sexto intervalo de tempo ( $k=6$ ), no primeiro segmento ( $d=1$ ) e entre gasolina e óleo diesel ( $p=1$  e  $p'=2$ ) e permanece parada no duto por dois intervalos de tempo ( $\{k=9,10\}$ ). Desta forma, a variável  $TYS_{1,2,6}^1$  assume valores iguais a 2 e a variável  $CYSTOP_{2,1,3}^1$  torna-se 300. Nestes mesmos intervalos de tempo uma outra interface entre gasolina e óleo diesel detectada no sétimo intervalo de tempo ( $k=7$ ) no quinto segmento ( $d=5$ ) também permanece parada.

A complexidade de resolução do modelo M7 é maior do que a de todos os modelos apresentados anteriormente devido à inclusão das restrições de penalidades pelo não atendimento das demandas e pela parada dos segmentos do duto com interfaces no seu interior. Estas restrições se mostram importantes para o *scheduling* de operações dutoviárias e em relação aos modelos apresentados anteriormente trazem significativas alterações. Mesmo que nos exemplos estudados as bases tenham conseguido atender a todas as demandas, estas restrições aumentam o número de soluções viáveis para o problema. O mesmo fato ocorre com as restrições de penalidade de parada dos segmentos do duto com interfaces em virtude das variáveis  $CYSTOP_{p,p',k}^d$ ,  $TYS\_INI_{p,p',l}^d$  e  $TYS_{p,p',k}^d$  e suas respectivas restrições. Embora a solução ótima não tenha sido encontrada, cabe ressaltar que a solução encontrada é de boa qualidade, em vista da grande complexidade do modelo proposto e do pequeno valor do *gap* relativo (tabela 6.14).

A figura 6.4 mostra os níveis de estoque para o exemplo E6.3.2M7. Cabe ressaltar a grande variação do estoque de gasolina apresentado na quarta base ( $d=4$ ). Inicialmente a base utiliza o seu estoque inicial para alimentar o mercado consumidor. Do quarto ao sexto intervalo de tempo somente ela retira este produto do último lote do segmento e o estoque de gasolina aumenta consideravelmente. Nos sétimo e oitavo, décimo-primeiro, décimo-segundo e décimo-terceiro intervalos de tempo, esta base retira o referido produto simultaneamente à quinta base, que retira óleo diesel. Neste instante, a demanda por gasolina na quarta base é satisfeita. Nos décimo-quarto e décimo-quinco intervalos, ambas as bases retiram gasolina do duto, porém a quinta retira este produto para satisfazer as demandas e por isso, o estoque na quarta base volta a aumentar. Neste exemplo, a refinaria alimenta o duto com óleo diesel do primeiro ao oitavo e no décimo intervalos de tempo. Nos 2 intervalos subseqüentes, a refinaria alimenta o sistema dutoviário com gasolina e nos 3 últimos intervalos com GLP.

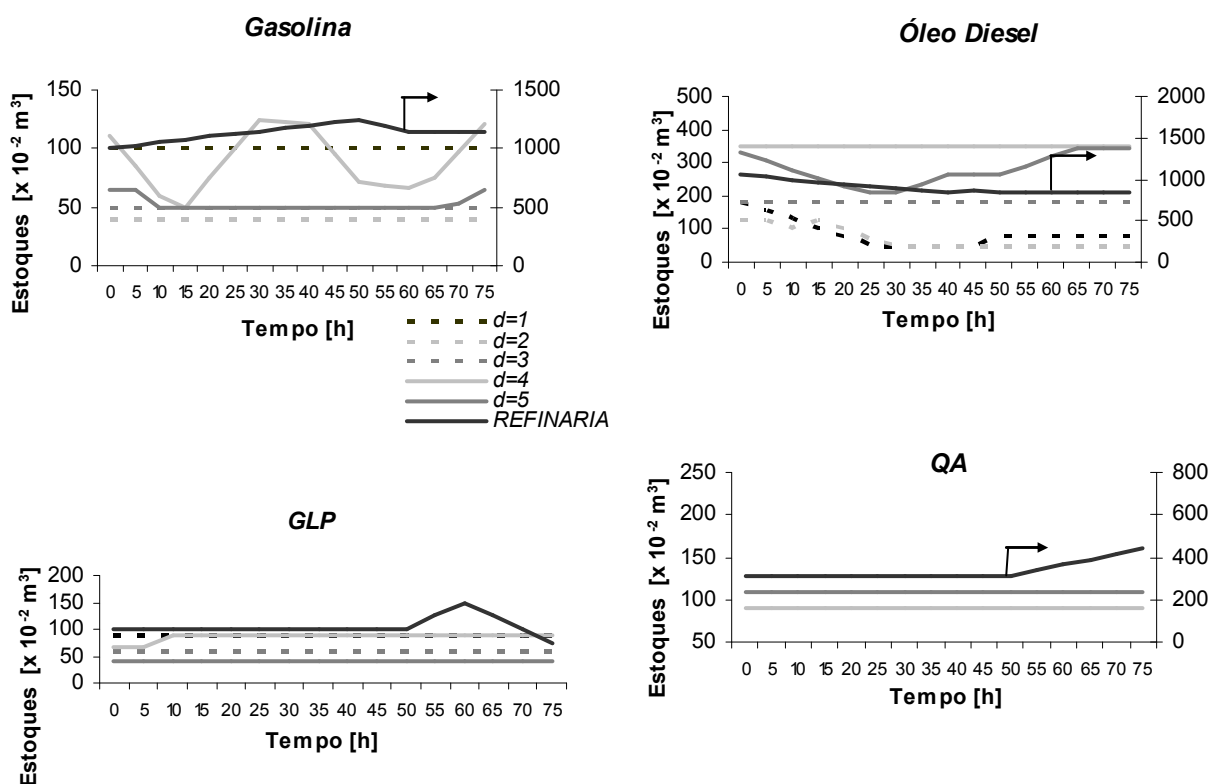


Figura 6.4 – Níveis de estoque para o exemplo E6.3.2M7

A seguir é apresentada uma análise de sensibilidade para as demandas dos produtos através de uma situação operacional até então não apresentada para o referido sistema dutoviário. Esta é

caracterizada pela paralisação do recebimento de produtos por parte dos mercados consumidores das respectivas bases de distribuição.

#### 6.4.4. *Análise de sensibilidade para o não atendimento das demandas*

Uma situação comum em sistemas de produção e de distribuição se dá quando clientes paralisam as suas atividades de recebimento de produtos e as unidades de produção/distribuição podem ser obrigadas a estocar quantidades por este período ou paralisar as suas atividades. Estas situações ocorrem com frequência em sistemas operacionais reais e são ditadas pelos clientes. Exemplos de paralisações de atividade do recebimento dos produtos se dão pelas paradas operacionais das empresas consumidoras durante domingos, feriados e períodos noturnos. Cabe ressaltar que estas paralisações são determinadas por regras internas das empresas responsáveis pelo recebimento dos produtos e cabe aos sistemas operacionais a correta administração dos seus estoques para que as demandas sejam atendidas ao final do horizonte de tempo. Nestes períodos de paralisações a estocagem nos sistemas de produção/ distribuição torna-se crítica, podendo ou não ditar a paralisação de unidade produtoras, fazendo com que o *schedule* seja mais complexo. No caso específico do sistema dutoviário estudado, os clientes são determinados pelos mercados consumidores e nesta seção deseja-se conhecer o efeito que uma paralisação no recebimento dos produtos por parte deles tem na operação, pois todos os exemplos estudados nas seções anteriores satisfazem as demandas ao final do horizonte de tempo operacional.

Desta forma, apresenta-se o modelo M8 como o modelo que contém todas as restrições presentes no modelo M7, com as penalidades de contaminação das interfaces presentes dentro da linha dutoviária e com as de não atendimento às demandas estabelecidas. Estas últimas se baseiam no conjunto  $KREC_{p,d}$  definido a seguir:

$KREC_{p,d}$  conjunto de intervalos de tempo em que os clientes não retiram o produto  $p$  da base de distribuição  $d$

Este modelo é aplicado em situações em que os clientes não recebem produtos durante os intervalos de tempo  $k$  que pertençam ao conjunto  $KREC_{p,d}$ . Como foi mencionado anteriormente, esta decisão é tomada pelo cliente e a empresa provedora dos produtos deve respeitar as suas regras operacionais. Nestes intervalos de tempo, a variável  $VOM_{p,d,k}$  deve tomar valores iguais a zero, segundo a equação (6.14). Note que os exemplos mostrados nesta seção admitem que todos

os mercados consumidores paralisam as suas operações nos intervalos de tempo pertencentes ao conjunto  $KREC_{p,d}$ , porém estes podem apresentar regras de paradas distintas quando comparados uns aos outros. Note que a equação (6.1) deve ser alterada, sendo substituída pela (6.15), onde as quantidades enviadas aos mercados consumidores devem ser contabilizadas somente nos intervalos de tempo que não pertençam ao conjunto  $KREC_{p,d}$ .

$$VOM_{p,d,k} = 0 \quad \forall p,d, k \in KREC_{p,d} \quad (6.14)$$

$$\sum_{k \in KREC_{p,d}} VOM_{p,d,k} + SF_{p,d} = DEM_{p,d} \quad \forall d, p \in DEM_{p,d} \quad (6.15)$$

Desta forma, o modelo M8 é composto por todas as restrições do modelo M7 com adição das restrições (6.14) e (6.15) em substituição à (6.1). A seguir, os dados utilizados no modelo E6.3.2M7 são utilizados no modelo M8 para verificar os efeitos que estas paralisações possuem na operação dutoviária em questão, principalmente no atendimento das demandas estabelecidas; define-se assim o exemplo E6.3.2M8. Para este exemplo, o conjunto  $KREC_{p,d}$  é composto do sexto ao décimo intervalo de tempo ( $KREC_{p,d} = \{6, 7, 8, 9, 10\} \forall p,d$ ), ou seja, no período compreendido por estes intervalos de tempo os mercados consumidores não recebem os produtos das respectivas bases. A tabela 6.15 mostra os resultados computacionais para o exemplo E6.3.2M8.

Tabela 6.15 – Resultados computacionais para o exemplo E6.3.2M8

<i>Formulação</i>	E6.3.2M8
Sol. relaxada [C (x10 <sup>-2</sup> \$)]	35954,43
Sol. encontrada [C (x10 <sup>-2</sup> \$)]	41062,95
<i>Gap</i> (%)	4,53
Número de Equações	12707
Número de Variáveis Contínuas	8852
Número de Variáveis Binárias	420
Tempo computacional [s]	30000
Nós visitados	7178



O exemplo encontrou uma solução cujo gap é de 4,53% em 30000 segundos. O exemplo foi resolvido em uma plataforma *Pentium II* 400 MHz 381 Mb RAM utilizando-se o *solver CPLEX* 7.0 (ILOG, 2000). Cabe ressaltar que o exemplo E6.3.2M8 reproduz uma situação de altas penalidades unitárias pelo não atendimento de demandas. Outra característica importante é o alto custo potencial causado pela insatisfação dos clientes causados por sucessivos atrasos e/ou falta de produto. Neste caso, os clientes das empresas comumente procuram outros fornecedores do mesmo produto para que as suas operações sejam devidamente atendidas. A tabela 6.16 mostra a alimentação dos mercados consumidores ao longo dos intervalos de tempo, bem como dados comparativos com as demandas impostas. De todos os mercados consumidores, o único que deixa de ser totalmente satisfeito é o atendido por gasolina em Goiânia ( $p=1/d=4$ ), que ao final do horizonte de tempo recebe uma quantidade 16,67% inferior à demanda estabelecida. Para este caso, note que as bases não alimentam os seus respectivos mercados nos intervalos de tempo em que estes permanecem fechados. Outro aspecto interessante é o fato de que para o par de produto/base  $p=1/d=4$ , o mercado local é continuamente alimentado em todos os intervalos de tempo, com exceção daqueles em que o mesmo permanece fechado, e ainda assim a demanda não é totalmente satisfeita ao final do horizonte de tempo. Isto se deve a uma limitação na vazão das bombas responsáveis pelo envio dos produtos da base para o mercado consumidor.

Tabela 6.16 – Alimentação dos mercados consumidores e diferenças em relação às demandas

	$VOM_{p,d,k} [x10^{-2} m^3]$									
<i>Produto/base</i>	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$	$k=11$	$k=12$	$k=13$	$k=14$	$k=15$
$p=2/d=1$	25	25	25	25	25	5	0	20	0	0
$p=2/d=2$	25	25	25	25	25	25	0	0	0	0
$p=1/d=4$	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
$p=3/d=4$	25	25	0	0	0	0	0	0	0	0
$p=1/d=5$	25	15	0	0	0	0	0	0	25	15
$p=2/d=5$	25	25	25	25	20	0	0	0	0	0
<i>Produto/base</i>	$\sum_k VOM_{p,d,k}$	$DEM_{p,d}$		$\left[ \sum_k VOM_{p,d,k} - DEM_{p,d} \right] / DEM_{p,d}$						
$p=2/d=1$	150	150		0						
$p=2/d=2$	150	150		0						
$p=1/d=4$	250	300		-0,167						
$p=3/d=4$	50	50		0						
$p=1/d=5$	80	80		0						
$p=2/d=5$	120	120		0						

A figura 6.5 mostra os níveis de estoque em todas as localidades do sistema dutoviário. Note que para  $p=\text{gasolina}/d=4$  os níveis de estocagem sempre se mantêm acima do limite mínimo. Desta forma, vale afirmar que para este exemplo o não atendimento desta demanda se deve exclusivamente à limitação das bombas responsáveis pelo envio dos produtos aos mercados consumidores. Caso esta base atingisse um nível baixo de estocagem para este produto ao longo da operação, o não atendimento da demanda poderia ocorrer por uma limitação de estocagem e/ou por falta de envio de produto por parte da refinaria através da linha dutoviária. Outro aspecto interessante decorrente da limitação do envio de gasolina da quarta base para o seu mercado consumidor é que a companhia não é capaz de satisfazer esta demanda mesmo que o duto opere durante todos os intervalos de tempo da operação. Além de o sistema ter que preferencialmente satisfazer integralmente as demais demandas do sistema nos demais intervalos de tempo, um lote a mais entregue a esta base acarretaria em aumentos nos seus custos de estocagem e nos custos de bombeamento devido à formação de interfaces dentro da linha dutoviária. Desta forma, o duto permanece ocioso durante o nono intervalo de tempo. Finalmente, cabe ressaltar que a figura 6.5 mostra um sensível aumento no nível de estocagem para a gasolina na quarta base e para o óleo diesel na quinta, durante os intervalos de tempo em que os mercados permanecem fechados. Este efeito se dá naturalmente, pois durante este período a quarta base permanece sem atender a demanda. Devido às limitações da vazão das bombas que alimentam os mercados consumidores, a melhor solução encontrada é composta pelo envio simultâneo do último lote do quarto segmento para a base e para o quinto segmento ( $XW_{p,4,k}$ ). Esta solução provoca os menores aumentos possíveis no estoque de gasolina na quarta base, porém acarreta em um estoque de óleo diesel superior à demanda.

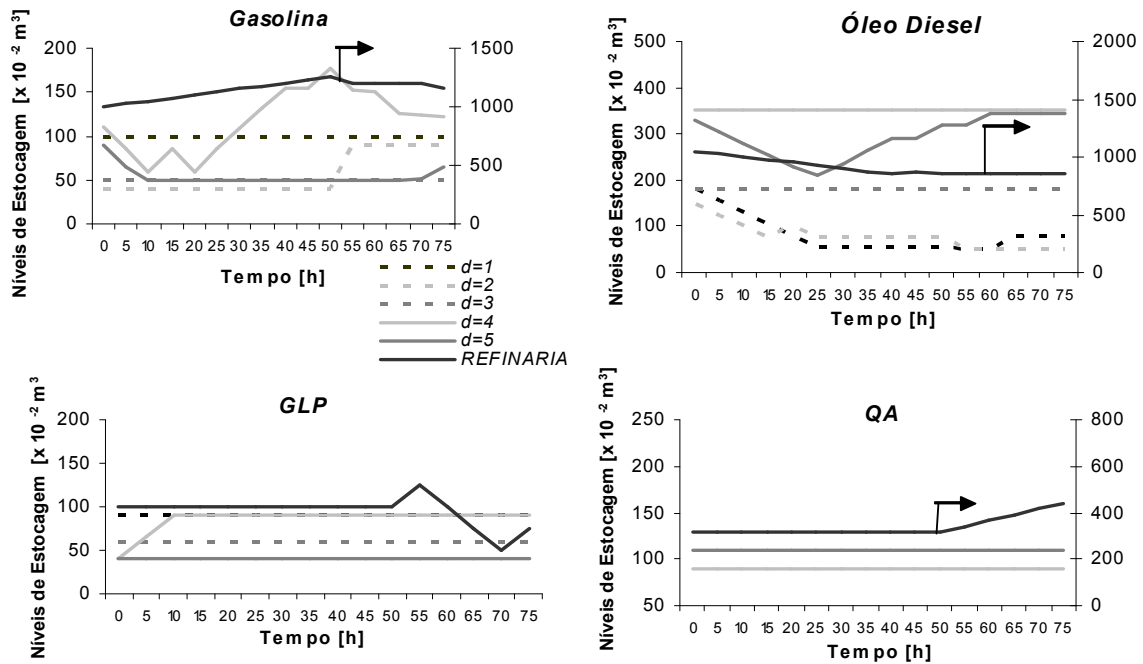


Figura 6.5 – Níveis de estoque para o exemplo E6.3.2M8

### 6.5. Sumário

Ficam assim mostrados os exemplos propostos para um sistema dutoviário real, onde diversos aspectos em relação ao *scheduling* de operações dutoviárias em relação à formulação proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003), dentre eles:

- Foi mostrado que as restrições especiais impõem uma diminuição na região viável do problema e a sua solução ótima é maior quando comparada à do valor para uma solução viável da formulação originalmente proposta. Isto pois, sempre que uma interface é detectada, o duto é obrigado a operar, mesmo que as demandas já tenham sido satisfeitas. Como consequência, os custos de estocagem nas bases de distribuição, bem como os de bombeamento são acrescidos, porém garante-se que os volumes das interfaces formadas dentro da linha dutoviária tomem valores aceitáveis e portanto que os produtos não atinjam um grau elevado de contaminação. Os cortes de entrega propostos no capítulo 5 são adicionados à formulação proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003);
- Os cortes de entrega propostos melhoram drasticamente o desempenho computacional para os modelos propostos que consideram as restrições especiais em cenários de demandas altas. Em cenários de demandas baixas estes não promovem nenhum benefício. Porém, quando aplicados a

cenários de demandas médias, o seu impacto é negativo, devido à pequena melhora no valor da solução relaxada dos problemas e também à inserção de restrições adicionais na presente formulação. Cabe ressaltar que para casos de altas demandas, a melhora atingida com os cortes de entrega foi de até 84%;

- Estes cortes ainda são testados na formulação originalmente proposta para se verificar o quanto as soluções viáveis encontradas pela formulação proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003) podem ser melhoradas. Observou-se que mesmo com os cortes de entrega, as soluções ótimas dos problemas originais não foram encontradas dentro do tempo computacional estipulado, porém soluções consideravelmente melhores foram encontradas. As restrições especiais foram testadas na sua forma desagregada com relação à variável tempo e nos exemplos em que foi testada apresentou tanto uma piora no desempenho computacional em alguns exemplos como uma ligeira melhoria em relação aos exemplos que utilizam a formulação proposta no capítulo 5;
- Uma nova formulação que propõe modificações nas restrições especiais e no atendimento das demandas é proposta. As modificações nas restrições especiais impõem penalidades na operação dutoviária quando os segmentos do duto param de movimentar os produtos com uma interface nos seus interiores, em lugar da sua proibição conforme proposto pelas restrições especiais no capítulo anterior. A segunda modificação considera penalidades na operação dutoviária devido ao atraso no atendimento das demandas por parte dos clientes. Esta nova formulação possui um maior grau de complexidade com relação às propostas no capítulo anterior. As soluções mostram que as regiões viáveis dos problemas são consideravelmente maiores em relação às das formulações com as restrições especiais. A solução do exemplo proposto se mostrou no máximo 5,4% distante da solução ótima do problema. Finalmente, uma análise de sensibilidade com a finalidade de se analisar o efeito de demandas não atendidas ao final do horizonte de tempo é proposta. Este contexto operacional faz com que restrições ao atendimento da demanda sejam claramente identificadas, como para o exemplo limitações de estoque nas bases, incapacidade de distribuição da linha dutoviária e limitações de alimentação no atendimento aos mercados consumidores. No exemplo proposto, apenas uma base deixa de atender integralmente o seu respectivo mercado consumidor ao final do horizonte de tempo.

A seguir é proposta uma formulação em tempo contínuo baseada na desagregação da variável tempo que considera variações nas vazões operacionais do duto bem como retrata o rendimento das estações de bombeamento do sistema.

## **7. Formulação para o *scheduling* de operações dutoviárias em tempo contínuo com restrições de rendimento para as estações de bombeamento**

### *7.1. Introdução*

O propósito deste capítulo é o de apresentar uma nova formulação baseada na representação contínua do tempo para o *scheduling* de operações dutoviárias. Diferentemente das formulações apresentadas anteriormente, esta permite que sejam gerados *schedules* com variações nas vazões de operação do duto ao longo da operação de transporte. Esta nova formulação ainda considera variações nos rendimentos das estações de bombeamento conforme o valor da vazão utilizada pelo duto. A principal motivação para o desenvolvimento desta formulação é considerar variações nos custos de bombeamento com as diferentes vazões de operação do duto bem como com os rendimentos utilizados pelas estações de bombeamento.

Devido à utilização da representação contínua do tempo, esta nova formulação requer que variáveis, parâmetros e restrições temporais sejam definidos. A inclusão destes na formulação tem o objetivo de satisfazer o horizonte de tempo operacional bem como as temporizações dos carregamentos e descarregamentos simultâneos dos tanques da refinaria que são dedicados à alimentação do duto.

Esta formulação utiliza hipóteses e notação semelhantes às das formulações apresentadas anteriormente e as suas modificações são apresentadas a seguir.

### *7.2. Hipóteses da formulação com representação em tempo contínuo*

As hipóteses desta formulação são as mesmas descritas nos capítulos 4 e 5, com exceção da hipótese **H8** que é substituída pela hipótese **H17** e as hipóteses **H18** e **H19**, que devem ser consideradas por esta formulação. Estas são dadas a seguir:

**H17** – O duto opera de modo intermitente. O mesmo opera com *vazão de operação variável* durante o horizonte de tempo. As taxas de rendimento utilizadas pelas estações de bombeamento variam conforme o valor da vazão de operação do duto.

**H18** – A vazão de bombeamento dos produtos e os rendimentos utilizados pelas estações de bombeamento não dependem do seqüenciamento dos produtos dentro da linha dutoviária.

**H19** – As estações de bombeamento de cada segmento dutoviário utilizam o mesmo rendimento.

A hipótese **H17**, que substitui a hipótese **H8** descrita no capítulo 4, afirma que esta formulação contempla variações nos valores das vazões de operação do duto. Ela ainda afirma que os rendimentos utilizados pelas estações de bombeamento variam de acordo com o valor das vazões de operação do duto.

A hipótese **H18** afirma que tanto o rendimento quanto a vazão de operação utilizados pelas estações de bombeamento não sofrem influência do seqüenciamento dos produtos que se encontram dentro da linha dutoviária. De acordo com as considerações hidráulicas descritas no capítulo 3, o ponto de operação do duto se dá na intersecção das curvas do sistema e dos estágios de bombeamento. Na verdade, a curva do sistema depende do seqüenciamento dos produtos que se encontram dentro da linha dutoviária e das vazões de operação utilizadas, enquanto a curva das bombas pode ser ajustada caso estas apresentem motores com velocidades de rotação variáveis. A hipótese **H19** é que as estações de bombeamento somente utilizam uma configuração durante toda a operação de distribuição, embora estas mudanças possam ser facilmente consideradas na formulação.

Portanto, afirma-se que esta formulação considera as hipóteses **H1 a H7 e H9 a H19**.

### *7.3. Notação da formulação com representação em tempo contínuo*

Esta formulação apresenta uma nomenclatura semelhante à das estudadas anteriormente. Além dos parâmetros e das variáveis temporais, ela contempla o rendimento no intervalo de tempo  $k$  ( $\eta_k$ ) como variável. Note também que esta nova formulação não declara explicitamente as vazões de operações do duto como variáveis, apesar de contemplar as suas variações durante a operação de distribuição dos derivados. Desta forma, a nomenclatura para a formulação proposta neste capítulo é dada a seguir.

#### *Índices e Conjuntos*

$d=1, \dots, D$	depósitos ou segmentos do duto
$D_c$	conjunto de segmentos que apresentam o mesmo diâmetro com relação ao seu subsequente
$DC_{p,d,r}$	conjunto de produtos $p$ e depósitos $d$ que pertencem a uma dada situação operacional $r$
$PD_d$	conjunto de produtos que são armazenados no depósito $d$

$FS_{p,p'}$	conjunto de seqüências proibidas entre os produtos $p$ e $p'$
$i=1,,I$	lotes de produção enviados pela refinaria
$k=1, \dots, K$	intervalos de tempo
$KP_i$	conjunto de intervalos de tempo que recebem o lote de produção $i$ enviado pela refinaria
$k0_i$	último intervalo de tempo anterior à chegada do lote de produção $i$
$kf_i$	último intervalo de tempo que compõe o lote de produção $i$
$l=1, \dots, L_d$	lotes que compõem o segmento $d$
$p=1, \dots, P$	produtos
$r=1, \dots, R$	situações operacionais
$TS_{p,p'}$	conjunto de todas as seqüências possíveis entre os produtos $p$ e $p'$

#### Parâmetros

$CED_{p,d}$	custo unitário de estocagem do produto $p$ no depósito $d$
$CER_p$	custo unitário de estocagem do produto $p$ na refinaria
$CONTACT_{p,p'}$	custo de transição entre os produtos $p$ e $p'$
$CP_{p,d,k}$	custo unitário de bombeamento do produto $p$ para o depósito $d$ no intervalo de tempo $k$
$DEM_{p,d}$	demanda do produto $p$ no mercado consumidor que é abastecido pelo depósito $d$
$H$	horizonte de tempo operacional
$K_d$	número de intervalos de tempo necessários para os produtos percorrerem ininterruptamente o segmento $d$
$L_d$	número de lotes contidos no segmento $d$
$LMAX_{p,d}$	lote do segmento $d$ mais próximo do respectivo depósito que contenha o produto $p$ no início da operação

$LMIN_{p,d}$	lote do segmento $d$ mais distante do respectivo depósito que contenha o produto $p$ no início da operação
$Q^{LO}$	limite inferior para a vazão de operação do duto
$Q^{UP}$	limite superior para a vazão de operação do duto
$RP_{p,i,k}$	vazão de produção do lote $i$ que é composto pelo produto $p$ no intervalo de tempo $k$
$Ti_i$	instante inicial para o carregamento do lote $i$
$TINI_{p,p',l}^d$	interface formada entre o produto $p$ e $p'$ no lote $l$ do segmento $d$ no início da operação
$Tf_i$	instante final para o carregamento do lote $i$
$U_d$	volume dos lotes do segmento $d$
$UM_{p,d,k}$	limite superior para a vazão do produto $p$ que é enviado ao mercado consumidor que é abastecido pelo depósito $d$ no intervalo de tempo $k$
$VDMAX_{p,d,k}$	capacidade máxima de armazenamento para o produto $p$ no depósito $d$ no intervalo de tempo $k$
$VDMIN_{p,d,k}$	capacidade mínima de armazenamento para o produto $p$ no depósito $d$ no intervalo de tempo $k$
$VDZERO_{p,d}$	volume inicial armazenado pelo depósito $d$ do produto $p$
$VRMAX_{p,k}$	capacidade máxima de armazenamento para o produto $p$ na refinaria no intervalo de tempo $k$
$VRMIN_{p,k}$	capacidade mínima de armazenamento para o produto $p$ na refinaria no intervalo de tempo $k$
$VRZERO_p$	quantidade estocada na refinaria do produto $p$ no início da operação
$XDC_{d,r}$	1 se ao longo da operação $r$ de envio de produtos o depósito $d$ necessita retirar do duto qualquer produto que esteja contido no conjunto $DC_{p,d,r}$ , 0 senão
$XDMIN_{p,d}$	número mínimo de intervalos de tempo que a base $d$ deve se conectar ao duto para retirar o produto $p$
$XSMIN_{d,r}$	mínimo número de vezes que o segmento $d$ deve ser acionado ao longo da operação de acordo com a operação $r$



$XVMIN_{p,d}$	mínimo número de intervalos de tempo necessário para que o produto $p$ chegue ao depósito $d$ do seu lote mais próximo/distante
$\varepsilon$	parâmetro de valor pequeno
$\Delta_{STOP}^{LO}$	limite inferior para o tempo de parada do duto

#### *Variáveis Binárias*

$XD_{p,d,k}$	1 se o depósito $d$ recebe o produto $p$ no intervalo de tempo $k$
$XR_{p,k}$	1 se a refinaria descarrega o produto $p$ para o duto no intervalo de tempo $k$
$XT_{p,d,k}$	1 se o produto $p$ é enviado ao segmento $d$ no intervalo de tempo $k$
$XW_{p,d,k}$	1 se o produto contido no lote $L_d$ do segmento $d$ é dividido entre o depósito $d$ e o segmento $d+1$ no intervalo de tempo $k$

#### *Variáveis Booleanas*

$Y_{d,k}$	verdadeira se o segmento do duto $d$ opera no intervalo de tempo $k$
$Z_{d,k}$	verdadeira se qualquer produto contido no último lote do segmento $d$ é enviado simultaneamente para a respectiva base e para o segmento $d+1$ no intervalo de tempo $k$

#### *Variáveis Contínuas*

$C$	custos operacionais a serem minimizados
$TY_{p,p',k}^d$	indica se o produto $p$ sucede o produto $p'$ no segmento $d$ no intervalo de tempo $k$
$VD_{p,d,k}$	volume estocado do produto $p$ no depósito $d$ no intervalo de tempo $k$
$VOD_{p,d,k}$	volume do produto $p$ que é recebido pelo depósito $d$ proveniente do duto no intervalo de tempo $k$

$VOM_{p,d,k}$	volume do produto $p$ que é enviado do depósito $d$ ao seu respectivo mercado consumidor no intervalo de tempo $k$
$VOR_{p,k}$	volume do produto $p$ que é descarregado para o duto da refinaria no intervalo de tempo $k$
$VOT_{p,d+1,k}$	volume do produto $p$ que é enviado ao segmento $d+1$ no intervalo de tempo $k$
$VR_{p,k}$	volume do produto $p$ estocado na refinaria no intervalo de tempo $k$
$XS_{d,k}$	1 se o segmento $d$ do duto está em operação no intervalo de tempo $k$
$XV_{p,l,k}^d$	1 se o lote $l$ do segmento $d$ armazena o produto no intervalo de tempo $k$
$\Delta_k$	duração do intervalo de tempo $k$
$\Delta_k^1$	duração do intervalo de tempo $k$ quando o duto está em operação
$\Delta_k^2$	duração do intervalo de tempo $k$ quando o duto está ocioso
$\eta_k$	taxa de rendimento das estações de bombeamento no intervalo de tempo $k$

#### 7.4. Fundamentos da formulação proposta

Esta nova formulação utiliza a mesma estratégia para a modelagem dos segmentos do duto, ou seja, os segmentos do duto que possuem diâmetros iguais são discretizados em  $L_d$  lotes de capacidade volumétrica  $U_d$ , de acordo com a figura 4.1. No presente caso, o conteúdo presente no lote  $L_d$  do segmento  $d$  pode ser tanto integralmente enviado à respectiva base de distribuição ( $XD_{p,d,k}$ ), como pode ser destinado ao segmento seguinte ( $XT_{p,d+1,k}$ ) no caso de não haver alterações nos diâmetros dos segmentos do duto. A figura 4.2 representa uma possível configuração para um segmento  $d'$ , onde o seu segmento subsequente possua um diâmetro menor. No caso, o produto contido no lote  $L_{d'}$  pode ser enviado integralmente à base de distribuição ( $XD_{p,d',k}$ ), como o mesmo pode ser dividido tanto entre a respectiva base  $d'$  e o seu segmento subsequente ( $XW_{p,d',k}$ ).

No entanto, esta formulação assume que a duração dos descarregamentos efetuados pela refinaria para o duto e deste para as bases de distribuição variam de acordo com a vazão de operação do mesmo. Desta forma, o parâmetro  $\delta$  que representa a duração dos intervalos de tempos nas formulações estudadas no capítulo 6 é substituído pela variável  $\Delta_k$ . As formulações anteriores assumem que o rendimento das estações de bombeamento do duto ( $\eta_k$ ) possui um

valor constante durante toda a operação de transporte, enquanto a que é apresentada neste capítulo admite variações conforme o valor da vazão que é utilizada pelo duto.

## 7.5. Formulação matemática

### 7.5.1. Função objetivo

A formulação MINLP é baseada na formulação MILP apresentada no capítulo 4. A função objetivo do modelo é dada pela equação (7.1).

$$\begin{aligned} \text{Min } C = & \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{p=1}^P CER_p \cdot VR_{p,k} + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D CED_{p,d} \cdot VD_{p,d,k} \right] \cdot \Delta_k \\ & + \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K \frac{CP_{p,d,k}}{\eta_k} \cdot VOD_{p,d,k} + \sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K CONTACT_{p,p'} \cdot TY_{p,p',k}^d \end{aligned} \quad (7.1)$$

Os termos em colchetes representam os custos de estocagem na refinaria e nos depósitos. Note que ambos os termos não são lineares devido às bilinearidades formadas pelos níveis de estocagem em todas as localidades do sistema ( $VR_{p,k}$  e  $VD_{p,d,k}$ ) e pela duração dos intervalos de tempo ( $\Delta_k$ ). O segundo e o terceiro termos são os custos de bombeamento e os de transição, respectivamente. O custo de bombeamento é não linear devido à divisão formada pela quantidade enviada à base de distribuição  $d$  do produto  $p$  no intervalo de tempo  $k$  ( $VOD_{p,d,k}$ ) e pelo rendimento utilizado pelas estações de bombeamento, dado pela variável  $\eta_k$ . Isso é necessário, pois o consumo de energia das estações de bombeamento varia de maneira acentuada com a vazão utilizada pelo duto.

Essas não linearidades caracterizam a formulação como não linear e não convexa. Finalmente, os custos de interface são determinados pelo parâmetro  $CONTACT_{p,p'}$  e pela variável de detecção de interface ( $TY_{p,p',k}^d$ ).

### 7.5.2. Restrições temporais

Esta nova formulação para o *scheduling* de sistemas dutoviários utiliza a representação contínua do tempo, em que a duração dos intervalos de tempo é representada pela variável  $\Delta_k$ . Isso é necessário devido às variações nas vazões de operação do duto. Cabe ressaltar que devido à utilização da representação contínua do tempo, é necessário que restrições sejam definidas para

que a temporização dos lotes de produção da refinaria nos seus tanques e o horizonte de tempo sejam satisfeitos.

A presente formulação ainda considera que segmentos com o mesmo diâmetro operam com os mesmos valores de vazão. No caso de uma redução no seu valor, a nova vazão deve ser calculada considerando-se a vazão subtraída da base de distribuição anterior e a sua área de seção transversal, que no caso é inferior à do segmento anterior. Um outro aspecto importante dos modelos de representação contínua do tempo é que estes podem calcular exatamente os tempos de processamento das tarefas com um número de intervalos de tempo consideravelmente menor em relação à representação em tempo discreto. A figura 7.1 mostra uma representação contínua do tempo, onde a variável  $\Delta_k$  representa a duração dos intervalos de tempo (Moro e Pinto, 2004).

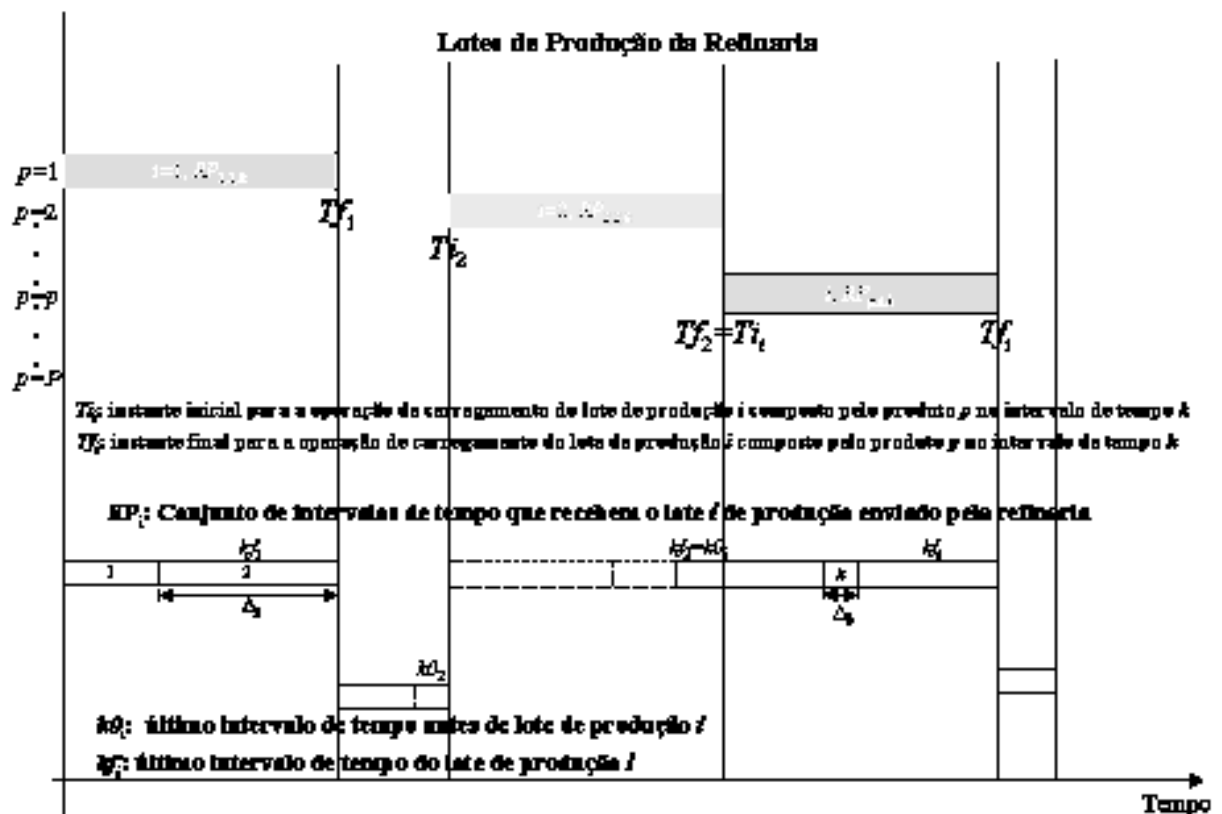


Figura 7.1 – Representação contínua do tempo e programa de produção da refinaria

A figura 7.1 ainda mostra um perfil de produção dos produtos definido pela refinaria. Analogamente à representação discreta do tempo, os diversos lotes ( $i$ ) são compostos por um produto e as suas respectivas quantidades são dadas *a priori*, representadas pelo parâmetro

$RP_{p,i,k}$ . Devido ao fato de os carregamentos dos lotes de produção e os descarregamentos para o duto serem sincronizados dos tanques da refinaria, a variável temporal  $\Delta_k$  deve contemplar os instantes de início e término para estas duas tarefas. Assim, qualquer lote de produção  $i$  tem o seu carregamento iniciado e terminado nos instantes  $Ti_i$  e  $Tf_i$ , respectivamente.

A formulação temporal utilizada por este modelo é baseada na desenvolvida por Moro e Pinto (2004). Os autores utilizam uma estratégia similar para um conjunto de tanques de petróleo que devem receber diversos tipos de petróleo de um duto e alimentar simultaneamente uma unidade de destilação.

Um conjunto de intervalos de tempo ( $K$ ) é definido para todo o horizonte de tempo ( $H$ ). Os intervalos de tempo são agrupados de acordo com os instantes conhecidos  $Ti_i$  e  $Tf_i$ , de forma que os instantes iniciais das operações de carregamento nos tanques da refinaria aconteçam ao término do último intervalo de tempo antes do lote  $i$  ( $k0_i$ ). O instante final desta operação se dá no instante  $Tf_i$ , ou seja, no último intervalo de tempo do respectivo lote de produção ( $kf_i$ ). A equação (7.2) determina que a soma de todos os intervalos de tempo deve ser igual ao horizonte de tempo operacional, enquanto as equações (7.3) e (7.4) impõem os instantes finais e iniciais para as operações de carregamento dos lotes de produção enviados pela refinaria, respectivamente.

$$\sum_{k=1}^K \Delta_k = H \quad (7.2)$$

$$\sum_{k \leq k0_i} \Delta_k = Ti_i \quad \forall i \quad (7.3)$$

$$\sum_{k \leq kf_i} \Delta_k = Tf_i \quad \forall i \quad (7.4)$$

É importante ressaltar que a seleção do número total de intervalos de tempo  $k$  bem como o número destes entre os diversos lotes de produção enviados pela refinaria afetam drasticamente o desempenho do modelo proposto. Este estudo é mostrado no capítulo seguinte.

### 7.5.3. Restrições da refinaria

Os balanços de massa da refinaria são dados pela restrição (7.5). Note que esta restrição substitui a restrição (4.2). A quantidade do produto  $p$  que entra nos tanques é dada pela soma de

todos os lotes  $i$  enviados pela refinaria nos intervalos de tempo que recebem estes lotes (subconjunto  $KP_i$ ). Esta restrição impõe que os carregamentos enviados pela refinaria são diretamente proporcionais à vazão predeterminada do lote  $i$  enviado pela refinaria e pela duração do intervalo de tempo  $k$  ( $\Delta_k$ ). Os limites inferior e superior para as variáveis de estocagem são dados pela restrição (4.3), enquanto o descarregamento efetuado para o duto é dado pelo parâmetro volumétrico  $U_1$  e pela variável binária  $XR_{p,k}$ , segundo a equação (4.4).

$$VR_{p,k} = VRZERO_p + \sum_{i=1}^I \sum_{\substack{k' \leq k \\ k' \in KP_i}} (RP_{p,i,k'} \times \Delta_{k'}) - \sum_{k' \leq k} VOR_{p,k'} \quad \forall p, k \quad (7.5)$$

$$VRMIN_{p,k} \leq VR_{p,k} \leq VRMAX_{p,k} \quad \forall p, k \quad (4.3)$$

$$VOR_{p,k} = XR_{p,k} \times U_d \quad \forall p, k, d=1 \quad (4.4)$$

#### 7.5.4. Restrições do duto e das bases de distribuição

A operação do duto pode ser expressa por disjunções lineares, da mesma forma que as formulações apresentadas no capítulo 4. As disjunções lineares (7.6) representam a operação para o primeiro segmento do duto. Note que quando comparadas às disjunções (4.5), estas possuem um termo adicional referente às condições de vazão, representado pelas variáveis temporais  $\Delta_k$ .

$$\left[ \begin{array}{l} Y_{1,k} \\ XV_{p,1,k}^1 = XR_{p,k} \quad \forall p \\ XV_{p,l,k}^1 = XVZERO_{p,1,l-1} \quad \forall p, l = 2, \dots, L_1 \\ XD_{p,1,k} + XT_{p,2,k} = XVZERO_{p,1,L_1} \quad \forall p \\ \frac{U_1}{Q^{UP}} \leq \Delta_k \leq \frac{U_1}{Q^{LO}} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} \neg Y_{1,k} \\ XV_{p,1,k}^1 = XVZERO_{p,1,1} \quad \forall p \\ XV_{p,l,k}^1 = XVZERO_{p,1,l} \quad \forall p, l = 2, \dots, L_1 \\ XD_{p,1,k} + XT_{p,2,k} = 0 \\ \Delta_{STOP}^{LO} \leq \Delta_k \leq H \end{array} \right] \quad d=1, k=1 \quad (7.6a)$$

$$\left[ \begin{array}{l} Y_{1,k} \\ XV_{p,1,k}^1 = XR_{p,k} \\ XV_{p,l,k}^1 = XV_{p,l-1,k-1}^1 \\ XD_{p,1,k} + XT_{p,2,k} = XV_{p,L_1,k-1}^1 \\ \frac{U_1}{Q^{UP}} \leq \Delta_k \leq \frac{U_1}{Q^{LO}} \end{array} \right] \forall p, l=2, \dots, L_1 \vee \left[ \begin{array}{l} \neg Y_{1,k} \\ XV_{p,1,k}^1 = XV_{p,l,k-1}^1 \\ XV_{p,l,k}^1 = XV_{p,l,k-1}^1 \\ XD_{p,1,k} + XT_{p,2,k} = 0 \\ \Delta_{STOP}^{LO} \leq \Delta_k \leq H \end{array} \right] \forall p, l=2, \dots, L_1$$

$d, k=2, \dots, K \quad (7.6b)$

No caso de operação do duto ( $Y_{1,k}$  verdadeira), o duto deve operar dentro dos seus limites de vazão operacional ( $Q^{LO}$  e  $Q^{UP}$ ). Desta forma, a duração dos intervalos de tempo é dada pela capacidade volumétrica dos lotes deste segmento, denotada pelo parâmetro  $U_1$  e pelos limites operacionais de vazão do mesmo. Em caso de ociosidade do duto, é permitido que o mesmo permaneça sob esta condição por um período mínimo, dado pelo parâmetro  $\Delta_{STOP}^{LO}$ , e pelo período máximo fornecido pelo horizonte de tempo operacional ( $H$ ).

Os outros termos da disjunção (7.6) são os mesmos da (4.5). Se a variável  $Y_{1,k}$  for verdadeira, o primeiro lote assume a composição do descarregamento efetuado pela refinaria, enquanto os derivados que já se encontram no interior da linha dutoviária são deslocados. O produto contido no último lote pode ser enviado para a respectiva base de distribuição ( $XD_{p,1,k}$ ) ou para o segundo segmento ( $XT_{p,2,k}$ ).

A operação de segmentos intermediários sem redução no diâmetro pode ser descrita pela disjunção (4.6). No caso de a variável *Booleana*  $Y_{d,k}$  ser verdadeira, os produtos que se encontram nesta seção do duto são deslocados e o que está alocado no último lote deve ser enviado à respectiva base de distribuição ( $XD_{p,d,k}$ ) ou para o segmento seguinte ( $XT_{p,d+1,k}$ ). No caso desta seção do duto estar ociosa, os lotes mantêm os seus produtos e tanto a respectiva base de distribuição como os segmentos seguintes permanecem fora de operação ( $XD_{p,d,k}=XT_{p,d+1,k}=0$ ). A disjunção (4.7) mostra a operação do segmento terminal do duto e a única diferença em relação à (4.6) se refere ao envio do produto contido no último lote do duto, que no caso só pode ser enviado para a última base conectada ao duto.

$$\left[ \begin{array}{l} Y_{d,k} \\ XV_{p,1,k}^d = XT_{p,d,k} \\ XV_{p,l,k}^d = XVZERO_{p,d,l-1} \\ XD_{p,d,k} + XT_{p,d+1,k} = XVZERO_{p,d,L_d} \end{array} \quad \forall p, \forall p, l = 2, \dots, L_d, \forall p \right] \vee \left[ \begin{array}{l} \neg Y_{d,k} \\ XV_{p,1,k}^d = XVZERO_{p,d,1} \\ XV_{p,l,k}^d = XVZERO_{p,d,l} \\ XD_{p,d,k} + XT_{p,d+1,k} = 0 \end{array} \quad \forall p, \forall p, l = 2, \dots, L_d, \forall p \right]$$

$d=2, \dots, D-1, d \in D_c, k=1$  (4.6a)

$$\left[ \begin{array}{l} Y_{d,k} \\ XV_{p,1,k}^d = XT_{p,d,k} \\ XV_{p,l,k}^d = XV_{p,l-1,k-1}^d \\ XD_{p,d,k} + XT_{p,d+1,k} = XV_{p,L_d,k-1}^d \end{array} \quad \forall p, \forall p, l = 2, \dots, L_d, \forall p \right] \vee \left[ \begin{array}{l} \neg Y_{d,k} \\ XV_{p,1,k}^d = XV_{p,1,k-1}^d \\ XV_{p,l,k}^d = XV_{p,l,k-1}^d \\ XD_{p,d,k} + XT_{p,d+1,k} = 0 \end{array} \quad \forall p, \forall p, l = 2, \dots, L_d, \forall p \right]$$

$d=2, \dots, D-1, d \in D_c, k=2, \dots, K$  (4.6b)

$$\left[ \begin{array}{l} Y_{d,k} \\ XV_{p,1,k}^d = XT_{p,d,k} \\ XV_{p,l,k}^d = XVZERO_{p,d,l-1} \\ XD_{p,d,k} = XVZERO_{p,d,L_d} \end{array} \quad \forall p, \forall p, l = 2, \dots, L_d, \forall p \right] \vee \left[ \begin{array}{l} \neg Y_{d,k} \\ XV_{p,1,k}^d = XVZERO_{p,d,1} \\ XV_{p,l,k}^d = XVZERO_{p,d,l} \\ XD_{p,d,k} = 0 \end{array} \quad \forall p, \forall p, l = 2, \dots, L_d, \forall p \right]$$

$d=D, k=1$  (4.7a)

$$\left[ \begin{array}{l} Y_{d,k} \\ XV_{p,1,k}^d = XT_{p,d,k} \\ XV_{p,l,k}^d = XV_{p,l-1,k-1}^d \\ XD_{p,d,k} = XV_{p,L_d,k-1}^d \end{array} \quad \forall p, \forall p, l = 2, \dots, L_d, \forall p \right] \vee \left[ \begin{array}{l} \neg Y_{d,k} \\ XV_{p,1,k}^d = XV_{p,1,k-1}^d \\ XV_{p,l,k}^d = XV_{p,l,k-1}^d \\ XD_{p,d,k} = 0 \end{array} \quad \forall p, \forall p, l = 2, \dots, L_d, \forall p \right]$$

$d=D, k=2, \dots, K$  (4.7b)

As disjunções embutidas (4.8) mostram a operação para segmentos do duto com diâmetros distintos. Note que se a redução de diâmetros ocorrer do primeiro para o segundo segmentos, esta disjunção deve incluir os termos relacionados às variações das vazões operacionais. No caso, a variável  $XR_{p,k}$  substitui a variável  $XT_{p,d',k}$  para a composição do primeiro lote do segmento  $d'$ .



$$\left[ \begin{array}{c} Y_{d',k} \\ XV_{p,1,1}^{d'} = XT_{p,d',1} \\ XV_{p,l,1}^{d'} = XVZERO_{p,d',l-1} \\ \left[ \begin{array}{c} Z_{d',k} \\ XV_{p,1,1}^{d'+1} = XVZERO_{p,d',L_{d'}} \\ XW_{p,d',k} = XVZERO_{p,d',L_{d'}} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{c} -Z_{d',k} \\ XV_{p,1,1}^{d'+1} = XVZERO_{p,d'+1,1} \\ XD_{p,d',k} = XVZERO_{p,d',L_{d'}} \end{array} \right] \\ \forall p \\ \forall p, l = 2, \dots, L_{d'} \\ \forall p \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{c} \neg Y_{d',k} \\ XV_{p,1,1}^{d'} = XVZERO_{p,d',1} \quad \forall p \\ XV_{p,l,1}^{d'} = XVZERO_{p,d',l} \quad \forall p, l = 2, \dots, L_{d'} \\ XD_{p,d',1} = 0 \quad \forall p \end{array} \right]$$

$d' < D, d \notin D_c, k=1 \quad (4.8a)$

$$\left[ \begin{array}{c} Y_{d',k} \\ XV_{p,1,k}^{d'} = XT_{p,d',k} \\ XV_{p,l,k}^{d'} = XV_{p,l-1,k-1}^{d'} \\ \left[ \begin{array}{c} Z_{d',k} \\ XV_{p,1,k}^{d'+1} = XV_{p,L_{d'},k-1}^{d'} \\ XW_{p,d',k} = XV_{p,L_{d'},k-1}^{d'} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{c} -Z_{d',k} \\ XV_{p,1,k}^{d'+1} = XV_{p,1,k-1}^{d'+1} \\ XD_{p,d',k} = XV_{p,L_{d'},k-1}^{d'} \end{array} \right] \\ \forall p \\ \forall p, l = 2, \dots, L_{d'} \\ \forall p \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{c} \neg Y_{d',k} \\ XV_{p,1,k}^{d'} = XV_{p,1,k-1}^{d'} \quad \forall p \\ XV_{p,l,k}^{d'} = XV_{p,l,k-1}^{d'} \quad \forall p, l = 2, \dots, L_{d'} \\ XD_{p,d',k} = 0 \quad \forall p \end{array} \right]$$

$d' < D, d \notin D_c, k=2, \dots, K \quad (4.8b)$

Estas disjunções podem ser transformadas em restrições mistas inteiras lineares, segundo a formulação a seguir que é análoga à apresentada no item 4.5. Note que além das restrições apresentadas anteriormente, esta formulação é composta também pelas restrições especiais e pelos cortes inteiros propostos no capítulo 5 e pelas restrições de variação de vazão do duto. Estas restrições ainda mostram a operação das bases de distribuição.

### Operação do Duto

#### *Operação intermitente e integridade dos lotes*

$$\sum_{p=1}^P XR_{p,k} = XS_{d,k} \quad \forall d=1, k \quad (4.9)$$

$$XS_{d,k} \leq 1 \quad \forall d, k \quad (4.10)$$

$$\sum_{p=1}^P XV_{p,l,k}^d = 1 \quad \forall d, l, k \quad (4.11)$$

#### *Primeiro lote do primeiro segmento*

$$XV_{p,l,k}^d \geq XR_{p,k} \quad \forall p, d=1, l=1, k \quad (4.12)$$

*Transferência de produtos*

$$XV_{p,l,k}^d \geq XVZERO_{p,d,l-1} - [1 - XS_{d,k}] \quad \forall p, d, l=2, \dots, L_d, k=1 \quad (4.13a)$$

$$XV_{p,l,k}^d \geq XV_{p,l-1,k-1}^d - [1 - XS_{d,k}] \quad \forall p, d, l=2, \dots, L_d, k=2, \dots, K \quad (4.13b)$$

*Parada dos segmentos do duto*

$$XV_{p,l,k}^d \geq XVZERO_{p,d,l} - XS_{d,k} \quad \forall p, d, l, k=1 \quad (4.14a)$$

$$XV_{p,l,k}^d \geq XV_{p,l,k-1}^d - XS_{d,k} \quad \forall p, d, l, k=2, \dots, K \quad (4.14b)$$

*Alimentação do primeiro ao penúltimo depósitos ou dos seus segmentos subseqüentes*

$$\sum_{p=1}^P [XT_{p,d,k} + XW_{p,d-1,k}] = XS_{d,k} \quad \forall k, d=2, \dots, D \quad (4.15)$$

$$XD_{p,d,k} + XT_{p,d+1,k} + XW_{p,d,k} \geq XVZERO_{p,d,L_d} - [1 - XS_{d,k}] \quad \forall p, d < D, k=1 \quad (4.16a)$$

$$XD_{p,d,k} + XT_{p,d+1,k} + XW_{p,d,k} \geq XV_{p,L_d,k-1}^d - [1 - XS_{d,k}] \quad \forall p, d < D, k=2, \dots, K \quad (4.16b)$$

$$VOD_{p,d,k} = XD_{p,d,k} \times U_d + XW_{p,d,k} \times [U_d - U_{d+1}] \quad \forall p, d < D, k \quad (4.17)$$

$$VOT_{p,d+1,k} = XT_{p,d+1,k} \times U_{d+1} \quad \forall p, d < D, k \quad (4.18)$$

$$\sum_{p=1}^P [XD_{p,d,k} + XT_{p,d+1,k} + XW_{p,d,k}] = XS_{d,k} \quad \forall k, d < D \quad (4.19)$$

*Alimentação do último depósito*

$$XD_{p,d,k} \geq XVZERO_{p,d,L_d} - [1 - XS_{d,k}] \quad \forall p, d=D, k=1 \quad (4.20a)$$

$$XD_{p,d,k} \geq XV_{p,L_d,k-1}^d - [1 - XS_{d,k}] \quad \forall p, d=D, k=2, \dots, K \quad (4.20a)$$

$$\sum_{p=1}^P [XD_{p,d,k}] = XS_{d,k} \quad \forall k, d=D \quad (4.21)$$

$$VOD_{p,d,k} = XD_{p,d,k} \times U_d \quad \forall p, d=D, k \quad (4.22)$$

*Primeiro lote do segundo ao ultimo segmento*

$$XV_{p,l,k}^d \geq XT_{p,d,k} + XW_{p,d-1,k} \quad \forall p, d > 1, d < D, l=1, k \quad (4.24)$$

*Redução de diâmetro dos segmentos do duto e estoques específicos de cada base*

$$XW_{p,d,k} = 0 \quad \forall p \notin PD_d, d \notin D_c, \forall k \quad (4.25)$$

$$XD_{p,d,k} = 0 \quad \forall p \notin PD_d, d, \forall k \quad (4.26)$$

*Restrições de Interface*

$$TY_{p,p',k}^d \geq XV_{p,1,k}^d + XV_{p',2,k}^d - 1 \quad \forall p, p', d \in TS_{p,p}, \forall k \quad (4.27)$$

$$TY_{p,p',k}^d = 0 \quad \forall p, p', d \in FS_{p,p}, \forall k \quad (4.28)$$

### Restrições de minimização de interfaces

$$\sum_{k'=k+1}^{k+K_d-1} XS_{d,k'} \geq \sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P TY_{p,p',k}^d \cdot [K_d - 1] \quad \forall d, k \leq K - K_d + 1 \quad (5.2)$$

$$\sum_{k'=k+1}^K XS_{d,k'} \geq \sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P TY_{p,p',k}^d \cdot [K - k] \quad \forall d, k > K - K_d + 1 \quad (5.3)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P TINI_{p,p',l}^d \cdot [L_d - l] \leq \sum_{k \leq K_d - l} XS_{d,k} \quad \forall d, l \leq L_d \quad (5.5)$$

### Cortes inteiros

$$\sum_{k=1}^K [XD_{p,d,k} + XW_{p,d,k}] \geq XDMIN_{p,d} \quad \forall p, d \quad (5.7)$$

$$\sum_{k=1}^K XS_{d,k} \geq \max_r \{ XSMIN_{d,r} \} \quad \forall d \quad (5.21)$$

### Operações dos depósitos

$$VD_{p,d,k} = VDZERO_{p,d} + \sum_{k' \leq k} (VOD_{p,d,k'} - VOM_{p,d,k'}) \quad \forall p \in PD_d, \forall d, k \quad (4.29)$$

$$VDMIN_{p,d,k} \leq VD_{p,d,k} \leq VDMAX_{p,d,k} \quad \forall p \in PD_d, \forall d, k \quad (4.30)$$

$$VOM_{p,d,k} \leq UM_{p,d,k} \cdot \Delta_k \quad \forall p \in PD_d, \forall d, k \quad (7.7)$$

$$\sum_{k=1}^K VOM_{p,d,k} = DEM_{p,d} \quad \forall p \in PD_d, \forall d, k \quad (4.32)$$

### Restrições de vazão de operação do duto

$$\Delta_k = \Delta_k^1 + \Delta_k^2 \quad \forall k \quad (7.8)$$

$$\frac{U_d}{Q^{UP}} \cdot XS_{d,k} \leq \Delta_k^1 \leq \frac{U_d}{Q^{LO}} \cdot XS_{d,k} \quad \forall d=1, k \quad (7.9)$$

$$\Delta_{STOP}^{LO} \cdot [1 - XS_{d,k}] \leq \Delta_k^2 \leq \left\{ H - \left[ (K-1) \cdot \left( \min \left( \Delta_{STOP}^{LO}, \frac{U_d}{Q^{UP}} \right) \right) \right] \right\} \cdot [1 - XS_{d,k}] \quad \forall d=1, k \quad (7.10)$$

A formulação *convex-hull* (Raman e Grossmann, 1994) proposta para a variação de vazão no duto é descrita pelas variáveis temporais  $\Delta_k$  apresentadas nas disjunções (7.6). No presente caso, as restrições (7.8) a (7.10) descrevem as variações de vazão no duto.

A equação (7.8) desagrega a variável  $\Delta_k$  em duas. A primeira ( $\Delta_k^1$ ) corresponde à operação do duto, enquanto a segunda ( $\Delta_k^2$ ) toma valores positivos não nulos quando o duto permanece ocioso. Quando o duto entra em operação ( $XS_{1,k}=1$ ), a restrição (7.9) limita a variável  $\Delta_k^1$  entre as durações de acordo com os limites operacionais de vazão, enquanto a restrição (7.10) impõe valor nulo à variável  $\Delta_k^2$ . Por outro lado, a restrição (7.9) determina que a variável  $\Delta_k^1$  assuma valores iguais a zero quando o duto está ocioso, enquanto a restrição (7.10) determina valores positivos para a variável  $\Delta_k^2$ . Note que somente uma das variáveis desagregadas pode assumir valores maiores do que zero. O limite superior para a variável  $\Delta_k^2$ , dado pela restrição (7.10), é baseado na diferença entre o horizonte de tempo operacional ( $H$ ) e  $K-1$  intervalos de tempo que assumem a sua duração mínima, fornecida pelos valores do parâmetro  $\Delta_{STOP}^{LO}$  e da razão entre o parâmetro volumétrico  $U_1$  e o limite superior da vazão operacional ( $Q^{UP}$ ).

Um importante aspecto referente a esta formulação é que as variáveis temporais necessitam ser consideradas somente para o primeiro segmento do duto. As vazões de operação de todos os segmentos subsequentes estão diretamente relacionadas ao valor utilizado pela primeira seção do duto. Outro aspecto é que esta formulação considera variações na vazão de operação do duto ao longo do horizonte de tempo operacional sem definir explicitamente tais variáveis.

#### 7.5.5. Considerações hidráulicas e taxa de rendimento das estações de bombeamento

Os custos de bombeamento de um duto multiproduto dependem de diversos fatores. Uma das idéias centrais desta formulação é determinar as condições ótimas de vazão de operação do duto, respeitando os limites de pressão do mesmo. Uma representação hidráulica detalhada requer que diversos detalhes adicionais da operação sejam considerados, com relação ao duto e às estações de bombeamento para se calcular corretamente os perfis do gradiente hidráulico ao longo da extensão do duto.

As propriedades físicas dos fluidos envolvidos na operação são necessárias, dentre elas as correspondentes densidades e pressões de vapor. Os cálculos hidráulicos rigorosos ainda requerem a temperatura de transferência dos derivados, para evitar a vaporização dos mesmos

dentro da linha dutoviária. Estes cálculos ainda necessitam da extensão do duto, do seu perfil topográfico, do número de correntes de entrada e de saída da linha bem como das suas exatas localizações. Finalmente, o diâmetro externo do duto, bem como a espessura da sua parede e a rugosidade relativa completam os dados que permitem que o correto cálculo das quedas de pressão ao longo da linha dutoviária sejam efetuados.

As estações de bombeamento fornecem energia para a transferência de produtos. Além dos dados previamente descritos, são ainda necessários o número de estações de bombeamento ao longo do duto, a distância entre estas e as suas elevações. Uma estação típica de bombeamento é composta por um conjunto de estágios de bombeamento que podem ser conectados em série e/ou em paralelo. Durante uma operação dutoviária típica diversos estágios devem estar ativados, pois os produtos devem ser transportados por longas distâncias. Os cálculos hidráulicos rigorosos requerem ainda os tipos das bombas que são empregados na operação dutoviária, se as mesmas possuem motores com velocidades de rotação ajustáveis e os níveis de pressão dos produtos nos seus pontos de sucção e descarga.

Os cálculos hidráulicos rigorosos requerem uma quantidade considerável de dados e ainda contemplam a decisão de se ligar ou desligar cada estágio das estações de bombeamento da linha dutoviária durante um intervalo de tempo. Outro fator complicador é que estes cálculos inserem diversas não linearidades à região viável do problema proposto, podendo comprometer o desempenho do algoritmo de busca da solução. Desta forma, uma maneira eficaz e simplificada de se determinar a que vazão o duto deva operar se dá pela inclusão das curvas de rendimento das estações de bombeamento na presente formulação. Assim, a principal motivação de incluir tal consideração nesta formulação é a possibilidade de testar diferentes configurações das estações de bombeamento com custos de bombeamento distintos que variam de acordo com a vazão utilizada pelo duto e ao mesmo tempo manter a estrutura da presente formulação a mais simples possível.

As estações de bombeamento podem atuar com diversas configurações, pois estas são compostas por diversos estágios, embora na prática as trocas de configurações sejam evitadas devido aos seus altos custos. Estas trocas ainda são caracterizadas por tempos de *setup* e desta forma podem comprometer a viabilidade do *schedule* encontrado. Cada configuração de bombeamento fornece ganhos de pressão distintos e conseqüentemente, diferentes taxas de rendimento. Desta forma, cada configuração assumida pelas estações de bombeamento possui

uma curva característica para os seus rendimentos que variam conforme a vazão utilizada pelo duto.

A figura 7.2 mostra curvas típicas de variação da taxa de rendimento em função da vazão utilizada para bombas centrífugas. A primeira curva, que é a mais comum, considera as taxas de rendimento em função da vazão utilizada pela bomba. A segunda curva mostra uma relação para a taxa de rendimento, que é derivada da primeira, porém escrita em função das durações dos intervalos de tempo ( $\Delta_k$ ). Esta segunda relação pode ser obtida se os volumes dos produtos contidos nos lotes se dão conforme o parâmetro volumétrico  $U_d$ . A principal razão para a utilização desta segunda relação é por esta contemplar as variações das taxas de rendimento das estações de bombeamento conforme a vazão utilizada pelo duto, sem a necessidade de se declarar explicitamente tais variáveis na presente formulação. No presente caso, as vazões operacionais do duto podem ser medidas pela variação das durações dos intervalos de tempo e pelo volume assumido pelo lote do primeiro segmento do duto ( $U_1$ ).

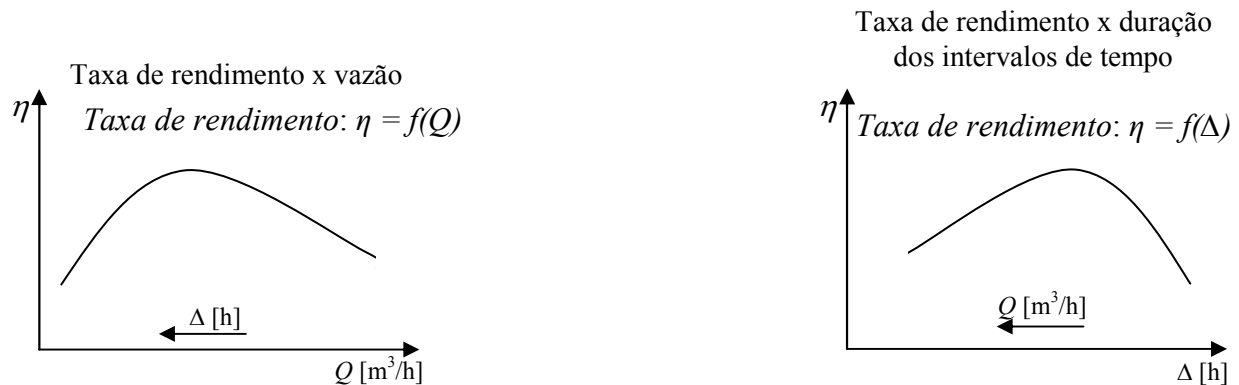


Figura 7.2 – Taxas de rendimento

Os custos de bombeamento apresentados pela função objetivo na equação (7.1) apresentam um conjunto complexo de decisões entre a taxa de rendimento utilizada pelas estações de bombeamento e o tempo operacional pelo qual estas devem permanecer em operação, pois o duto opera em modo descontínuo. A figura 7.3 ilustra duas curvas de bombas centrífugas aplicadas comumente para a movimentação de produtos de baixa viscosidade.



Figura 7.3 – Faixas de qualidade operacional de bombas

A figura 7.3(a) representa um conjunto de bombas com uma faixa estreita de boa qualidade operacional. Para este caso, as bombas devem operar o mais próximo possível do ponto de rendimento máximo e ao mesmo tempo de custo de bombeamento mínimo, pois a presente curva possui uma queda acentuada na taxa de rendimento quando as bombas operam fora desta faixa. Por outro lado, a figura 7.3(b) ilustra um caso onde as bombas possuem uma larga faixa de boa operação. Os tipos de bombas empregados e os arranjos utilizados em cada estação de bombeamento determinam esta complexa tomada de decisões e as diferentes configurações assumidas fornecem curvas de taxa de rendimento e custos unitários de bombeamento distintos.

A formulação *convex hull* das variáveis temporais geram uma relação entre a taxa de rendimento ( $\eta_k$ ) das estações de bombeamento e as durações dos intervalos de tempo ( $\Delta_k$ ). As taxas de rendimento somente podem tomar valores positivos quando o duto está em operação. Isto implica que estas devam ser escritas em função das variáveis temporais  $\Delta_k^1$  e  $XS_{1,k}$ . A título de ilustração, a equação (7.11) mostra um polinômio de  $m$ -ésima ordem onde a taxa de rendimento é escrita em função das durações dos intervalos de tempo e da variável  $XS_{1,k}$ .

$$\eta_k = a_m \cdot (\Delta_k^1)^m + a_{m-1} \cdot (\Delta_k^1)^{m-1} + a_{m-2} \cdot (\Delta_k^1)^{m-2} + \dots + a_{m-n} \cdot (\Delta_k^1)^{m-n} + \dots + a_0 \cdot XS_{1,k} + \varepsilon \cdot (1 - XS_{1,k}) \quad \forall k \quad (7.11)$$

Note que  $a_m$ ,  $a_{m-1}$  e  $a_{m-2}$  denotam os coeficientes da curva. Quando o duto está ocioso ( $\Delta_k^2$  maior do que zero) a taxa de rendimento toma valores iguais a zero, de acordo com as restrições (7.8) a (7.10). Cabe ressaltar que, o coeficiente linear da restrição (7.11) deve ser multiplicado

pela variável  $XS_{1,k}$ , pois a taxa de rendimento só deve assumir valores positivos quando o duto está em operação.

Quando o duto está ocioso (variável  $XS_{1,k}$  igual a zero), a variável  $\Delta_k^1$  toma valores iguais a zero, de acordo com a restrição (4.9) e desta forma, a taxa de rendimento toma valores iguais a  $\varepsilon$ . Vecchietti et al. (2003) sugerem valores para o parâmetro  $\varepsilon$  entre  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$ . Note que no caso de ociosidade do sistema dutoviário, todas as variáveis  $VOD_{p,d,k}$  tomam valores iguais a zero e desta forma os custos operacionais dados pela equação (7.1) não são afetados pelo parâmetro  $\varepsilon$ .

Outro aspecto importante desta formulação é que a mesma assume que as taxas de rendimento ( $\eta_k$ ) são iguais para todos os segmentos do sistema dutoviário. Conseqüentemente, as taxas de rendimento do duto são afetadas apenas por variações de vazão do primeiro segmento do sistema operacional.

Desta forma o modelo MINLP apresentado neste capítulo é resumido pela tabela 7.1. Note que as não linearidades presentes no modelo se encontram nas restrições (7.11), que representa o rendimento das estações de bombeamento e na função objetivo nos termos dos custos de estocagem e de bombeamento.

Tabela 7.1 – Modelo MINLP em tempo contínuo para o *scheduling* de operações dutoviárias

Subsistema Operacional	Restrições
Refinaria	(7.5), (4.3), (4.4)
Restrições temporais	(7.2), (7.3), (7.4)
Primeiro segmento do duto	(4.9), (4.10), (4.11), (4.12), (4.13), (4.14), (4.16), (4.17), (4.18), (4.19)
Segmentos intermediários do duto	(4.10), (4.11), (4.13), (4.14), (4.15), (4.16), (4.17), (4.18), (4.19), (4.24)
Último segmento do duto	(4.10), (4.11), (4.13), (4.14), (4.17), (4.18), (4.19), (4.20), (4.21), (4.24)
Restrições de diminuição de diâmetro dos segmentos do duto	(4.25), (4.26)
Restrições de seqüenciamento	(4.27), (4.28)
Restrições especiais	(5.2), (5.3), (5.5)
Restrições auxiliares	(5.7), (5.21)



Tabela 7.1 (cont.) – Modelo MINLP em tempo contínuo para o *scheduling* de operações dutoviárias

Subsistema Operacional	Restrições
Bases de distribuição	(4.29), (4.30), (7.7), (4.32)
Restrições de vazão do duto	(7.8), (7.9), (7.10)
Restrições de rendimento das estações de bombeamento	(7.11)
Função objetivo	(7.1)

### 7.6. Sumário

Neste capítulo é apresentada uma nova formulação MINLP baseada na representação contínua do tempo com considerações hidráulicas simplificadas. Esta formulação contempla as temporizações das tarefas de carregamento e descarregamento simultâneas às quais os tanques na refinaria são submetidos. Para considerar a operação intermitente do duto, a presente formulação desagrega as variáveis temporais em duas parcelas segundo a formulação *convex hull* (Raman e Grossmann, 1994), onde a primeira toma valores positivos quando o duto entra em operação e a segunda assume valores não nulos quando o duto está ocioso. A presente formulação ainda inclui as taxas de rendimento utilizadas pelas estações de bombeamento como variáveis que assumem valores distintos conforme o valor das vazões de operação do duto.

No próximo capítulo, esta formulação é aplicada ao mesmo sistema operacional já estudado anteriormente e uma comparação com as formulações apresentadas nos capítulos anteriores é realizada. Análises de sensibilidade em relação ao número de intervalos de tempo que compõem a operação e em relação ao tempo mínimo em que o duto pode permanecer ocioso são também realizadas (parâmetro  $\Delta_{STOP}^{LO}$ ). Finalmente, configurações distintas das estações de bombeamento são testadas, com diferentes curvas de rendimento e custos unitários de bombeamento.

## **8. Exemplos e resultados para a formulação em tempo contínuo com restrições de rendimento para as estações de bombeamento**

### *8.1. Introdução*

Este capítulo analisa diversos aspectos relacionados à formulação em tempo contínuo proposta no capítulo anterior. Primeiramente, esta formulação é comparada em termos de desempenho computacional e de qualidade das soluções obtidas com a formulação em tempo discreto e com as restrições especiais e os cortes de entrega. Posteriormente, a variação do número de intervalos de tempo que compõem a operação de transporte é estudada. Finalmente, uma operação de transporte de horizonte de tempo operacional de 5 dias é otimizada para várias configurações das estações de bombeamento.

O sistema dutoviário é o mesmo que foi utilizado no capítulo 6 e ilustrado pela figura 3.2. A título de recapitulação, este sistema da Petrobras é composto pela refinaria REPLAN, pelo duto OSBRA e por cinco bases de distribuição que são conectadas a ele. Os produtos envolvidos nesta operação de transporte são a gasolina, o óleo diesel, o GLP e a QAV. As vazões de operação do primeiro ao quarto segmento do duto variam de 500 m<sup>3</sup>/h a 1000 m<sup>3</sup>/h. Todos os segmentos do duto operam sempre sob a mesma vazão, com exceção do último devido à redução no seu diâmetro em relação aos dos anteriores. Seguindo os exemplos tratados no capítulo 6, a tabela 6.1 mostra as capacidades reais e as discretizadas que são adotadas para os exemplos a serem apresentados neste capítulo.

Três séries de exemplos são propostas. As primeiras duas (E8.1 e E8.2) utilizam um horizonte de tempo operacional de 100 horas (4,2 dias), enquanto a terceira (E8.3) considera um período de 130 horas (5,4 dias). Estes exemplos se utilizam de alguns dados comuns aos apresentados no capítulo 6. A tabela 6.3 mostra as condições iniciais de estocagem para os derivados na refinaria bem como os seus limites mínimos e máximos, enquanto a tabela 6.4 mostra a estocagem inicial e os limites mínimos e máximos para os produtos que são estocados nos depósitos.

A tabela 8.1 ilustra alguns parâmetros que são comuns a todos os exemplos tratados neste capítulo. São mostrados os custos de estocagem nos sistemas operacionais que são conectados ao duto e as condições iniciais de estocagem dos segmentos do duto. Esta tabela ainda mostra os custos de interface entre os produtos, assim como os limites adotados para as vazões operacionais, os tempos mínimos de parada para o duto ( $\Delta_{LO}^{STOP}$ ), a vazão dos lotes de produção enviados pela refinaria ( $RP_{p,i,k}$ ), que para todos os exemplos assume valores iguais a 500 m<sup>3</sup>/h e

as vazões máximas permitidas de alimentação dos mercados consumidores fornecidas pelas bases de distribuição ( $UM_{p,d,k}$ ).

Tabela 8.1 – Parâmetros comuns dos exemplos para a formulação em tempo contínuo

<i>Produto</i>	<i>Custos de Estocagem</i>		<i>Estoque inicial nos segmentos do duto</i>		
	$CER_p$	$CED_{p,d}$	$XVZERO_{p,1,l}$	$XVZERO_{p,2,l}$	$XVZERO_{p,3,l}$
	[\$/m <sup>3</sup> .h]	[\$/m <sup>3</sup> .h]			
gasolina (1)	$2,00 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-4}$	1( $l=1,2,3,4,5,6,7,8$ )	1( $l=4,5$ )	1( $l=1,2,3,4,5$ )
óleo diesel (2)	$2,30 \times 10^{-5}$	$1,55 \times 10^{-4}$	1( $l=4$ )	1( $l=1,2,3$ )	0
GLP (3)	$7,00 \times 10^{-5}$	$2,00 \times 10^{-4}$	0	0	0
QAV (4)	$2,50 \times 10^{-5}$	$1,70 \times 10^{-4}$	0	0	0

<i>Produto</i>	<i>Estoque inicial nos segmentos do duto</i>		$CONTACT_{p,p'}$				<i>Parâmetros</i>	
	$XVZERO_{p,4,l}$	$XVZERO_{p,5,l}$	$p'=1$	$p'=2$	$p'=3$	$P'=4$	$Q\_OP^{LO}$ [m <sup>3</sup> /h]	500
							$Q\_OP^{UP}$ [m <sup>3</sup> /h]	1000
gasolina (1)	1( $l=1, \dots, 10$ )	0	0	3000	3700	3500	$\Delta_{LO}^{STOP}$ [h]	0
óleo diesel (2)	0	1( $l=1,2,\dots,5$ )	3000	0	X	X	$RP_{p,i,k}$ [m <sup>3</sup> /h]	500
GLP (3)	1( $l=11,12$ )	0	3700	X	0	X	$UM_{p,d,k}$ [m <sup>3</sup> /h]	500
QAV (4)	0/0	0	3500	X	X	0		

A tabela 8.2 fornece as demandas estabelecidas pelos mercados consumidores para as séries de exemplos E8.1, E8.2 e E8.3. Note que para E8.3 a demanda estabelecida para o óleo diesel ( $p=2$ ) no mercado consumidor conectado à primeira base de distribuição ( $d=1$ ) assume diferentes valores em relação às duas primeiras séries. Este valor é mostrado nesta tabela, em parênteses. Esta tabela mostra também os custos unitários de bombeamento para os exemplos E8.1 e E8.2. Os custos de estocagem mostrados em todas as localidades nesta tabela têm os seus valores alterados em relação aos adotados no capítulo 6. Isto se deve ao fato de que neste capítulo deseja-se que os custos de bombeamento e os de interface sejam os mais representativos da operação dutoviária em questão. Isto se deve ao fato das estações de bombeamento dos dutos consumirem quantidades de energia elétrica e dos altos volumes das interfaces formadas no interior das linhas dutoviárias.

Tabela 8.2 – Demandas (E8.1, E8.2 e E8.3) e custos de bombeamento (E8.1 e E8.2)

<i>Demandas [m<sup>3</sup>]</i>					
<i>Produto</i>	$DEM_{p,1}$	$DEM_{p,2}$	$DEM_{p,3}$	$DEM_{p,4}$	$DEM_{p,5}$
gasolina (1)	0	0	0	30000	8000
óleo diesel (2)	9000 (15000)	15000	0	0	12000
GLP (3)	0	0	0	5000	0
QAV (4)	0	0	0	0	0
<i>Custos de Bombeamento [\$(m<sup>3</sup>.h)]</i>					
<i>Produto</i>	$CP_{p,1,k}$	$CP_{p,2,k}$	$CP_{p,3,k}$	$CP_{p,4,k}$	$CP_{p,5,k}$
gasolina (1)	0,0175	0,0225	0,0275	0,0300	0,0345
óleo diesel (2)	0,0180	0,0230	0,0280	0,0310	0,0365
GLP (3)	0,0240	0	0,0340	0,0390	0,0445
QAV (4)	0	0	0	0,0305	0,0350

### 8.2. Série E8.1 – Representação contínua versus discreta

Neste item, a formulação baseada na representação em tempo contínuo (exemplo E8.1C) é comparada com a representação discreta proposta anteriormente (E8.1D) por Rejowski Jr. e Pinto (2004).

A figura 8.1 mostra a programação de produção pré determinada pela refinaria para os produtos envolvidos nesta operação para as séries E8.1 e E8.2. Esta figura também ilustra a composição dos lotes de produção, bem como os instantes iniciais e finais das operações de carregamento nos tanques da refinaria. Para o exemplo E8.1C, o décimo intervalo de tempo corresponde aos instantes finais dos lotes 1 e 2 e aos iniciais dos lotes 3 e 4. Note que o lote 1 é composto pelo produto 1, o lote 2 pelo produto 2, o lote 3 pelo produto 3 e o lote 4 pelo produto 4 e que todos possuem vazão igual a 500 m<sup>3</sup>/h. Os exemplos E8.1D possuem intervalos de tempo com as durações ajustadas de modo que o horizonte de tempo seja satisfeito. O exemplo E8.1D1 divide as primeiras 60 horas do horizonte de tempo em 12 intervalos de tempo de 5 horas cada e as 40 últimas horas 6 intervalos de 6,67 horas. O exemplo E8.1D2 divide as mesmas frações do horizonte de tempo em 10 intervalos de 6 horas (60 horas) e em 5 intervalos de 8 horas cada (40 horas). O exemplo E8.1D3 é composto por 10 intervalos de tempo cujas durações são de 10 horas cada. Note que um aspecto crítico da representação discreta do tempo é que além de satisfazer o horizonte de tempo operacional, ela deve atender também as temporizações das tarefas de carregamento nos tanques da refinaria. Por exemplo, o exemplo E8.1D1 satisfaz os

instantes em que os tanques da refinaria terminam de receber os lotes 1 e 2 e começam a receber os lotes 3 e 4 ( $Tf_1=Tf_2=Ti_3=Ti_4=60$ ) com 12 intervalos, enquanto o exemplo E8.1D2 atende tal condição com 10 intervalos e o exemplo E8.1D3 com 6 intervalos de tempo.

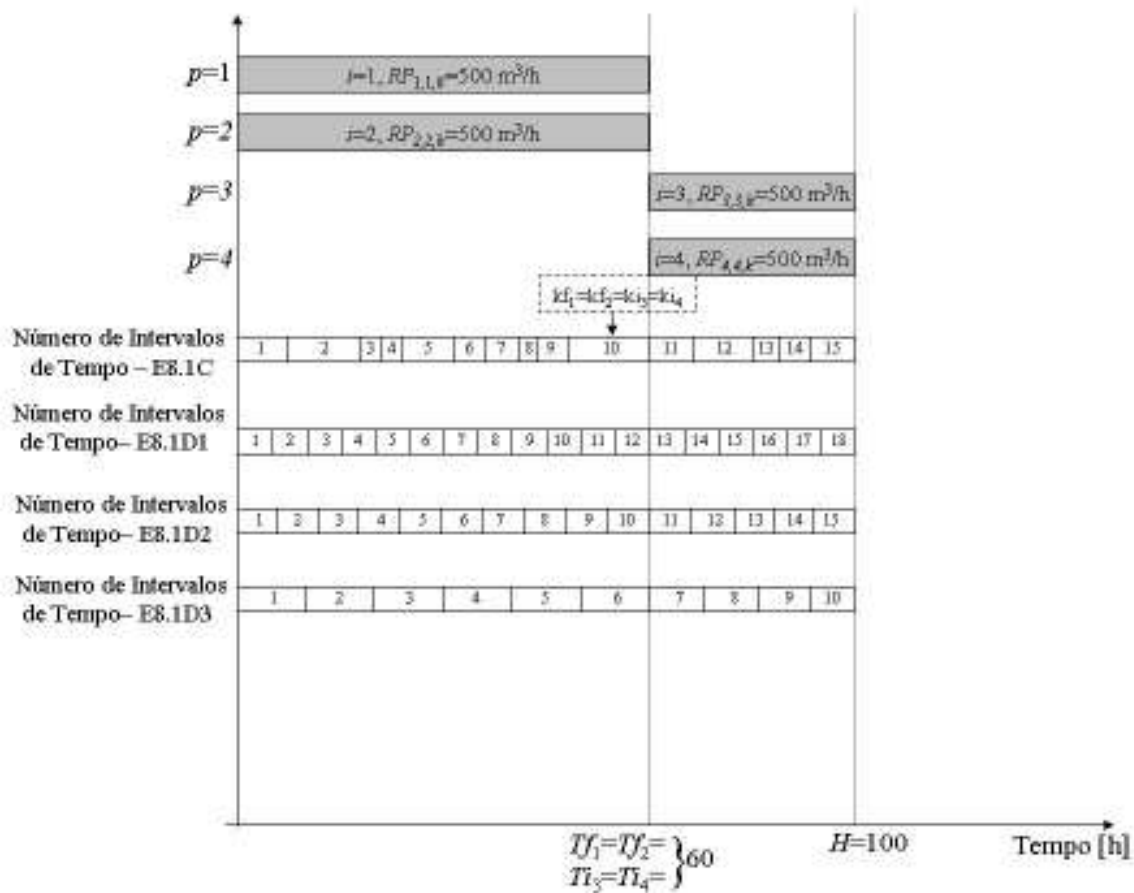


Figura 8.1 – Programação de produção e horizonte de tempo para os exemplos E8.1 e E8.2

A figura 8.2 ilustra a curva da taxa de rendimento em função das durações assumidas pelos intervalos de tempo bem como os seus coeficientes. Note que para a formulação MILP em tempo discreto, as bombas operam com taxas de vazão e de rendimento fixas durante toda a operação, assim como o duto, que opera com uma vazão fixa quando é ativado. Cabe ressaltar que nesta formulação, o nível de discretização adotado da representação do tempo é fundamental para os valores destas taxas. No caso da vazão, assume-se que os descarregamentos da refinaria para o duto e deste para as bases se dão com volumes fixos e dentro de um período de tempo conhecido. Com relação às taxas de rendimento, assume-se que estas variam conforme a vazão, que por sua vez, depende das durações dos intervalos de tempo.

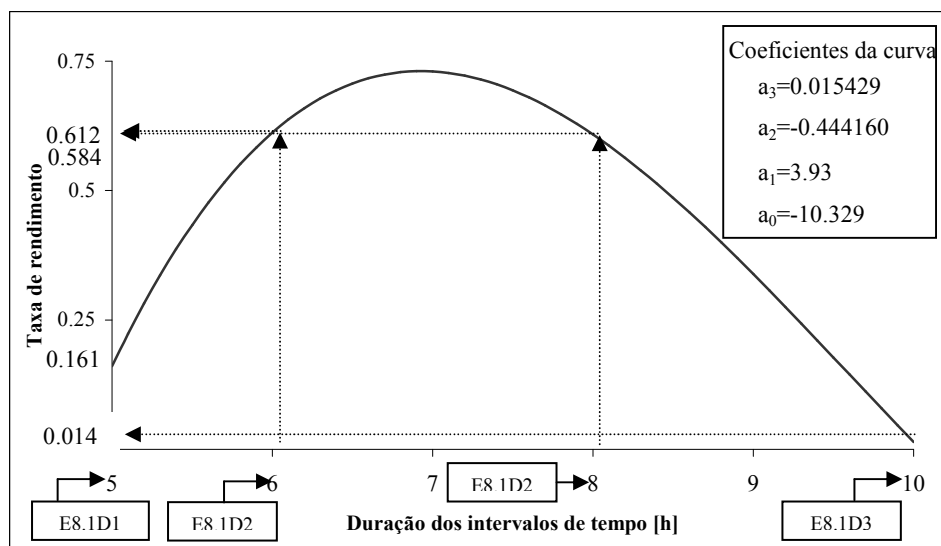


Figura 8.2 – Taxa de rendimentos para os exemplos E8.1D

O exemplo E8.1C2 utiliza a formulação com a representação em tempo contínuo, embora as suas durações sejam fixadas em valores iguais aos do exemplo E8.1D2 (6 horas nos primeiros 10 intervalos de tempo e 8 horas nos últimos 5). Com as durações dos intervalos de tempo fixas, o duto deve operar com vazões e taxas de rendimento das estações de bombeamento constantes. Note que todos os termos não lineares presentes na função objetivo se tornam lineares. No entanto, as durações dos intervalos de tempo ainda são variáveis na formulação e desta forma o modelo é resolvido como um MINLP.

A tabela 8.3 mostra os resultados computacionais para a série de exemplos E8.1. Todos os modelos foram implementados na linguagem computacional *GAMS* (Brooke et al., 2000). O algoritmo DICOPT++ (Viswanathan e Grossmann, 1990) foi utilizado para os exemplos E8.1C1 e E8.1C2, enquanto o algoritmo CONOPT2 (Drud, 1992) foi utilizado para a resolução dos problemas não lineares e o algoritmo OSL (IBM, 1991) foi empregado para a resolução dos problemas MILP mestres. Este último ainda foi utilizado para os problemas MILP nos exemplos E8.1D1, E8.1D2 e E8.1D3.

Tabela 8.3 – Resultados computacionais para os exemplos E8.1

<i>Exemplos</i>	<i>E8.1D</i>			<i>E8.1C</i>	
	E8.1D1	E8.1D2	E8.1D3	E8.1C1	E8.1C2
Solução Relaxada	36276,75	14809,9	Inviável	10114,9	10736,2
Solução Encontrada	47770,1	20281,9	-	19718,1	20281,9
Variáveis Binárias	560	420	252	420	420
Variáveis Contínuas	6001	4759	2690	4742	4742
Tempo Computacional [s]*	16700,0	178,0	-	849,0	674,1

\*Resultados utilizando-se uma plataforma *AMD ATHLON* 1.8GHz 448 Mb RAM

O exemplo E8.1D1 fornece valores com altos custos operacionais (\$47770,1). Isto ocorre, pois o valor fixado para a taxa de rendimento das estações de bombeamento possui um valor baixo ao longo de todo o horizonte de tempo operacional. O elevado nível de discretização adotado para este exemplo faz com que o mesmo possua um elevado número de variáveis discretas e contínuas e desta forma, constitui-se como a principal razão para o alto tempo computacional de 16700 segundos. O exemplo E8.1D2 impõe taxas de rendimento mais altas em relação ao primeiro exemplo e portanto fornece um valor baixo para os custos operacionais (20281,9 ou 57,5% de redução em relação a E8.1D1). Um outro aspecto interessante é com relação ao nível de discretização adotado. Neste caso, este exemplo gerou um modelo com um número menor de variáveis contínuas e discretas. Conseqüentemente, a sua solução ótima foi encontrada em aproximadamente 180 segundos. O exemplo E8.1D3 não fornece solução viável para o problema devido ao número insuficiente de intervalos de tempo para atender as demandas requeridas ao final do horizonte de tempo especificado.

O exemplo E8.1C1 obteve a melhor solução entre todos os casos apresentados para a série E8.1 (\$19718,1). A utilização da representação contínua do tempo fornece valores maiores para as taxas de rendimento utilizadas pelas estações de bombeamento. O valor encontrado para os custos operacionais foram 7,7% menores em relação ao fornecido pelo exemplo E8.1D2. Outro aspecto interessante se dá pela comparação do número de variáveis entre os exemplos E8.1C1 e E8.1D2, pois estes apresentam o mesmo número de intervalos de tempo. No presente caso, o primeiro apresenta um número maior de variáveis contínuas, pois a duração dos intervalos de tempo, bem como as taxas de rendimento são declaradas como variáveis, enquanto no exemplo E8.1D2 estas são parâmetros para toda a operação.

Finalmente, o exemplo E8.1C2 fornece a mesma solução em relação à do E8.1D2, porém com um tempo computacional acima de 600 segundos, enquanto o exemplo com a formulação linearizada a encontrou em aproximadamente 170. Esta comparação é crucial, pois ela mostra que a formulação MILP em tempo discreto (Rejowski Jr. e Pinto, 2004) é um caso particular da formulação MINLP em tempo contínuo.

### 8.3. Série E8.2 – Variação do número de intervalos de tempo e do tempo mínimo de parada do duto na formulação em tempo contínuo

Esta seção analisa a influência da variação do número dos intervalos de tempo nos custos operacionais da operação dutoviária.

O número de intervalos de tempo possui um grande impacto na formulação MINLP proposta. Desta forma, os exemplos E8.2C utilizam os mesmos dados referentes aos dos exemplos E8.1C, porém são compostos por números de intervalos de tempo distintos, como mostra a tabela 8.4. Note que todos os exemplos da série E8.2C são compostos por 10 intervalos de tempo nas primeiras 60 horas de operação. O exemplo E8.2C1 possui 2 intervalos nas últimas 40 horas, enquanto o exemplo E8.2C2 é composto por 3. O exemplo E8.2C3 tem 4 intervalos e o E8.2C4 possui 6. Note que o exemplo E8.1C1 também é considerado nesta comparação, pois possui 5 intervalos de tempo nas últimas 40 horas. Finalmente, o exemplo E8.2C5 é composto por 7 intervalos de tempo nas últimas 40 horas do horizonte de operação. Os resultados computacionais dos modelos também são mostrados pela tabela 8.4.

Tabela 8.4 – Número de intervalos de tempo e resultados computacionais dos exemplos E8.2C

<i>Examples</i>	E8.2C1	E8.2C2	E8.2C3	E8.2C4	E8.2C5
	<i>Número de Intervalos de Tempo</i>				
Primeiras 60 horas	10	10	10	10	10
Últimas 40 horas	2	3	4	6	7
Solução Relaxada	11250,8	10262,0	10025,6	10110,4	10110,4
Solução encontrada	Inviável	Inviável	Inviável	19718,1	19718,1
Variáveis Binárias	336	364	392	448	476
Variáveis Contínuas	4076	4298	4520	4964	5166
Tempo Computacional [s]*	-	-	-	1607,1	2367

\*Resultados utilizando-se uma plataforma *AMD ATHLON* 1.8GHz 448 Mb RAM



Os exemplos E8.2C1, E8.2C2 e E8.2C3 não encontraram soluções viáveis devido ao reduzido número de intervalos de tempo. Nestes casos, estes números se mostraram insuficientes para atender as demandas no horizonte de tempo determinado. Os exemplos E8.2C4 e E8.2C5 geraram uma solução viável de valor igual ao da encontrada pelo exemplo E8.1C1. Estes últimos exemplos mostram soluções viáveis iguais às encontradas pelo exemplo E8.1C1 com o sistema dutoviário (refinaria, duto e bases) inoperante nos seus últimos intervalos de tempo. Para o exemplo E8.2C4, isto acontece para o décimo-sexto intervalo de tempo, cuja duração foi de 0 horas. Para o último exemplo desta série (E8.2C5), os últimos intervalos de tempo (décimo-sexto e décimo sétimo) possuem duração de 0 horas. Os tempos computacionais encontrados para os exemplos desta série mostram que o exemplo E8.1C1 (849,0s) se mostra menor em relação aos dos exemplos E8.2C4 (1607,1s) e E8.2C5 (2367,0s). Desta forma, para o presente exemplo a melhor composição dos exemplos se dá quando o modelo possui nas primeiras 60 horas por 10 intervalos de tempo e 5 nas últimas 40 horas de operação.

Um outro aspecto operacional importante de sistemas dutoviários refere-se à situação na qual o parâmetro  $\Delta_{STOP}^{LO}$  toma valores maiores do que zero. O valor adotado para este parâmetro depende da extensão do duto, das regras operacionais do sistema impostas pela companhia e dos mercados consumidores. Desta forma, os exemplos E8.2C6, E8.2C7, E8.2C8 e E8.2C9 são compostos por 15 intervalos de tempo e consideram os mesmos parâmetros que aqueles dos exemplos previamente descritos, com exceção do parâmetro  $\Delta_{STOP}^{LO}$ , que toma valores iguais a 5, 10, 15 e 20 horas, respectivamente. A tabela 8.5 mostra os resultados para estes exemplos.

Tabela 8.5 – Variação do parâmetro  $\Delta_{STOP}^{LO}$  para os exemplos E8.2C

<i>Exemplos</i>	E8.2C6	E8.2C7	E8.2C8	E8.2C9
$\Delta_{STOP}^{LO}$ [h]	5	10	15	20
Solução Relaxada	10501,8	11868,9	12967,9	13787,3
Solução Encontrada	19718,1	19718,1	19970,1	20690,1
Tempo Computacional [s]*	917,7	1000,7	1590,9	1290,6

\*Resultado em uma plataforma *AMD ATHLON* 1.8GHz 448 Mb RAM

Os exemplos E8.2C6 e E8.2C7 ( $\Delta_{STOP}^{LO}$ =5h e 10h) mostram os melhores resultados para os custos operacionais desta série E8.2 (\$19718.1). Nestes exemplos, a restrição (7.10) não é

ativada em relação ao seu valor mínimo dado pelo parâmetro  $\Delta_{STOP}^{LO}$ , ou seja, o duto permanece inoperante por um período maior do que o valor estabelecido para este parâmetro nestes exemplos. No caso, a refinaria deixa de alimentar o duto por 12,3 horas, assim como este último não alimenta nenhuma base. O exemplo E8.2C8 ( $\Delta_{STOP}^{LO}=15h$ ) fornece uma solução pior do que os exemplos E8.2C6 e E8.2C7. Para este caso, a restrição (7.10) é ativada em relação ao seu valor mínimo estabelecido pelo parâmetro  $\Delta_{STOP}^{LO}$  e o duto permanece inoperante por 15 horas. Conseqüentemente, as estações de bombeamento operam com uma taxa de rendimento inferior às obtidas para os exemplos E8.2C6 e E8.2C7. Finalmente, o exemplo E8.2C9 ( $\Delta_{STOP}^{LO}=20h$ ) encontrou a pior solução dentre estes exemplos com altos custos operacionais (\$20690,1). Cabe ressaltar que neste exemplo a restrição (7.10) não é ativada, ou seja, a operação dutoviária obtida se dá em regime contínuo e desta forma, o duto opera de maneira contínua por 100 horas e todas as variáveis  $\Delta_k^2$  tomam valores iguais a zero.

#### 8.4. Série E8.3 – Configurações distintas para as estações de bombeamento

Esta seção apresenta um exemplo de operação dutoviária de maior porte em relação aos exemplos tratados nas séries 8.1 e 8.2. Os exemplos tratados nesta seção (série E8.3) ainda testam diferentes configurações de bombeamento com diferentes custos unitários e variações das taxas de rendimento.

A figura 8.3 mostra o perfil de produção assumido pela refinaria para a série E8.3. Os exemplos desta série são compostos por 3 configurações de bombeamento distintas (C1, C2 e C3). O horizonte de tempo operacional considerado é de 130 horas com 16 intervalos de tempo. Os lotes 1 e 2 são compostos por gasolina e óleo diesel, respectivamente e estes começam a ser carregados nos tanques da refinaria no início da operação ( $Ti=0h$ ) e terminam na centésima hora da operação ( $Tf=100h$ ). GLP e QAV compõem os lotes 3 e 4, respectivamente e tempos de início e término para estes carregamentos ocorrem em  $Ti=100h$  e  $Tf=130h$ , respectivamente. As vazões de todos os lotes de produção são conhecidas e possuem valores fixos iguais a  $500 m^3/h$ . As condições iniciais de estocagem na refinaria, nos depósitos e nos segmentos do duto são as mesmas utilizadas pelos exemplos E8.1 e E8.2, mostradas nas tabelas 6.4 e 8.1. As demandas estabelecidas pelos mercados consumidores são as mesmas mostradas pela tabela 8.2, com exceção do óleo diesel ( $p=2$ ) no primeiro depósito ( $d=1$ ), que assume valores iguais a  $15,000 m^3$ .

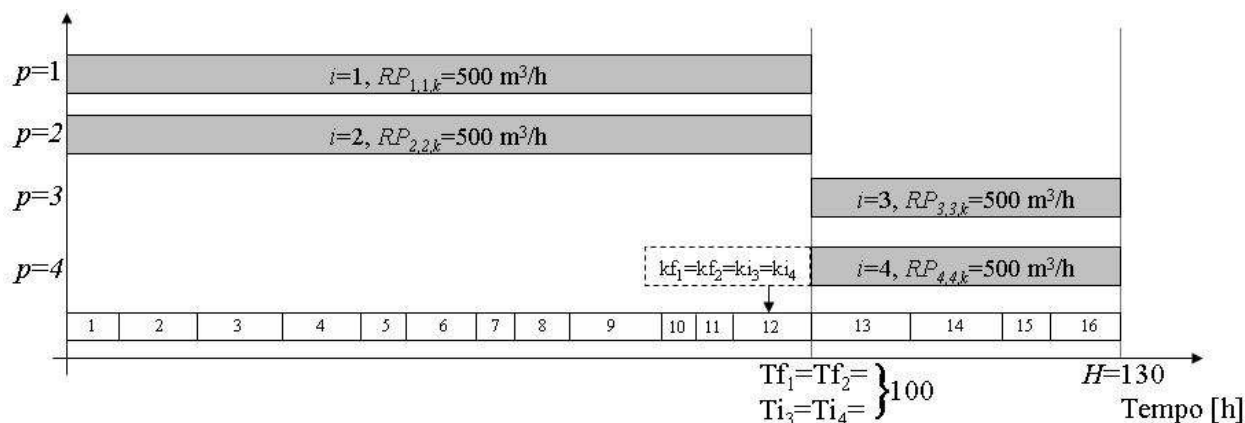


Figura 8.3 – Perfil de produção adotado pela refinaria para os exemplos E8.3

As três configurações de bombeamento testadas possuem diferentes custos unitários de bombeamento, como mostra a tabela 8.5.

Tabela 8.5 – Custos unitários de bombeamento

Configurações de Bombeamento	$CP_{1,d,k}/CP_{2,d,k}/CP_{3,d,k}/CP_{4,d,k}$ [\$/m <sup>3</sup> ]		
	$d=1$	$d=2$	$d=3$
E8.3C1	0,0525/0,0540/0,0720/0	0,0675/0,0690/0/0	0,0978/0,0996/0,01212/0
E8.3C2	0,0525/0,0180/0,0240/0	0,0675/0,0690/0/0	0,0825/0,0840/0,0102/0
E8.3C3	0,0420/0,0432/0,0576/0	0,0624/0,06369/0/0	0,0762/0,0777/0,0906/0
Configurações de Bombeamento	$d=4$	$d=5$	
E8.3C1	0,0975/0,1008/0,1284/0,0990	0,1110/0,1176/0,1434/0,1128	
E8.3C2	0,0900/0,0930/0,117/0,0915	0,3105/0,3285/0,4005/0,315	
E8.3C3	0,0864/0,0888/0,1137/0,0879	0,0996/0,1056/0,1287/0,1011	

As curvas de rendimento podem ser suficientemente descritas por polinômios de terceira ordem. A figura 8.4 ilustra as curvas das taxas de rendimento como funções da duração dos intervalos de tempo para cada configuração a ser testada nestes exemplos. Note que para valores baixos e altos das vazões utilizadas pelo duto, a configuração C1 apresenta taxas de rendimento superiores em relação às das configurações C2 e C3, enquanto a C2 mostra um melhor desempenho para valores de vazões intermediários. Embora a configuração C3 apresente taxas

de rendimento inferiores quando comparadas às das configurações C1 e C2, ela possui custos unitários de bombeamento inferiores. Finalmente, o parâmetro  $\Delta_{STOP}^{LO}$  toma valores iguais a 12 horas, ou seja, a duração dos intervalos de tempo deve ser de no mínimo 1 dia caso a decisão de parada do duto seja tomada ao longo do horizonte de tempo operacional.

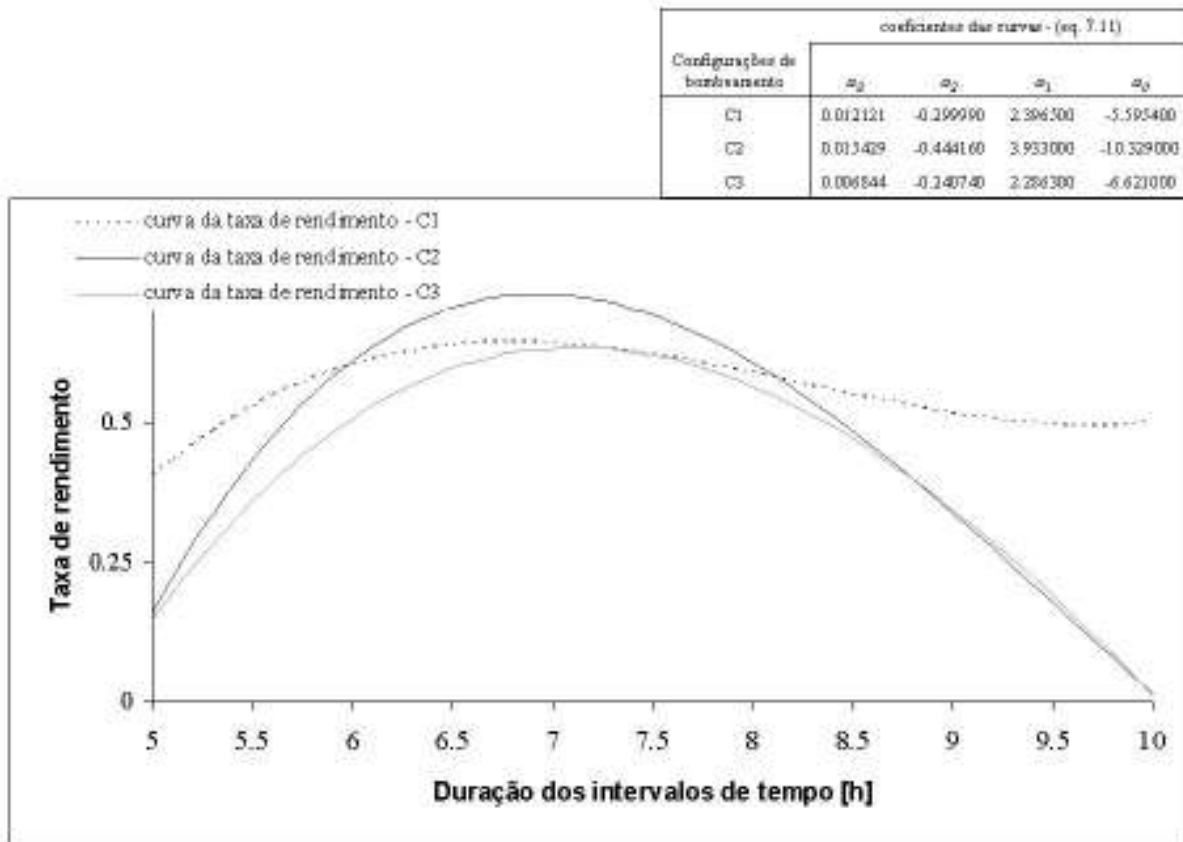


Figura 8.4 – Curvas de rendimento das configurações da série E8.3

A tabela 8.6 mostra os resultados computacionais para a série E8.3. A configuração C2 encontrou a melhor solução para esta série com um *schedule* de custo \$26919,4. As configurações E8.3C1 e E8.3C3 fornecem soluções com custos operacionais mais elevados (\$32669,5 e \$30630,7, respectivamente). Cabe ressaltar que as soluções encontradas pelos exemplos E8.3C1 e E8.3C3 são 21,3% e 13,8% respectivamente superiores ao valor encontrado pelo exemplo E8.3C2. Note que E8.3C3 necessitou de um maior tempo computacional devido ao maior número de iterações dispendido pelo algoritmo de Aproximação Externa com Relaxação de Igualdade e Penalidade Acrescida (Viswanathan e Grossmann, 1990) implementado no *solver*

DICOPT++. A tabela 8.6 ainda mostra a distribuição dos custos operacionais para os exemplos da série E8.3. Note que os custos de bombeamento representam mais de 50% dos custos operacionais das operações dutoviárias. Isso ocorre devido às grandes quantidades de energia requeridas pelas estações de bombeamento do duto. Os custos de interface representam uma parcela que varia entre 27% e 33% dos custos operacionais, enquanto os custos de estocagem de todas as localidades representam aproximadamente de 13 a 16%.

Tabela 8.6 – Resultados computacionais para a série E8.3

<i>Exemplos</i>	E8.3C1	E8.3C2	E8.3C3
Solução Relaxada	18896,1	15249,0	15597,2
Solução Encontrada	32669,5	26919,4	30630,7
Custos de Bombeamento (%)	59,2	50,1	56,3
Custos de Interface (%)	27,3	33,4	29,3
Custos de Estocagem na Refinaria (%)	2,7	3,3	2,9
Custos de Estocagem nos Depósitos (%)	10,8	13,2	11,5
Variáveis Binárias	448	448	448
Variáveis Contínuas	5043	5043	5043
Tempo Computacional [s]*	2979,8	4040,8	1824,1

\*Resultados em uma plataforma *AMD ATHLON* 1.8GHz 448 Mb RAM

A figura 8.5 mostra as vazões operacionais utilizadas pelo duto bem como as taxas de rendimento das estações de bombeamento. As barras relacionam as taxas de rendimento, enquanto os círculos representam as vazões operacionais ao longo do tempo. Note que o exemplo E8.3C1 impõe uma interrupção de 25,4 horas na transferência dos produtos no sexto intervalo de tempo. No exemplo E8.3C2 o duto não opera no sétimo intervalo de tempo, quando o mesmo permanece inoperante por 24,0 horas. Uma outra característica a ser evidenciada de E8.3C2 é que as taxas de rendimento possuem valores mais elevados em relação às utilizadas pelos outros exemplos. O exemplo E8.3C3 forneceu a segunda melhor solução dentre os exemplos, com uma interrupção operacional no sétimo intervalo de tempo de 21,7 horas.

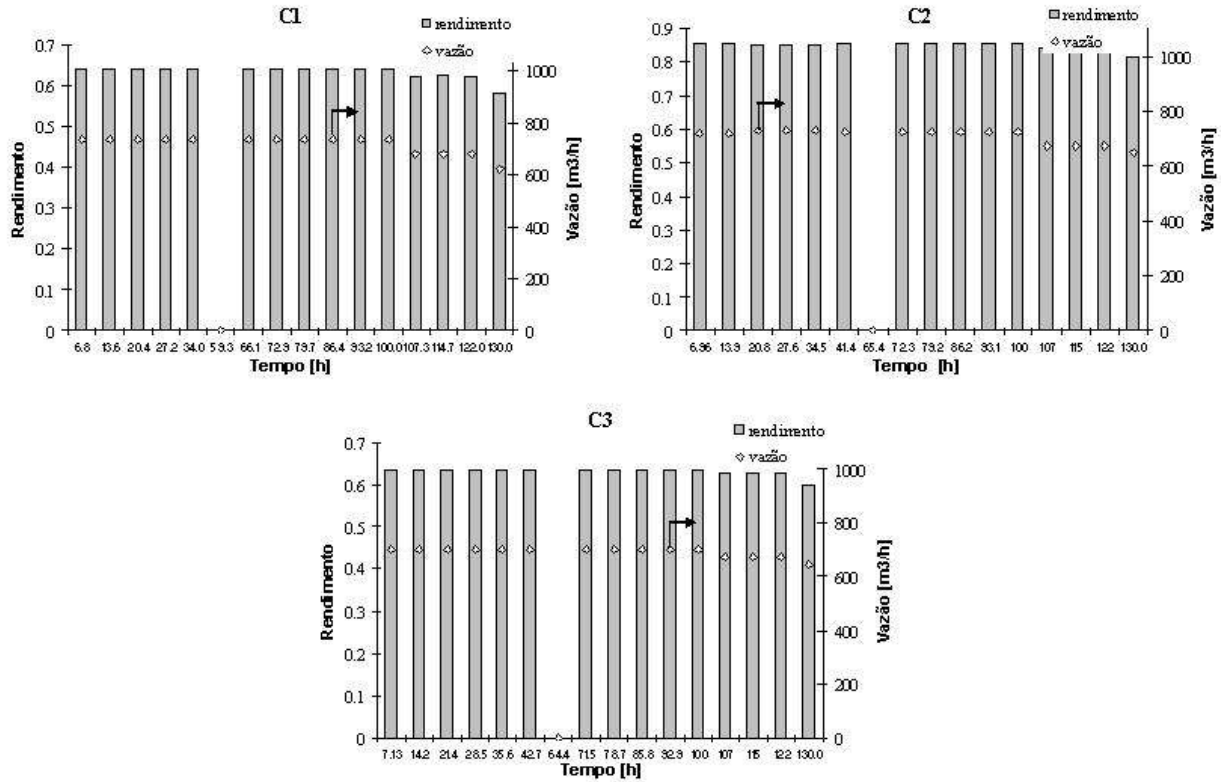


Figura 8.5 – Taxas de rendimento e de vazão para as série E8.3

A figura 8.6 mostra a operação do duto para o exemplo E8.3C2, as suas correspondentes variáveis  $XS_{d,k}$  e as alimentações das bases de distribuição. Nos primeiros 6 intervalos de tempo a refinaria alimenta o duto com gasolina e com óleo diesel do sétimo ao décimo quinto. O quarto depósito é alimentado nos 2 primeiros intervalos de tempo com GLP ( $p=3$ ), enquanto o segundo recebe óleo diesel ( $p=2$ ) nos 3 intervalos de tempo subseqüentes, conforme mostra a figura 8.6. Uma característica importante comum a todos os exemplos é que este depósito recebe 3 lotes deste produto, quando apenas 1 lote é necessário para satisfazer as demandas ( $XDMIN_{2,2}=1$ ). Isso ocorre para evitar a formação de uma interface no terceiro segmento devido aos seus altos custos. Desta forma, o segundo depósito armazena uma quantidade maior deste produto do que a necessária para atender as demandas estabelecidas pelo respectivo mercado consumidor. Antes de parar por 24 horas, o sistema dutoviário entrega integralmente um lote de gasolina à quarta base. Após esta parada, no oitavo intervalo de tempo, a quarta base recebe um lote adicional de gasolina. Do nono ao décimo quinto intervalos de tempo, o quarto e o quinto depósito retiram simultânea e respectivamente gasolina ( $p=1$ ) e óleo diesel ( $p=2$ ) do duto para satisfazer as suas demandas. Finalmente, no décimo sexto intervalo de tempo, somente o primeiro segmento

permanece em operação, permitindo que o primeiro depósito receba um lote de óleo diesel ( $p=2$ ). Os três primeiros depósitos entregam quantidades inferiores de derivados aos seus respectivos mercados quando comparados aos 2 últimos e note que apesar de o terceiro segmento operar em quase todos os seus intervalos de tempo, o mesmo não alimenta o seu respectivo depósito durante o horizonte de tempo operacional.

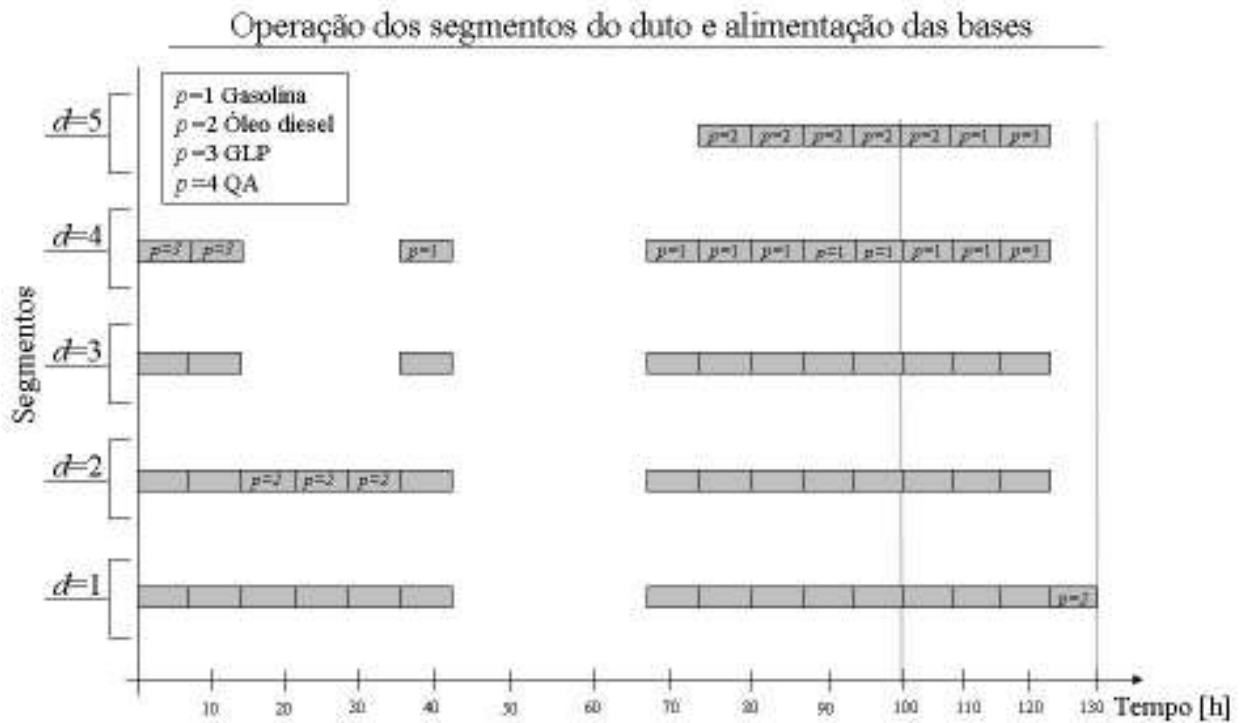


Figura 8.6 – Resultados operacionais dos segmentos do duto para o exemplo E8.3C2

A figura 8.7 ilustra os níveis de estocagem em todas as bases conectadas ao duto para o exemplo E8.3C2. Note que o quarto e o quinto depósitos ( $d=4$ ,  $d=5$ ) enviam inicialmente grandes quantidades de gasolina e óleo diesel para os mercados consumidores. Subseqüentemente, estes depósitos retiram quantidades destes produtos do duto para satisfazer as demandas ao final do horizonte de tempo operacional. Note que o segundo depósito ( $d=2$ ) retira grandes quantidades de óleo diesel do duto, para evitar a formação de uma interface no segmento seguinte.

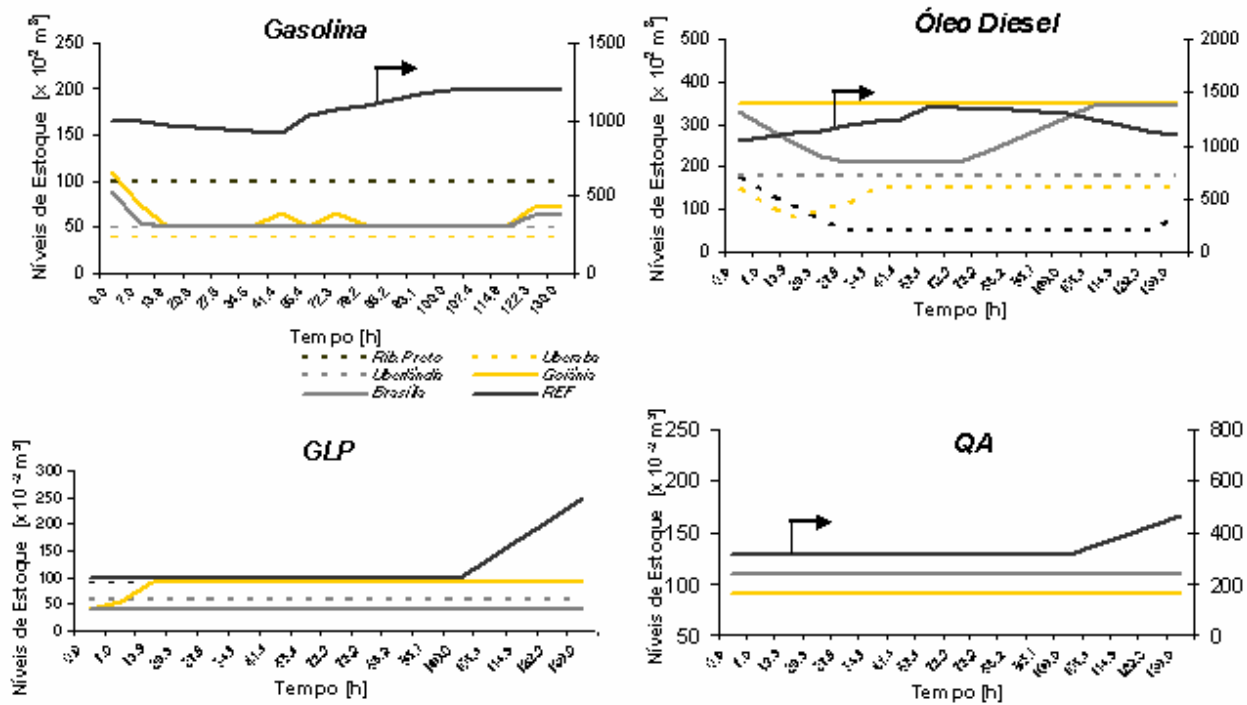


Figura 8.7 – Níveis de estocagem nas bases de distribuição para o exemplo E8.3C2

### 8.5. Sumário

Neste capítulo são apresentados diversos exemplos para a formulação matemática de *scheduling* de operações dutoviárias que utiliza uma representação contínua do tempo. Esta formulação ainda leva em conta as variações de vazões do duto durante a operação e as taxas de rendimento das estações de bombeamento que variam de acordo com a vazão de utilização do duto. Diversas características e tópicos com relação a esta formulação foram estudados neste capítulo, dentre eles os seguintes:

- Comparação com a formulação MILP em tempo discreto com vazões e rendimentos fixos proposta previamente por Rejowski Jr. e Pinto (2004): nos presentes exemplos foi mostrado que a formulação MINLP em tempo contínuo forneceu soluções de melhor qualidade quando comparada às da formulação MILP proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2004). Outra característica importante evidenciada é que tal formulação MILP em tempo discreto é um caso particular da presente formulação proposta;
- Influência do número de intervalos de tempo: foi demonstrado que o número de intervalos de tempo que compõem a presente formulação MINLP possui um grande impacto



nos custos fornecidos pela mesma e este fator deve sempre ser considerado para que a melhor solução possa ser encontrada em tempo computacional factível;

- Influência do intervalo de tempo mínimo de parada do sistema dutoviário: foi verificado que este parâmetro pode afetar a qualidade da solução obtida;
- Comparação de diversas configurações de bombeamento: foram testadas diversas configurações sendo mostrado que estas fornecem soluções com custos distintos bem como *schedules* diferentes para a operação dutoviária.

## **9. Formulações de *scheduling* de sistemas dutoviários com considerações hidráulicas**

### *9.1. Introdução*

As formulações apresentadas nos capítulos anteriores abordam o problema do *scheduling* de operações em sistemas dutoviários sem considerar, ou considerando somente de forma indireta e bastante simplificada, os aspectos hidráulicos dos mesmos. A modelagem matemática rigorosa dos fenômenos relacionados às variações de energia que os produtos sofrem ao longo de uma linha dutoviária permite determinar de maneira precisa os custos operacionais das estações de bombeamento, bem como as suas respectivas condições operacionais.

A energia provida às estações deve compensar as perdas de energia que os produtos sofrem ao longo de um sistema dutoviário que podem ocorrer através de diversas maneiras, dentre elas, devido às variações no seu diâmetro interno, ao seu perfil topográfico e às perdas por atrito. Portanto, esta modelagem se torna bastante complexa em relação às formulações previamente mostradas.

As considerações hidráulicas se fazem absolutamente necessárias devido às grandes variações no consumo de energia das estações de bombeamento e dos seus custos unitários. Desta forma, os ganhos proporcionados por uma formulação que considere os aspectos hidráulicos no *scheduling* de sistemas dutoviários podem ser significativos. No entanto, a formulação rigorosa destes aspectos hidráulicos constitui-se como um grande desafio pelo aspecto não linear das suas equações e pela natureza combinatória gerada pelas diversas possibilidades de seqüenciamento entre os produtos envolvidos na operação de transporte, que nas formulações a serem mostradas, influenciam não somente os custos de interface, mas também os de bombeamento. A geração de soluções de boa qualidade para este problema complexo torna-se ainda menos intuitiva em situações de energia limitada para as estações de bombeamento do sistema dutoviário, que podem excluir combinações de seqüenciamento que sejam usualmente utilizadas devido aos seus baixos custos de interface.

O objetivo deste capítulo é o de apresentar formulações matemáticas para sistemas dutoviários compostos por uma base de distribuição com considerações hidráulicas. A primeira delas resulta em um modelo MINLP e considera variações na duração dos intervalos de tempo e na vazão operacional do sistema ao longo do horizonte de tempo operacional. Posteriormente, uma segunda formulação apresentada como um modelo MILP é descrita. Cabe ressaltar que estas formulações possuem caráter inédito para a pesquisa de sistemas dutoviários ao considerar simultaneamente o *scheduling* e os aspectos hidráulicos deste sistema operacional. Finalmente,

resultados computacionais para ambos os modelos são apresentados, assim como as suas soluções geradas são discutidas.

### 9.2. Descrição do problema

O problema abordado neste capítulo é semelhante aos abordados nos anteriores. O sistema é composto por uma refinaria e um duto multiproduto. Contudo, ao invés de múltiplas bases conectadas à linha dutoviária, este capítulo considera sistemas dutoviários com apenas uma base de distribuição em virtude da maior complexidade do problema correspondente. Adicionalmente aos aspectos de *scheduling* do referido sistema, o problema é tratado levando-se em conta os aspectos hidráulicos do mesmo.

### 9.3. Hipóteses da formulação com os aspectos hidráulicos

As hipóteses dos aspectos de *scheduling* desta formulação são as mesmas da formulação descrita nos capítulos 4, 5 e 7, com exceção da hipótese **H18** que é substituída pela hipótese **H19** e as hipóteses **H20** a **H29** que devem ser incluídas nesta formulação. Estas são dadas a seguir:

**H19** – A vazão de bombeamento dos produtos e o rendimento das estações de bombeamento dependem do seqüenciamento dos produtos dentro da linha dutoviária.

**H20** – O duto transporta os produtos sob regime turbulento pleno de escoamento de fluidos incompressíveis.

**H21** – O custo de bombeamento depende da energia consumida pelas estações de bombeamento.

**H22** – O comprimento total da tubulação é igual ao seu comprimento reto.

**H23** – As estações de bombeamento possuem diversos estágios interconectados em série.

**H24** – A variação da pressão atmosférica é desprezível.

**H25** – Não há variação de diâmetro dentro do segmento dutoviário.

**H26** – A variação de pressão entre a refinaria e o início do primeiro lote é desprezível.

**H27** – A variação de pressão entre o último lote e a base de distribuição é desprezível.

**H28** – Admite-se que o sistema dutoviário possua 2 ou mais estações de bombeamento distribuídas ao longo da linha dutoviária e que a primeira delas se encontra entre os tanques de armazenamento da refinaria e o primeiro lote do duto.

**H29** – As formulações matemáticas adotam que as variações do perfil topográfico ao longo de um lote discretizado do sistema dutoviário se dão de forma monotônica.

A hipótese **H19**, que substitui a hipótese **H18** descrita no capítulo 4, afirma que tanto o rendimento das estações de bombeamento quanto a vazão de operação do sistema dutoviário são influenciadas pelo seqüenciamento dos produtos dentro da linha dutoviária. Portanto nesta formulação, as considerações hidráulicas do capítulo 3, as quais descrevem que o ponto de operação do duto se dá na intersecção das curvas do sistema e dos estágios de bombeamento, são respeitadas.

A hipótese **H20** afirma que o duto transporta os produtos incondicionalmente dentro dos valores limites do regime turbulento para fluidos incompressíveis<sup>13</sup>.

A hipótese **H21** afirma que o custo de bombeamento depende da energia consumida pelas estações de bombeamento. Diferentemente das formulações anteriores, o custo de bombeamento é expresso por unidades distintas, conforme é mostrado no próximo item.

A hipótese **H22** afirma que o comprimento da tubulação utilizado para o cálculo das perdas de carga por atrito é igual ao seu comprimento reto. Desta forma, as formulações não consideram eventuais parcelas de comprimento equivalente decorrentes de singularidades nos dutos.

A hipótese **H23** postula que as estações de bombeamento possuem diversos estágios de bombeamento que são conectados em série, podendo ou não ser acionados em um dado intervalo de tempo.

A hipótese **H24** determina que as variações relacionadas à pressão atmosférica sejam desprezíveis ao longo do duto.

---

<sup>13</sup> Chen (1979) afirma que o regime turbulento pleno em tubos cilíndricos rugosos se dá para valores de número de Reynolds maiores do que 4000.

A hipótese **H25** afirma que não ocorrem variações de diâmetro ao longo de um dado segmento do duto. É importante notar que este não é o caso quando há múltiplas retiradas, pois há naturalmente uma redução da vazão.

As hipóteses **H26** e **H27** afirmam que não há variação de pressão entre os tanques de armazenamento da refinaria e o início do primeiro lote e entre o último lote do duto e os tanques da base de distribuição, respectivamente.

A hipótese **H28** postula que as estações de bombeamento são compostas por dois ou mais estágios conectados em série. Desta forma, as potências correspondentes podem ser somadas nas equações que representam os balanços de energia dos produtos que se encontram dentro do sistema dutoviário.

A hipótese **H29** admite que a discretização dos lotes evite a presença de picos ou vales internamente a cada um deles.

Portanto, esta formulação considera as hipóteses **H1** a **H6**, **H8** a **H17** e **H19** a **H29**.

#### *9.4. Nomenclatura das formulações com aspectos hidráulicos*

As formulações apresentam uma nomenclatura semelhante à apresentada no capítulo 7 e à mostrada nos capítulos 4 e 5. Estas novas formulações são desenvolvidas para sistemas dutoviários compostos por um segmento dutoviário e uma base de distribuição. Desta forma, o índice  $d$ , relativo a segmentos dutoviários e às bases de distribuição, é omitido. Adicionalmente, os conjuntos, parâmetros e variáveis dependentes deste índice apresentados nas formulações dos capítulos anteriores, continuam a ser utilizados nestas formulações, porém sem o referido índice. Uma exceção se faz ao custo unitário de bombeamento, onde o parâmetro  $CP_{p,d,k}$  é substituído por  $CP_k$ . Finalmente, as formulações mostradas neste capítulo ainda consideram as vazões de operações do duto como variáveis explícitas; fato que é desconsiderado na formulação apresentada nos capítulos 4,5 e 7. Além das nomenclaturas destes capítulos, os modelos levam em conta os seguintes índices, conjuntos, parâmetros e variáveis:

#### *Índices e Conjuntos*

$ep=1,\dots,EP$       estações de bombeamento

$LDISC_{ep}$       conjunto dos lotes localizados à descarga ou posteriores à estação de bombeamento  $ep$

$LINIT_{ep}$	conjunto dos primeiros lotes localizados após a descarga de uma estação de bombeamento $ep$
$LSUC_{ep}$	conjunto dos lotes localizados à sucção de uma estação intermediária de bombeamento $ep$
$N=1,\dots,N_{ep}$	número de estágios de bombeamento de uma dada estação $ep$
$ST_{ep}$	número de estágios da estação $ep$
$VISMAX$	produto de maior viscosidade cinemática
$VISMIN$	produto de menor viscosidade cinemática
 <i>Parâmetros</i>	
$A$	área transversal do duto
$a_p, b_p, c_p$	parâmetros da correlação do cálculo do fator de atrito para o produto $p$
$c_m$	coeficiente de ordem $m$ relacionado ao polinômio do rendimento das estações de bombeamento
$CP_k$	custo unitário de bombeamento no intervalo de tempo $k$
$Din$	diâmetro interno do duto
$\bar{f}_p$	fator de atrito a uma determinada vazão para o produto $p$ no duto
$g$	aceleração da gravidade
$LEXT_l$	comprimento total do lote $l$
$P_p^{REF}$	pressão absoluta de estocagem do produto $p$ na refinaria
$P_p^{VAP}$	pressão absoluta de vapor do produto $p$
$PAUX_l$	pressão absoluta relacionada ao lote $l$ do segmento no caso de o duto estar preenchido pelo produto de menor viscosidade cinemática
$PW_n^{UP}$	potência máxima de $n$ estágios de bombeamento
$PW_n^{LO}$	potência mínima de $n$ estágios de bombeamento

$PWAUX_{ep}$	potência da estação $ep$ no caso de o duto estar preenchido pelo produto de menor viscosidade cinemática
$Re_p$	número de Reynolds para o produto $p$ no duto a uma dada vazão
$v^{LO}$	velocidade mínima operacional dos produtos no duto
$v^{UP}$	velocidade máxima operacional dos produtos no duto
$V$	parâmetro do corte de potência
$z_l$	altitude do lote $l$
$z_{REF}$	altitude da refinaria
$\alpha$	razão das pressões operacionais e de vapor nos lotes do duto
$\bar{\varepsilon}$	rugosidade absoluta do duto
$\rho_p$	densidade do produto $p$
$\bar{\eta}$	rendimento das estações de bombeamento do duto a uma dada vazão
$\mu_p$	viscosidade dinâmica do produto $p$
$\zeta_p$	viscosidade cinemática do produto $p$

#### *Variáveis Binárias*

$NS_{n,ep,k}$	1 se a estação $ep$ do duto utiliza $n$ estágios de bombeamento no intervalo de tempo $k$
---------------	---

#### *Variáveis Contínuas*

$f_{l,k}$	fator de atrito referente ao lote $l$ no intervalo de tempo $k$
$lwf_{l,k}$	perda de carga por atrito no lote $l$ no intervalo de tempo $k$
$\overline{lwf}_{l,k}$	perda de carga no lote $l$ no intervalo de tempo $k$ a uma determinada vazão
$P_{l,k}$	pressão absoluta no lote $l$ no intervalo de tempo $k$
$P_{ep,k}^{DISC}$	pressão absoluta na descarga da estação $ep$ no intervalo de tempo $k$
$PW_{ep,k}$	potência útil das bombas da estação $ep$ no intervalo de tempo $k$

$v_k$  velocidade dos produtos no duto no intervalo de tempo  $k$

## 9.5. Formulações com aspectos hidráulicos

### 9.5.1. Formulação MINLP

A formulação MINLP é baseada naquela desenvolvida e descrita no capítulo 7, ou seja, utiliza a representação contínua do tempo com as restrições referentes ao problema de *scheduling* de operações dutoviárias. As principais diferenças desta formulação consistem no termo que representa o custo unitário de bombeamento e na inclusão das restrições hidráulicas.

#### 9.5.1.1. Função objetivo

A função objetivo deste modelo é dada pela equação (9.1).

$$\begin{aligned} \text{Min } C = & \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{p=1}^P CER_p VR_{p,k} + \sum_{p=1}^P CED_p VD_{p,k} \right] \Delta_k \\ & + \sum_{ep=1}^{EP} \sum_{k=1}^K CP_k \cdot \frac{PW_{ep,k}}{\eta_k} \Delta_k + \sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P \sum_{k=1}^K CONTACT_{p,p'} TY_{p,p',k} \end{aligned} \quad (9.1)$$

O termo em colchetes representa os custos de estocagem e é igual ao da função objetivo da formulação mostrada no capítulo 7. A sua primeira parcela representa o custo de estocagem na refinaria, enquanto a segunda o contabiliza na base. O custo de bombeamento é considerado no segundo termo da equação (9.1), cujo coeficiente é  $CP_k$ . Note que este termo difere dos custos de bombeamento das funções objetivo dos problemas de *scheduling*. Este termo é composto pelo produto entre a duração do intervalo de tempo, a razão entre a potência consumida pelas estações de bombeamento dos segmentos do duto e os rendimentos dos seus estágios e pelo custo unitário de bombeamento, que possui unidades de custo por potência consumida e por unidade de tempo<sup>14</sup>. Cabe ressaltar que as estações de bombeamento do sistema OSBRA da Petrobras são operadas com energia elétrica que é fornecida por companhias locais, as quais determinam o seu custo unitário. O último termo refere-se aos custos de interfaces formadas dentro do duto, sendo composto pelo produto entre o parâmetro de contaminação entre os produtos  $p$  e  $p'$  e a variável de detecção de interfaces.

<sup>14</sup> No Brasil, os custos unitários de bombeamento possuem unidades de [R\$/kWh].



### 9.5.1.2. Restrições temporais e da refinaria

A refinaria envia alguns dos seus produtos para os tanques que são dedicados ao duto em lotes de produção ( $i$ ) com datas pré-determinadas. As restrições temporais devem respeitar o horizonte de tempo fixado ( $H$ ), de acordo com a restrição (7.2), enquanto os instantes iniciais e finais do carregamento dos tanques são dados respectivamente pelas equações (7.3) e (7.4).

$$\sum_{k=1}^K \Delta_k = H \quad (7.2)$$

$$\sum_{k \leq k_i} \Delta_k = T_i \quad \forall i \quad (7.3)$$

$$\sum_{k \leq k_f} \Delta_k = T_f \quad \forall i \quad (7.4)$$

O balanço nos tanques da refinaria é dado em base volumétrica pela equação (7.5), enquanto os seus limites mínimos e máximos são dados pela restrição (4.3). Finalmente, os descarregamentos da refinaria para o duto seguem a equação (4.4), que é dada pela variável binária  $XR_{p,k}$  e pelo parâmetro volumétrico  $U$ .

$$VR_{p,k} = VRZERO_p + \sum_{i=1}^I \sum_{k' \leq k} (RP_{p,i,k'} \times \Delta_{k'} - VOR_{p,k'}) \quad \forall p, k \quad (7.5)$$

$$VRMIN_{p,k} \leq VR_{p,k} \leq VRMAX_{p,k} \quad \forall p, k \quad (4.3)$$

$$VOR_{p,k} = XR_{p,k} \times U \quad \forall p, k \quad (4.4)$$

### 9.5.1.3. Restrições de scheduling do duto

As restrições referentes ao problema de *scheduling* de sistemas dutoviários são mostradas pela disjunção (9.2) para o primeiro segmento e para todos os intervalos de tempo, com exceção do inicial.

$$\left[ \begin{array}{l} Y_k \\ XV_{p,l,k} = XR_{p,k} \\ XV_{p,l,k} = XV_{p,l-1,k-1} \\ XD_{p,k} = XV_{p,L,k-1} \\ \Delta_k = U / (v_k \cdot A) \\ v^{LO} \leq v_k \leq v^{UP} \end{array} \quad \forall p, l = 1 \\ \forall p, l = 2, \dots, L \\ \forall p \\ \forall k = 2, \dots, K \right] \vee \left[ \begin{array}{l} \neg Y_k \\ XV_{p,l,k} = XV_{p,l,k-1} \\ XV_{p,l,k} = XV_{p,l,k-1} \\ XD_{p,k} = 0 \\ \Delta_{STOP}^{LO} \leq \Delta_k \leq \Delta_{STOP}^{UP} \\ v_k = 0 \end{array} \quad \forall p, l = 1 \\ \forall p, l = 2, \dots, L \\ \forall p \\ \forall k = 2, \dots, K \right] \quad (9.2)$$

A variável Booleana  $Y_k$  controla a operação do duto e esta é transformada em variável mista inteira, denotada por  $XS_k$ . A idéia central desta formulação é a de mostrar o transporte de múltiplos produtos ao longo de um sistema dutoviário através de variáveis lógicas 0-1  $XV_{p,l,k}$ . No presente caso, se o duto for ativado no intervalo de tempo  $k$  (variável Booleana  $Y_k$ ), o produto que se encontra inicialmente no lote  $l$  é transferido para o lote subsequente, enquanto o produto que se encontra no último lote deve ser enviado para a respectiva base. No caso de o duto permanecer ocioso, a variável Booleana  $Y_k$  é falsa e todos os produtos permanecem nos lotes; além disso, não há alimentação na base de distribuição.

Os dois últimos termos da disjunção referem-se à duração dos intervalos de tempo e dos limites de velocidade dos fluidos dentro da linha dutoviária. Analogamente à formulação do capítulo 7, a variável de duração dos intervalos de tempo ( $\Delta_k$ ) é desagregada em duas parcelas, segundo a formulação *Convex-hull* (Raman e Grossmann, 1994). A primeira ( $\Delta_k^1$ ) considera a duração dos mesmos quando o duto está ativado e a segunda ( $\Delta_k^2$ ) refere-se às durações dos intervalos em que o duto permanece ocioso. Cabe ressaltar que nesta formulação, diferentemente da desenvolvida no capítulo 7, a vazão operacional expressa na disjunção (9.2) pela velocidade dos fluidos e pela área transversal do duto deve ser explicitamente declarada por estar presente nas restrições relativas às considerações hidráulicas. Desta forma, a restrição (7.9) é substituída pela (9.3). O segundo termo adicional da disjunção é dado pela restrição (9.4). As restrições temporais são dadas a seguir na sua forma mista inteira.

$$\Delta_k = \Delta_k^1 + \Delta_k^2 \quad \forall k \quad (7.8)$$

$$\Delta_k^1 \cdot (v_k \cdot A) = U \quad \forall k \quad (9.3)$$

$$v^{LO} \cdot XS_k \leq v_k \leq v^{UP} \cdot XS_k \quad \forall k \quad (9.4)$$

$$\Delta_{STOP}^{LO} \cdot [1 - XS_k] \leq \Delta_k^2 \leq \left\{ H - \left[ (K-1) \cdot \left( \min \left( \Delta_{STOP}^{LO}, \frac{U}{Q^{UP}} \right) \right) \right] \right\} \cdot [1 - XS_k] \quad \forall k \quad (7.10)$$

A velocidade de transporte dos produtos que se encontram no duto ( $v_k$ ) toma valores dentro dos seus limites operacionais se o mesmo é acionado no intervalo de tempo  $k$ . No caso de ociosidade do sistema, os produtos permanecem parados, ou seja, a variável  $v_k$  é igual a zero.

As restrições de detecção de interface são dadas por (4.27) e (4.28) e pela variável lógica 0-1  $TY_{p,p',k}$ . As formulações com considerações hidráulicas contêm ainda as restrições especiais propostas no capítulo 5, que impõem a operação dos segmentos do duto sempre que uma interface é detectada, segundo as restrições (5.2), (5.3) e (5.5).

$$TY_{p,p',k} \geq XV_{p,1,k} + XV_{p',2,k} - 1 \quad \forall p, p' \in TS_{p,p}, \forall k \quad (4.27)$$

$$TY_{p,p',k} = 0 \quad \forall p, p' \in FS_{p,p}, \forall k \quad (4.28)$$

$$\sum_{k'=k+1}^{k+L-1} XS_{k'} \geq \sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P TY_{p,p',k} \cdot [L-1] \quad \forall k \leq K-L+1 \quad (5.2)$$

$$\sum_{k'=k+1}^K XS_{k'} \geq \sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P TY_{p,p',k} \cdot [K-k] \quad \forall K-L+1 < k < K \quad (5.4)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P TINI_{p,p',l} \cdot [L-l] \leq \sum_{k \leq L-l} XS_k \quad \forall l \leq L \quad (5.7)$$

Os cortes inteiros determinam limites mínimos válidos para o número de vezes em que a base deve se conectar ao duto para retirar o produto  $p$  pela restrição (5.7), segundo o parâmetro  $XDMIN_p$ . A restrição (9.5) impõe valores mínimos válidos para o número de vezes em que os segmentos do duto devem ser acionados ao longo do horizonte de tempo. Note que a variável  $XW_{p,d,k}$  toma valores iguais a zero para sistemas dutoviários compostos por uma base de distribuição.

$$\sum_{k=1}^K XD_{p,k} \geq XDMIN_p \quad \forall p \quad (9.5)$$

$$\sum_{k=1}^K XS_k \geq \max_r \{ XSMIN_r \} \quad (5.21)$$

#### 9.5.1.4. Restrições da base de distribuição

A base de distribuição possui as mesmas restrições em relação à formulação mostrada no capítulo 7. Os balanços nos seus tanques são definidos para cada produto  $p$ , segundo a restrição (4.29). Os limites mínimos e máximos dados para a tancagem nas bases de distribuição são dados pela restrição (4.30). A base é alimentada pelo duto segundo a restrição (4.22), segundo a variável  $XD_{p,k}$  e o parâmetro volumétrico  $U$ . O envio de produtos para os mercados consumidores é representado pela variável  $VOM_{p,k}$ , como mostra a restrição (7.7). As demandas para cada produto devem ser exatamente atendidas em todos os mercados consumidores ao final do horizonte de tempo, segundo a equação (4.32).

$$VD_{p,k} = VDZERO_p + \sum_{k' \leq k} (VOD_{p,k'} - VOM_{p,k'}) \quad \forall p, k \quad (4.29)$$

$$VDMIN_{p,k} \leq VD_{p,k} \leq VDMAX_{p,k} \quad \forall p, k \quad (4.30)$$

$$VOD_{p,k} = XD_{p,k} \cdot U \quad \forall p, k \quad (4.22)$$

$$VOM_{p,k} \leq UM_{p,k} \cdot \Delta_k \quad \forall p, k \quad (7.7)$$

$$\sum_{k=1}^K VOM_{p,k} = DEM_p \quad \forall p, k \quad (4.32)$$

#### 9.5.1.5. Restrições hidráulicas do duto

Os principais objetivos de formulações que consideram os aspectos hidráulicos de sistemas dutoviários é o de contabilizar o balanço de energia nos mesmos, através das seguintes variáveis:

- Potências consumidas pelas estações de bombeamento, e;
- Variações de pressão que os produtos sofrem ao longo da linha dutoviária.

A figura 9.1 ilustra um sistema dutoviário composto por 8 lotes e as principais variáveis do seu perfil do gradiente hidráulico para um dado intervalo de tempo  $k$  quando o duto está em operação. Esta figura também mostra os conjuntos de posicionamento dos lotes em relação às estações de bombeamento do referido sistema.

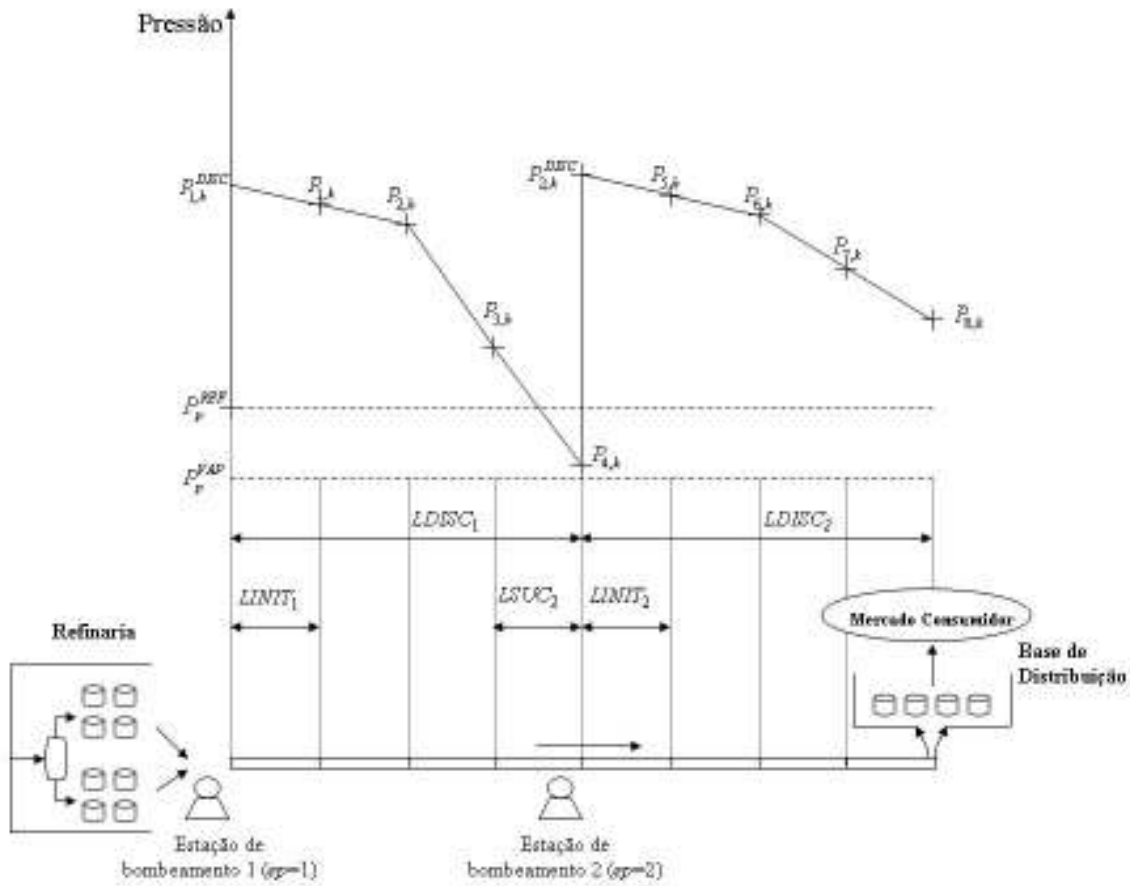


Figura 9.1 – Variáveis referentes ao perfil do gradiente hidráulico de um sistema dutoviário e conjuntos de posicionamento dos lotes em relação às estações de bombeamento

O balanço de energia é aplicado em todos os lotes do sistema dutoviário. As disjunções (9.5) e (9.6) descrevem as restrições hidráulicas para sistemas dutoviários.

$$\left[ \begin{array}{l} Y_k \\ f_{l,k} = f(\zeta_p, \bar{\varepsilon}, Din, v_k) \\ lwf_{l,k} = LEXT_l \cdot f_{l,k} \cdot v_k^2 / 2 \cdot Din \\ \eta_k = c_m \cdot (v_k)^m + c_{m-1} \cdot (v_k)^{m-1} + \dots + c_{m-n} \cdot (v_k)^{m-n} + \dots + c_0 \\ \sum_{n \in ST_{ep}} NS_{n,ep,k} \cdot PW_n^{LO} \leq PW_{ep,k} \leq \sum_{n \in ST_{ep}} NS_{n,ep,k} \cdot PW_n^{UP} \end{array} \right] \forall k \quad \forall ep$$

$$\left[ \begin{array}{l} -Y_k \\ f_{l,k} = g(\rho_p) \\ lwf_{l,k} = 0 \\ \eta_k = \varepsilon \\ PW_{ep,k} = 0 \end{array} \right] \forall l \leq L \quad \forall ep$$

(9.5)

Se o duto é ativado ( $Y_k$  verdadeira), o fator de atrito dos fluidos ( $f_{l,k}$ ) é calculado segundo uma função dependente da viscosidade cinemática dos produtos, da rugosidade relativa do duto, da velocidade dos produtos dentro do duto no intervalo  $k$ , de acordo com o primeiro termo da disjunção (9.5). O fator de atrito, que pode ser calculado segundo as fórmulas de Chen (1979) e Churchill (1977), é determinado segundo uma aproximação numérica a ser apresentada posteriormente.

A perda de carga dos produtos pelo atrito na parede do sistema dutoviário é dada pelo segundo termo da disjunção (9.5). Cabe ressaltar que este termo é calculado para cada lote  $l$  do duto e para qualquer intervalo de tempo  $k$ , sendo função do produto que se encontra no determinado lote  $l$  do segmento  $d$  no intervalo de tempo  $k$ , do fator de atrito dado pela variável  $f_{l,k}$  e da vazão de operação do duto. O diâmetro interno da linha dutoviária e o comprimento total do lote  $l$  compõem a equação do cálculo da perda de carga por atrito como parâmetros.

Esta formulação admite que o rendimento das estações de bombeamento seja função da vazão de operação do sistema dutoviário, de acordo com a formulação mostrada no capítulo 7.

As estações de bombeamento  $ep$  possuem vários estágios conectados em série, que estão disponíveis para a operação do sistema dutoviário com os seus limites mínimos e máximos das potências, segundo a última restrição da disjunção (9.5).

A potência  $PW_{ep,k}$  necessária para que as estações de bombeamento do duto supram as perdas de energia que os produtos sofrem ao longo da linha dutoviária são dadas segundo o balanço de energia, de acordo com a disjunção (9.6).

$$\left[ \begin{array}{l} \left( P_{ep,k}^{DISC} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_p^{REF} \right) - \left( \frac{PW_{ep,k}}{v_k \cdot A} \right) = 0 \quad \forall ep = 1, l \in LINIT_{ep} \\ \left( P_{ep,k}^{DISC} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_{l,k} \right) - \left( \frac{PW_{ep,k}}{v_k \cdot A} \right) = 0 \quad \forall ep > 1, l \in LINIT_{ep} \\ P_{l,k} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_p^{VAP} \cdot \alpha \geq 0 \quad \forall l \leq L \\ P_{l,k} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_p^{REF} \cdot \alpha \geq 0 \quad \forall l = L \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} P_{ep,k}^{DISC} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_p^{REF} \geq 0 \quad \neg Y_k \quad \forall ep = 1, l \in LINIT_{ep} \\ P_{ep,k}^{DISC} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_{l,k} = 0 \quad \forall ep > 1 \\ P_{l,k} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_p^{VAP} \cdot \alpha \geq 0 \quad \forall l \leq L \end{array} \right] \quad \forall k \quad (9.6)$$

O estágio  $n$ , cuja operação é atrelada à variável binária  $NS_{n,ep,k}$ , pode ser ativado no intervalo de tempo  $k$  se o segmento do duto transporta produtos no mesmo intervalo de tempo, ou seja, quando a variável  $XS_k$  toma valores iguais a 1, de acordo com a restrição (9.7). Note que uma estação de bombeamento pode utilizar um ou mais estágios em um intervalo de tempo quando o

duto está ativado, segundo (9.7). A restrição (9.9) impõe que as estações intermediárias que compõem o sistema dutoviário devem acionar os seus estágios quando as suas respectivas antecessoras também forem ativadas. A idéia desta restrição é a de acionar todas as estações de bombeamento do sistema dutoviário quando o mesmo se encontra ativado. A potência da estação de bombeamento  $ep$  do duto no intervalo de tempo  $k$ , dada pela variável  $PW_{ep,k}$ , deve estar dentro da soma dos limites mínimos e máximos ( $PW_n^{LO}$  e  $PW_n^{UP}$ ) de todos os estágios componentes dados pelo conjunto  $ST_{ep}$ , apenas quando o duto estiver ativado, segundo (9.8).

$$\sum_{n \in ST_{ep}} NS_{n,ep,k} = XS_k \quad \forall ep, k \quad (9.7)$$

$$\sum_{n \in ST_{ep}} NS_{n,ep,k} \cdot PW_n^{LO} \leq PW_{ep,k} \leq \sum_{n \in ST_{ep}} NS_{n,ep,k} \cdot PW_n^{UP} \quad \forall ep, k \quad (9.8)$$

$$\sum_{n \in ST_{ep}} NS_{n,ep,k} \geq \sum_{n \in ST_{ep'}} NS_{n,ep',k} \quad \forall ep > ep', k \quad (9.9)$$

O termo de perda de energia por atrito que os produtos sofrem em contato com a parede interna do duto no lote  $l$  do duto no intervalo de tempo  $k$  é dado pela variável  $lwf_{l,k}$ , sendo calculado segundo a restrição (9.10).

$$lwf_{l,k} = \frac{LEXT_l \cdot f_{l,k} \cdot v_k^2}{2 \cdot Din} \quad \forall k \quad (9.10)$$

O fator de atrito  $f_{l,k}$  é dado segundo a restrição (9.11). Para o presente caso, esta variável é calculada segundo uma aproximação polinomial, segundo as referidas restrições. Estas equações calculam o fator de atrito quando o segmento do duto está ativado. Esta restrição é aplicada para o balanço de energia segundo as potências das bombas. Note que esta variável é multiplicada pela velocidade dos fluidos no segmento do duto em (9.10), que incondicionalmente assume valores iguais a zero quando o segmento do duto está desativado fazendo com que a formulação proposta calcule de maneira coerente o balanço de energia do segmento do duto. Esta formulação evita o produto entre as variáveis lógicas  $XS_k$  e  $XV_{p,l,k}$ , que embora permitido devido às mesmas serem definidas como contínuas e não como binárias, não seja recomendável. A bilinearidade

formada por estas variáveis aumenta consideravelmente a dimensão do modelo e o torna de difícil resolução, especialmente quando o duto opera em regime intermitente.

$$f_{l,k} = \sum_p XV_{p,l,k} \cdot a_p \cdot \rho_p \cdot v_k^2 + \sum_p XV_{p,l,k} \cdot b_p \cdot \rho_p \cdot v_k + \sum_p XV_{p,l,k} \cdot c_p \cdot \rho_p \quad \forall l \leq L, k \quad (9.11)$$

O rendimento das estações de bombeamento varia segundo a vazão de operação do duto, segundo a equação (9.12), que segue a mesma idéia da equação (7.11) Note que estas restrições não utilizam os mesmos coeficientes, pois a referente a este capítulo adota uma variação para os rendimentos das estações de bombeamento conforme a velocidade dos fluidos em cada segmento (variável  $v_k$ ), enquanto a do capítulo 7 admite uma variação para a taxa de rendimento conforme a duração do intervalo de tempo quando o duto está em operação (variável  $\Delta_k^1$ ).

De acordo com a equação (9.12), o rendimento das estações no intervalo de tempo  $k$  do duto assume valores dados pelo polinômio quando o duto é ativado e igual a  $\varepsilon$  quando o sistema operacional está ocioso. Note que o custo de bombeamento na função objetivo (9.1) não é afetado, mesmo que o rendimento assuma valores iguais ao parâmetro  $\varepsilon$  quando o duto está ocioso. Quando o sistema dutoviário se encontra sob tal condição as potências consumidas pela estação de bombeamento são iguais a zero. Outra vantagem desta formulação é que divisões por zero na função objetivo são eliminadas.

$$\eta_k = c_m \cdot (v_k)^m + c_{m-1} \cdot (v_k)^{m-1} + \dots + c_{m-n} \cdot (v_k)^{m-n} + \dots + c_0 \cdot XS_k + \varepsilon \cdot (1 - XS_k) \quad \forall ep, k \quad (9.12)$$

O equacionamento dos balanços de energia para o sistema dutoviário é dado segundo as restrições a seguir. Além de respeitar os limites operacionais de cada estágio de bombeamento, as estações devem satisfazer os balanços de energia dados pelas variações de energia potencial dos produtos ao longo da linha dutoviária, além das suas respectivas perdas de cargas em um dado intervalo de tempo  $k$ , de acordo com os termos em (9.6). Cabe ressaltar que nesta formulação os efeitos causados pela variação de energia cinética não são considerados (**H25**).

No presente caso, os balanços de energia são realizados em todos os lotes do duto. Este equacionamento, além de determinar as potências consumidas em cada estação de bombeamento especifica também as pressões ao longo de toda a extensão do segmento do duto. Além disto,



este conjunto de equações também permite a inclusão da restrição que impõe às pressões ao longo do duto valores maiores do que as suas respectivas pressões de vapor.

Um balanço energético global ao longo do duto também pode ser realizado de maneira simplificada, embora o mesmo não garanta que os produtos sempre se encontrem acima das suas respectivas pressões de vapor, uma vez que este equacionamento não considera as variáveis de pressão ao longo do duto. Cabe ressaltar que os produtos que se encontram dentro da linha dutoviária se vaporizam quando as suas respectivas pressões tomam valores inferiores às suas pressões de vapor, causando perdas indesejáveis dos produtos e danificação dos estágios de bombeamento do sistema dutoviário. Desta forma, esta restrição é de suma importância para operações dutoviárias e deve ser levada em consideração.

No caso de o duto permanecer ocioso, as variáveis hidráulicas  $(v_k, PW_{ep,k}$  e  $NS_{n,ep,k})$  tomam valores iguais a zero e o balanço energético é trivialmente satisfeito. Note que mesmo que o duto permaneça ocioso em um intervalo de tempo  $k$ , a pressão na descarga da bomba  $(P_{1,k}^{DISC})$  deve assumir valores tais que as pressões dos produtos que se encontram dentro do duto mantenham-se acima das suas respectivas pressões de vapor. Esta condição decorre devido às variações de energia potencial causada pelas variações no perfil topográfico do sistema dutoviário. A seguir os termos presentes nas disjunções (9.5) e (9.6) são apresentados na sua forma mista inteira.

$$\left( P_{ep,k}^{DISC} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_p^{REF} \right) \cdot (v_k \cdot A) - PW_{ep,k} = 0 \quad \forall l \in LINIT_{ep}, ep=1, k \quad (9.13)$$

$$\left( P_{l,k} - P_{ep,k}^{DISC} \right) + \sum_p XV_{p,l,k} \cdot \rho_p \cdot g \cdot (z_l - z_{REF}) + lwf_{l,k} = 0 \quad \forall l \in LINIT_{ep}, ep=1, k \quad (9.14)$$

$$\left( P_{l,k} - P_{l-1,k} \right) + \sum_p XV_{p,l,k} \cdot \rho_p \cdot g \cdot (z_l - z_{l-1}) + lwf_{l,k} = 0 \quad \forall l \in LDISC_{ep}, l \notin LINIT_{ep}, k \quad (9.15)$$

$$\left( P_{ep,k}^{DISC} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_{l,k} \right) \cdot (v_k \cdot A) - PW_{ep,k} = 0 \quad \forall l \in LSUC_{ep}, ep>1, k \quad (9.16)$$

$$\left( P_{l,k} - P_{ep,k}^{DISC} \right) + \sum_p XV_{p,l,k} \cdot \rho_p \cdot g \cdot (z_l - z_{l-1}) + lwf_{l,k} = 0 \quad \forall l \in LINIT_{ep}, ep>1, k \quad (9.17)$$

$$P_{l,k} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_p^{VAP} \cdot \alpha \geq 0 \quad \forall l < L, k \quad (9.18)$$

$$P_{l,k} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot \left[ \max(P_p^{REF}, P_p^{VAP}) \right] \cdot \alpha \geq 0 \quad \forall l = L, k \quad (9.19)$$

A pressão na descarga da primeira estação de bombeamento, denotada pela variável  $P_{1,k}^{DISC}$ , é determinada segundo a restrição (9.13). Esta variável toma valores que dependem da potência da estação de bombeamento, da vazão operacional do duto, que é dada pelo produto entre a velocidade dos produtos dentro do duto no intervalo de tempo  $k$  ( $v_k$ ) e da área interna transversal do sistema dutoviário ( $A$ ) e da pressão à qual o produto é armazenado na refinaria, segundo o parâmetro  $P_p^{REF}$ . Note que quando o duto permanece ocioso em um dado intervalo de tempo  $k$ , a pressão na descarga da primeira estação de bombeamento deve assumir valores positivos a fim de manter as pressões dos produtos que se encontram dentro da linha dutoviária acima das suas respectivas pressões de vapor.

A partir deste ponto do duto, qualquer produto que esteja sendo bombeado passa a ter uma variação de energia devido às perdas do atrito dos fluidos com as paredes do duto e da variação de energia potencial, que depende da topografia do sistema dutoviário. Esta variação de energia é medida pela sua pressão ao longo do duto ( $P_{l,k}$ ). A pressão ao final do primeiro lote no intervalo de tempo  $k$  ( $P_{1,k}$ ) é então dada pela restrição (9.14). Esta variável depende da pressão na descarga da primeira estação de bombeamento ( $P_{1,k}^{DISC}$ ), assim como da diferença entre as cotas do primeiro lote e da refinaria ( $z_1$  e  $z_{REF}$ ) e das perdas causadas pelo atrito entre os fluidos e a parede do sistema dutoviário, dadas pela variável  $lwfi_{l,k}$ .

As pressões ao final dos lotes que não possuem estação de bombeamento intermediária, ou seja, aqueles que pertencem ao conjunto  $LDISC_{ep}$  e que ao mesmo tempo não pertençam ao conjunto dos primeiros lotes após a descarga das estações de bombeamento,  $LINIT_{ep}$ , são dadas pela restrição (9.15), onde os efeitos da energia potencial, dados pela diferença de cotas entre o lote  $l$  e o seu antecessor são contabilizados, além das perdas causadas pelo atrito dos produtos com a parede do duto, denotadas pela variável  $lwfi_{l,k}$ .

Os produtos ganham energia sob forma de pressão ao adentrar em uma estação de bombeamento intermediária ( $ep > 1$ ). Esta condição é mostrada pela restrição (9.16), que é similar à restrição (9.13). A diferença entre ambas é que a pressão na sucção da estação de bombeamento intermediária é dada pela referida variável  $P_{l,k}$  no lote localizado à sucção desta estação, enquanto em (9.12) a mesma é dada pelo produto formado entre a variável  $XV_{p,l,k}$  e pela pressão de armazenamento do produto  $p$  na refinaria, segundo  $P_p^{REF}$ . A pressão do lote que sucede a um que possua uma estação de bombeamento intermediária, dado pelo conjunto  $LINIT_{ep}$  ( $ep > 1$ ), em um dado intervalo de tempo  $k$  segue a mesma lógica de cálculo da pressão ao final do

primeiro lote, dada pela restrição (9.14). Além de levar em conta a pressão na descarga da estação de bombeamento  $ep$  no intervalo de tempo  $k$ , dada pela variável  $P_{ep,k}^{DISC}$ , a pressão ao final deste lote depende da variação de energia potencial, determinada pela diferença de cotas entre o lote  $l$  e o seu antecessor  $l-1$  ( $z_l$  e  $z_{l-1}$ ) e as perdas de energia devido ao atrito dos produtos ao longo do lote  $l$  no intervalo de tempo  $k$ , segundo a variável  $lwfl_{l,k}$ .

A restrição (9.18) garante que todos os produtos dentro da linha dutoviária possuam pressões acima das suas respectivas pressões de vapor, dadas pelos parâmetros  $P_p^{VAP}$ . Note que este termo é multiplicado por um fator  $\alpha$ , que deve possuir valores maiores do que 1. Este termo também está presente na restrição (9.19), que impõe às pressões ao final do lote  $L$  do duto um valor maior em relação às pressões dos produtos armazenados na base de distribuição. Para o presente caso, admite-se que os mesmos são estocados à mesma pressão que na refinaria.

Desta forma, a formulação MINLP é apresentada para o *scheduling* de sistemas dutoviários com restrições hidráulicas. A seguir, uma versão linear desta formulação MINLP é mostrada, com base na discretização da duração do intervalo de tempo ( $\Delta_k$ ) e da vazão operacional do duto, representada pela variável de velocidade dos produtos ao longo do segmento do duto ( $v_k$ ).

### 9.5.2. Formulação MILP

Esta formulação é baseada na apresentada no item anterior e na proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2004) para o *scheduling* de operações dutoviárias. A formulação a ser apresentada leva em conta todos os aspectos hidráulicos de um duto, admitindo que o mesmo opera em regime intermitente e com valores constantes de vazões e rendimentos das suas estações de bombeamento. Esta hipótese permite que a operação seja representada através de uma formulação MILP, utilizando-se a representação discreta das variáveis tempo e vazão. Em domínio discreto destas variáveis, as quedas de pressão nos lotes do sistema dutoviário dependem apenas dos diferentes seqüenciamentos entre os produtos. Desta forma, o objetivo central desta formulação é o de avaliar como diferentes possibilidades de seqüenciamento entre os produtos envolvidos na operação de transporte a uma dada vazão operacional influenciam o *scheduling* de sistemas dutoviários levando-se em consideração os aspectos hidráulicos.

#### 9.5.2.1. Função objetivo

A função objetivo do modelo MILP é dada pela equação (9.20).

$$\begin{aligned} \text{Min } C = & \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{p=1}^P CER_p \cdot VR_{p,k} + \sum_{p=1}^P CED_p \cdot VD_{p,k} \right] \cdot \delta \\ & + \sum_{ep=1}^{EP} \sum_{k=1}^K CP_k \cdot \frac{PW_{ep,k}}{\eta} \cdot \delta + \sum_{p=1}^P \sum_{p'=1}^P \sum_{k=1}^K CONTACT_{p,p'} \cdot TY_{p,p',k} \end{aligned} \quad (9.20)$$

A função objetivo (9.20) é linear, pois considera o parâmetro  $\delta$  em lugar da variável  $\Delta_k$ , fazendo com que as durações dos intervalos de tempo sejam fixas. Conseqüentemente, a vazão operacional do sistema dutoviário, dada pela velocidade dos produtos dentro dos segmentos ( $v_k$ ), torna-se constante nesta formulação devido aos volumes fixos dos lotes para cada segmento. Desta forma, as restrições que relacionam as variáveis temporais e as vazões dos segmentos dutoviários dadas por (7.8), (9.3), (9.4) e (7.10) devem ser removidas desta formulação por serem satisfeitas de acordo com a discretização das variáveis de duração dos intervalos de tempo e de vazão. Adicionalmente, as estações de bombeamento do duto passam a operar com rendimentos constantes e a variável  $\eta_k$  deve ser substituída pelo parâmetro  $\bar{\eta}$  e desta forma, a restrição (9.12) deve ser calculada a priori, pois as variáveis  $v_k$  devem ser substituídas pelo quociente entre os parâmetros  $U$  e  $\delta$ . Note que os custos operacionais dados pela equação (9.20) não são afetados mesmo que este parâmetro assumira valores constantes ao longo da operação, pois sempre que o duto permanece ocioso a variável de potência utilizada pelas estações de bombeamento  $PW_{ep,k}$  é igual a zero, conforme é mostrado a seguir. Os demais termos da função objetivo dados em (9.20), que contabilizam os custos de estocagem e os de interface, permanecem inalterados em relação à equação (4.1).

#### 9.5.2.2. Restrições de scheduling do duto

As restrições de *scheduling* do sistema dutoviário são as mesmas em relação às propostas por Rejowski Jr. e Pinto (2004), apresentadas no capítulo 4. Desta forma, as restrições de *scheduling* são dadas pelas restrições (4.9) a (4.28), (5.3), (5.4), (5.6), (5.7) e pelos cortes inteiros dados pelas restrições (5.9) e (5.23). Note que a formulação MILP deve satisfazer trivialmente as restrições de temporização, dadas por (7.2), (7.3) e (7.4) relativas aos carregamentos e descarregamentos dos tanques da refinaria para a linha dutoviária, com a premissa de que o intervalo de discretização da variável tempo seja um máximo divisor comum entre os volumes do lotes do segmento e dos enviados pela refinaria aos seus tanques.

A seguir, as restrições relativas aos aspectos hidráulicos apresentadas anteriormente neste capítulo são apresentadas na sua versão linear.

### 9.5.2.3. Restrições hidráulicas do duto

As restrições referentes aos aspectos hidráulicos do sistema dutoviário são similares às mesmas mostradas pela disjunção (9.6), dada a seguir.

$$\left[ \begin{array}{l} \sum_{n \in ST_{ep}} NS_{n,ep,k} \cdot PW_n^{LO} \leq PW_{ep,k} \leq \sum_{n \in ST_{ep}} NS_{n,ep,k} \cdot PW_n^{UP} \quad \forall ep \\ \left( P_{\varphi,k}^{DISC} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_p^{REF} \right) - \left( \frac{PW_{ep,k}}{U/\delta} \right) = 0 \quad \forall ep = 1, l \in LINIT_{ep} \\ \left( P_{\varphi,k}^{DISC} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_{l,k} \right) - \left( \frac{PW_{ep,k}}{U/\delta} \right) = 0 \quad \forall ep > 1, l \in LSUC_{ep} \\ P_{l,k} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_p^{VAP} \cdot \alpha \geq 0 \quad \forall l < L \\ P_{l,k} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_p^{REF} \cdot \alpha \geq 0 \quad \forall l = L \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} PW_{ep,k} = 0 \\ P_{\varphi,k}^{DISC} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_p^{REF} \geq 0 \\ P_{\varphi,k}^{DISC} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_{l,k} = 0 \\ P_{l,k} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_p^{VAP} \cdot \alpha \geq 0 \end{array} \right] \rightarrow Y_k \quad \forall k \quad (9.21)$$

No caso de o duto  $d$  estar em operação no intervalo de tempo  $k$  ( $Y_k$  verdadeira), as estações de bombeamento  $ep$  devem operar com potências dentro dos seus limites operacionais, dados por  $PW_n^{LO}$  e  $PW_n^{UP}$ , de acordo com o número de estágios que é acionado. A pressão na descarga da primeira bomba do segmento do duto, dada pela variável  $P_{1,k}^{DISC}$ , depende da pressão que os produtos são estocados na refinaria ( $P_p^{REF}$ ), da vazão de operação do duto, que para esta formulação é constante e é dada pelo quociente dos parâmetros  $U$  e  $\delta$ , que representam respectivamente o volume dos lotes do duto e a duração dos intervalos de tempo. O penúltimo termo da disjunção (9.21) define que todos os produtos dentro do sistema dutoviário devem possuir pressões acima dos seus respectivos valores de pressão de vapor. O último termo impõe que qualquer produto que esteja contido no lote  $L$  da linha dutoviária deve possuir uma pressão maior do que a do tanque de estocagem localizado na base de distribuição. Da mesma forma que a formulação não linear mostrada anteriormente neste capítulo, adota-se que os derivados são estocados nos tanques da base de distribuição à mesma pressão dos tanques da refinaria.

No caso de o duto permanecer ocioso, as variáveis hidráulicas ( $PW_{ep,k}$  e  $NS_{n,ep,k}$ ) tomam valores iguais a zero e o balanço energético do sistema dutoviário é naturalmente satisfeito. A seguir, os termos presentes na disjunção (9.21) são representados na sua forma mista-inteira.

O sistema dutoviário pode operar com  $n$  estágios, de acordo com a restrição (9.7). A variável binária  $NS_{n,ep,k}$  indica quantos estágios a estação  $ep$  utiliza no intervalo de tempo  $k$  e é somente

ativada quando o segmento do duto está operante no mesmo intervalo de tempo  $k$ , segundo a restrição (9.7).

A potência da estação de bombeamento  $ep$  do segmento  $d$  no intervalo de tempo  $k$ , segundo a variável  $(PW_{ep,k}^d)$ , deve respeitar a soma dos limites mínimos e máximos  $(PW_n^{LO}$  e  $PW_n^{UP})$  de todos os seus estágios, de acordo com o conjunto  $ST_{ep}$ , somente se o segmento do duto estiver operante, de acordo com (9.8). Adicionalmente, a restrição (9.9) impõe que as estações intermediárias pertencentes ao sistema dutoviário devem ter os seus estágios acionados uma vez que as suas respectivas antecessoras também foram ativadas. O objetivo desta restrição é o de acionar todas as estações de bombeamento do sistema dutoviário quando o mesmo se encontra ativado.

$$\sum_{n \in ST_{ep}} NS_{n,ep,k} = XS_k \quad \forall ep, k \quad (9.7)$$

$$\sum_{n \in ST_{ep}} NS_{n,ep,k} \cdot PW_n^{LO} \leq PW_{ep,k} \leq \sum_{n \in ST_{ep}} NS_{n,ep,k} \cdot PW_n^{UP} \quad \forall ep, k \quad (9.8)$$

$$\sum_{n \in ST_{ep}} NS_{n,ep,k} \geq \sum_{n \in ST_{ep'}} NS_{n,ep',k} \quad \forall ep > ep', k \quad (9.9)$$

A perda de carga dos produtos, representada pela variável  $\overline{lwf}_{l,k}$ , é calculada segundo as restrições (9.22) e (9.23). A restrição impõe valores limites superiores para a variável  $\overline{lwf}_{l,k}$  quando o duto é ativado no intervalo de tempo, segundo a variável  $XS_k$ .

$$\overline{lwf}_{l,k} \leq M \cdot XS_k \quad \forall p, l \leq L, k \quad (9.22)$$

$$-M \cdot [1 - XS_k] \leq \overline{lwf}_{l,k} - \sum_{p=1}^P \left[ XV_{p,l,k} \cdot \bar{f}_p \cdot \frac{LEXT_l}{2Din} \cdot \left( \frac{U}{A\delta} \right)^2 \right] \leq M \cdot [1 - XS_k] \quad \forall p, l \leq L, k \quad (9.23)$$

O fator de atrito para escoamento de fluidos incompressíveis em regime turbulento, denotado pelo parâmetro  $\bar{f}_p$ , é calculado segundo uma equação similar à proposta por Churchill (1977) dada em (9.24).

$$\bar{f}_p = \frac{\rho_p}{\left( -2 \log \left( \frac{\bar{\varepsilon}}{3,7065 \cdot Din} \right) - \frac{5,0452}{Re_p} \cdot \log \left( \frac{\left( \frac{\bar{\varepsilon}}{Din} \right)^{1,1098}}{2,8257} \right) + \left( \frac{5,8506}{Re_p} \right)^{0,8981} \right)^2} \quad \forall p \quad (9.24)$$

A equação do fator de atrito, segundo Churchill (1977), depende da rugosidade absoluta da parede do duto ( $\bar{\varepsilon}$ ), do diâmetro interno do segmento do duto  $d$  ( $Din$ ) e do número de Reynolds, dado pela velocidade dos produtos no interior do duto, pelas suas viscosidades cinemáticas e pelo diâmetro interno do duto, conforme a equação (9.25). As viscosidades cinemáticas dos produtos são definidas como a razão entre as suas respectivas viscosidades dinâmicas e densidades, segundo (9.26).

$$Re_p = \frac{\left( \frac{U}{A \cdot \delta} \right) \cdot Din}{\zeta_p} \quad \forall p \quad (9.25)$$

$$\zeta_p = \frac{\mu_p}{\rho_p} \quad \forall p \quad (9.26)$$

A pressão ao final do primeiro lote após a descarga da bomba depende da pressão deste último ponto, das variações de energia potencial, dadas pela diferença entre cotas entre o primeiro lote ( $z_1$ ) e a refinaria ( $z_{REF}$ ) e pelas perdas de energia causadas pelo atrito entre os produtos e a parede interna do sistema dutoviário, dada pela variável  $\overline{lwf}_{l,k}$ . A partir da descarga deste ponto, a variação das pressões dentro do duto depende das pressões nos seus respectivos lotes antecessores, das variações de energia potencial e das perdas de carga dos produtos por atrito com a parede do duto, dadas pela variável  $\overline{lwf}_{l,k}$ . Note que nesta formulação, as perdas de carga dependem exclusivamente das diferentes propriedades físico-químicas dos produtos, devido ao sistema dutoviário operar com vazão constante. Desta forma, a variável  $f_{l,k}$  é substituída pelo parâmetro  $\bar{f}_p$ .

A pressão na descarga da primeira estação de bombeamento, dada pela variável ( $P_{1,k}^{DISC}$ ), é determinada segundo a restrição (9.27). Esta variável depende da potência da estação de bombeamento, da vazão operacional do duto, que é fixa e dada pelo quociente entre o volume dos lotes do duto ( $U$ ) e da duração dos intervalos de tempo ( $\delta$ ) e da pressão de estocagem na refinaria, segundo o parâmetro  $P_p^{REF}$ . Note que este parâmetro deve ser multiplicado pela variável  $XV_{p,1,k}$  para levar em conta a pressão do produto que é bombeado para o duto no intervalo de tempo  $k$ . O último termo da restrição (9.27) é composto pela multiplicação entre o valor máximo referente ao parâmetro  $P_p^{SAFE}$  entre os produtos a serem transportados e um outro termo que depende da variável  $XS_k$ . Este termo é responsável por manter as pressões dentro da linha dutoviária acima dos valores das pressões de vapor de qualquer produto que esteja dentro do sistema. Mesmo quando o sistema permanece ocioso, os produtos podem vaporizar devido às possíveis perdas de energia potencial impostas pelo perfil topográfico do mesmo. Desta forma, quando o duto não é ativado em um dado intervalo de tempo  $k$ , a pressão na descarga da primeira estação de bombeamento deve assumir valores tais que as pressões dos produtos dentro da linha dutoviária permaneçam acima das suas respectivas pressões de vapor. Note que a formulação MINLP apresentada anteriormente dispensa a utilização do termo  $P_p^{SAFE}$  para satisfazer o balanço energético no sistema dutoviário quando o mesmo se encontra desativado em um dado intervalo de tempo  $k$ . Este parâmetro pode tomar valores iguais a zero quando a diferença entre a menor pressão de armazenamento entre todos os produtos na refinaria e a maior pressão de vapor entre todos os produtos for maior do que as eventuais perdas de energia potencial impostas pelo perfil topográfico do sistema dutoviário. De acordo com a restrição (9.27), quando o sistema dutoviário se encontra ocioso, as suas potências devem ser iguais a zero, segundo a variável  $PW_{ep,k}$ . Na formulação MINLP, a variável de velocidade dos fluidos dos produtos dentro do duto ( $v_k$ ) automaticamente toma valores iguais a zero sob esta condição operacional. Desta forma, a pressão na descarga das bombas pode tomar valores que satisfaçam todas as outras restrições referentes ao balanço de energia do sistema dutoviário. Nesta formulação, a velocidade dos produtos dentro do duto é dada pela razão entre os parâmetros positivos não nulos referentes ao volume dos lotes,  $U$ , e pela duração dos intervalos de tempo,  $\delta$ . Desta forma, a fim de satisfazer a restrição (9.27) na ausência do último termo em uma condição de parada do sistema dutoviário, a variável de descarga da primeira estação de bombeamento deve tomar valores iguais à pressão do



de armazenamento na refinaria do produto que se encontra no primeiro lote. Este valor pode ser insuficiente para a manutenção das pressões acima das suas respectivas pressões de vapor em função das perdas de energia potencial impostas pelo relevo do sistema dutoviário. Finalmente, o parâmetro  $P_p^{SAFE}$  deve assumir valores maiores do que zero a fim de satisfazer o balanço de energia dentro do sistema dutoviário quando o mesmo se encontra ocioso.

$$\left( P_{ep,k}^{DISC} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_p^{REF} \right) \cdot (U / \delta) - PW_{ep,k} - \left[ \left( \max_p (P_p^{SAFE}) \right) \cdot (1 - XS_k) \right] = 0 \quad \forall l \in LINIT_{ep}, ep=1, k \quad (9.27)$$

A restrição (9.28) contabiliza a pressão de qualquer produto dentro do lote pertencente ao conjunto  $LINIT_1$ . Esta varia de acordo com as perdas do atrito dos fluidos com as paredes do duto e dos ganhos e/ou perdas de energia potencial, dadas pela diferença entre as cotas do primeiro lote e da refinaria ( $z_1$  e  $z_{REF}$ ). A pressão na descarga da primeira estação de bombeamento ( $P_{1,k}^{DISC}$ ) também influencia a pressão de qualquer produto dentro do primeiro lote. Cabe ressaltar que tal restrição contabiliza o termo de variação de energia potencial na variação da pressão de um lote para o seu subsequente, independentemente da condição operacional do segmento do duto. Note que este termo leva em consideração a variável  $XV_{p,l,k}$ , cuja soma em relação aos produtos sempre assume valores iguais a 1, sob qualquer condição operacional do sistema dutoviário. No entanto, as perdas de carga relativas ao produto que se encontra no lote  $l$  somente são consideradas quando o duto se encontra operacional no mesmo intervalo de tempo, segundo a variável  $\overline{lwf}_{l,k}$ .

$$P_{l,k} = P_{ep,k}^{DISC} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot \rho_p \cdot g \cdot (z_l - z_{REF}) - \overline{lwf}_{l,k} \quad \forall l \in LINIT_{ep}, l=1, ep=1, k \quad (9.28)$$

As pressões ao final dos lotes que não possuem estação de bombeamento, pertencentes ao conjunto  $LDISC_{ep}$  e não-pertencentes ao conjunto  $LINIT_{ep}$ , são dadas pela restrição (9.29), onde somente os efeitos da energia potencial, dados pela diferença de cotas entre o lote  $l$  e o seu antecessor são considerados, além das perdas causadas pelo atrito dos produtos com a parede do duto. Esta restrição possui a mesma lógica de funcionamento em relação à restrição (9.28), ou seja, os termos de energia potencial são sempre considerados, enquanto os de perda de energia

por atrito são contabilizados para o produto que se encontra no lote  $l$  somente quando o duto se encontra em operação no intervalo de tempo  $k$ .

$$P_{l,k} = P_{l-1,k} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot \rho_p \cdot g \cdot (z_l - z_{l-1}) - \overline{lwf}_{l,k} \quad \forall l > 1, l \in LDISC_{ep}, l \notin LINIT_{ep}, k \quad (9.29)$$

Os ganhos de energia dos produtos provenientes de uma estação intermediária de bombeamento em um dado lote pertencente ao conjunto  $LSUC_{ep}$  são dados pela restrição (9.30), que é similar a restrição (9.27). A diferença entre ambas é que a pressão na sucção da estação de bombeamento é dada pela variável  $P_{l,k}$ , ao invés do produto entre a variável  $XV_{p,l,k}$  e a pressão de armazenamento do produto  $p$  na refinaria,  $(P_p^{REF})$ .

$$(P_{ep,k}^{DISC} - P_{l,k}) \cdot (U / \delta) - PW_{ep,k} = 0 \quad \forall l \in LSUC_{ep}, ep > 1, k \quad (9.30)$$

A pressão do lote subsequente a uma estação intermediária de bombeamento é dada por (9.31), segundo o conjunto  $LINIT_{ep}$  ( $ep > 1$ ). A pressão na descarga da bomba, dada pela variável  $P_{ep,k}^{DISC}$ , a variação de energia potencial, dada pela diferença de cotas entre o lote  $l$  e o seu antecessor  $l-1$  ( $z_l$  e  $z_{l-1}$ ) e as perdas de energia devido ao atrito dos produtos ao longo do lote  $l$  no intervalo de tempo  $k$ , segundo a variável  $\overline{lwf}_{l,k}$ , compõem os termos desta restrição.

$$P_{l,k} = P_{ep,k}^{DISC} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot \rho_p \cdot g \cdot (z_l - z_{l-1}) - \overline{lwf}_{l,k} \quad \forall l \in LINIT_{ep}, l=1, ep > 1, k \quad (9.31)$$

A restrição (9.18) impõe que todos os produtos dentro da linha dutoviária devem possuir pressões acima das suas respectivas pressões de vapor, segundo  $P_p^{VAP}$  e um limite inferior  $\alpha$ , cujo valor é maior do que 1. A restrição (9.19) impõe valores maiores do que o valor máximo entre as pressões a que os mesmos são estocados na base de distribuição e as suas respectivas pressões de vapor dentro do último lote  $L$ . Admite-se que os produtos são armazenados à mesma pressão de estocagem da refinaria.

$$P_{l,k} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot P_p^{VAP} \cdot \alpha \geq 0 \quad \forall l < L, k \quad (9.18)$$

$$P_{l,k} - \sum_p XV_{p,l,k} \cdot \left[ \max(P_p^{REF}, P_p^{VAP}) \right] \cdot \alpha \geq 0 \quad \forall l = L, k \quad (9.19)$$

#### 9.5.2.4. Corte de potência

Para a formulação MILP, é apresentado um corte denominado “*Corte de Potência*”. Este corte é baseado na idéia de que a potência das estações de bombeamento do duto deve assumir um limite inferior válido sempre que o respectivo segmento for acionado no intervalo de tempo  $k$ . O Corte de Potência é então descrito pela restrição (9.32).

$$\sum_{ep} PW_{ep,k} \geq V \cdot XS_k \quad \forall k \quad (9.32)$$

Um limite inferior válido para as potências, dado pelo parâmetro  $V$ , é obtido quando se assume que o duto está preenchido pelo produto de menor viscosidade cinemática e que a pressão do mesmo na sucção das estações de bombeamento está a um valor acima da sua pressão de vapor, de acordo com o parâmetro  $\alpha$  nos lotes localizados à sucção da estação de bombeamento  $ep$ , de acordo com o conjunto  $LSUC_{ep}$ . Esta pressão é então propagada aos demais lotes pertencentes ao conjunto  $LDISC_{ep-1}$ . O conjunto do produto de menor viscosidade cinemática é dado pelo conjunto  $VISMIN$ , segundo a expressão em (9.33). Os valores para as potências consumidas pelas estações de bombeamento são calculados pelo parâmetro  $PWAUX_{ep}$ . Assume-se que a pressão à sucção das estações de bombeamento se encontra nos valores limites acima da pressão de vapor do produto que pertence ao conjunto  $VISMIN$ , segundo (9.34). Esta pressão é então propagada para os seus lotes antecessores, de acordo com (9.35), onde os fatores hidráulicos dependem apenas das perdas de carga dos produtos referentes a vazão operacional do sistema dutoviário para os produtos de menor viscosidade e das diferenças entre as cotas dos pontos finais do lote  $l$  e do seu antecessor. As potências consumidas pelas estações são dadas pelo parâmetro  $PWAUX_{ep}$ , de acordo com (9.36) e (9.37), assumindo que a pressão no lote localizado à sua sucção toma os valores de acordo com (9.33), para estações intermediárias de bombeamento. No caso da primeira estação de bombeamento, assume-se que a pressão à sua sucção é igual a pressão de armazenamento na refinaria do produto pertencente ao conjunto

$VISMIN_p$ . O valor do parâmetro  $V$  é calculado segundo a soma das potências das estações de bombeamento do duto, segundo a equação (9.38).

$$VISMIN = \{(p) | \zeta_p = \min(\zeta_p)\} \quad \forall p \quad (9.33)$$

$$PAUX_l = \sum_{p \in VISMIN} P_p^{VAP} \cdot \alpha \quad \forall l \in LSUC_{ep} \quad (9.34)$$

$$PAUX_{l-1} = PAUX_l + \sum_{p \in VISMIN} \rho_p \cdot g \cdot (z_l - z_{l-1}) + \sum_{p \in VISMIN} \bar{f}_p \cdot \frac{LEXT_l}{2 \cdot Din} \cdot \left( \frac{U}{A \cdot \delta} \right)^2 \quad \forall l > 1, l \notin LSUC_{ep}, l \in LDISC_{ep-1}, ep > 1 \quad (9.35)$$

$$PWAUX_{ep} = \left( PAUX_{ep}^{DISC} - \sum_{p \in VISMIN_p} P_p^{REF} \right) \cdot (U / \delta) \quad \forall l \in LINIT_{ep}, ep = 1 \quad (9.36)$$

$$PWAUX_{ep} = \left( PAUX_{ep}^{DISC} - \sum_{l \in LST_{ep}} PAUX_l \right) \cdot (U / \delta) \quad \forall l \in LINIT_{ep}, ep > 1 \quad (9.37)$$

$$V = \sum_{ep} PWAUX_{ep} \quad (9.38)$$

## 9.6. Sumário

Neste capítulo são apresentadas duas novas formulações com considerações hidráulicas para o *scheduling* de sistemas dutoviários compostos por uma refinaria e uma base de distribuição. Esta formulação considera simultaneamente todas as restrições referentes ao problema de *scheduling* de sistemas dutoviários e as referentes ao cálculo hidráulico destes complexos sistemas operacionais. Cabe ressaltar que ambas as formulações apresentadas consideram o cálculo hidráulico de maneira rigorosa através do cálculo do balanço de energia em cada lote do sistema dutoviário.

A primeira formulação é apresentada como um modelo MINLP baseado na representação contínua do tempo proposta no capítulo 7. Este modelo contempla os aspectos hidráulicos do sistema dutoviário como função das variações das vazões ao longo do tempo bem como do rendimento das suas estações de bombeamento e dos seqüenciamentos entre os diversos produtos ao longo do horizonte de tempo operacional.

A segunda formulação é em um modelo MILP que utiliza uma representação discreta em relação às variáveis de vazão e de duração dos intervalos de tempo. Além de fixar estas

variáveis, esta formulação adota que o rendimento das estações de bombeamento seja constante ao longo do horizonte de tempo operacional. Esta formulação ainda considera que os aspectos hidráulicos do sistema dutoviário sejam dependentes exclusivamente dos diferentes seqüenciamentos possíveis entre os diversos produtos a serem bombeados ao longo da operação.

Desta forma, a utilização de 3 formulações é proposta. A primeira é baseada na formulação desenvolvida no capítulo 7, ao passo que a segunda considera a formulação MINLP. Finalmente, a última considera a formulação MILP apresentada neste capítulo. A tabela 9.1 mostra as restrições contempladas por ambos os modelos.

A seguir, estas formulações são aplicadas a sistemas dutoviários compostos por uma refinaria e uma base de distribuição. As formulações propostas são comparadas em termos de qualidade das soluções obtidas e de tempo computacional.

Tabela 9.1 – Restrições das formulações desenvolvidas no capítulo 7 e no capítulo 9

<i>Equações</i>	<i>Formulações</i>		
	MINLP – Capítulo 7	MINLP – Capítulo 9	MILP – Capítulo 9
Função objetivo	(7.1)	(9.1)	(9.20)
Representação do tempo	(7.2), (7.3), (7.4), (7.8), (7.9), (7.10)	(7.2), (7.3), (7.4), (7.8), (9.3), (9.4), (7.10)	
<i>Scheduling</i> – refinaria	(7.5), (4.3), (4.4)	(7.5), (4.3), (4.4)	(4.2), (4.3), (4.4)
<i>Scheduling</i> – duto	(4.9), (4.10), (4.11), (4.12), (4.13), (4.14), (4.20), (4.21), (4.22), (4.27), (4.28), (5.2), (5.3), (5.5), (9.5), (5.21)	(4.9), (4.10), (4.11), (4.12), (4.13), (4.14), (4.20), (4.21), (4.22), (4.27), (4.28), (5.2), (5.3), (5.5), (9.5), (5.21)	(4.9), (4.10), (4.11), (4.12), (4.13), (4.14), (4.20), (4.21), (4.22), (4.27), (4.28), (5.2), (5.3), (5.5), (9.5), (5.21)
<i>Scheduling</i> – depósito	(4.29), (4.30), (7.7), (4.32)	(4.29), (4.30), (7.7), (4.32)	(4.29), (4.30), (4.31), (4.32)
Restrições hidráulicas	(7.11)	(9.7), (9.8), (9.9), (9.10), (9.11), (9.12), (9.13), (9.14), (9.15), (9.16), (9.17), (9.18), (9.19)	(9.7), (9.8), (9.9), (9.18), (9.19), (9.22), (9.23), (9.27), (9.28), (9.29), (9.30), (9.31), (9.32)

## 10. Análise das formulações de *scheduling* de sistemas dutoviários com considerações hidráulicas

### 10.1. Introdução

Este capítulo mostra diversos exemplos que utilizam as formulações propostas no capítulo anterior. Primeiramente, são propostas 2 séries de exemplos, E10.1 e E10.2, que comparam a formulação MINLP com a sua versão linear em termos de qualidade de soluções obtidas, bem como em termos de desempenho computacional. Posteriormente, os exemplos E10.3 verificam como alterações no perfil topográfico do sistema dutoviário podem gerar diferentes soluções para uma mesma operação dutoviária. Finalmente, os exemplos da última série comparam as soluções obtidas pelos exemplos referentes a este capítulo com as formulações desenvolvidas no capítulo 7, que consideram as restrições hidráulicas do sistema dutoviário de maneira simplificada.

O sistema dutoviário considerado por todos os exemplos deste capítulo é composto por uma refinaria, um duto e uma base de distribuição. O duto é discretizado em oito lotes de capacidade volumétrica de 2500 m<sup>3</sup>. Os produtos envolvidos nesta operação são gasolina, óleo diesel, GLP e QAV. A linha dutoviária ainda apresenta duas estações de bombeamento, sendo uma localizada na refinaria e outra ao final do quarto lote, no ponto médio do duto, conforme mostra a figura 10.1.

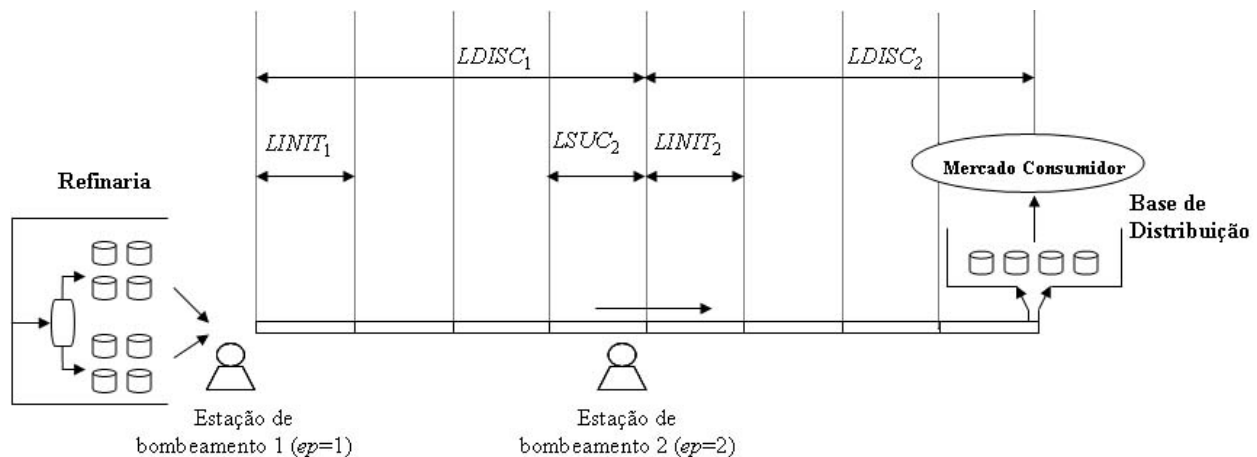


Figura 10.1 – Esquema do duto e das estações de bombeamento

### 10.2. Séries E10.1 e E10.2 – comparação entre a formulação MINLP e a MILP

As figuras 10.2 e 10.3 mostram o perfil de produção da refinaria e o número de intervalos de tempo para as séries E10.1 e E10.2 respectivamente, bem como a sua distribuição ao longo do horizonte de tempo, enquanto a tabela 10.1 ilustra os seus dados.

Os exemplos E10.1D e E10.2D utilizam a formulação linear com representação discreta das variáveis tempo e vazão, enquanto E10.1C e E10.2C utilizam a versão não linear com representação contínua destas variáveis. Os exemplos da série E10.1 representam 100 horas de horizonte de tempo operacional e os da série E10.2 totalizam uma operação de 150 horas do sistema dutoviário. Cabe ressaltar que o exemplo E10.1D possui 20 intervalos de tempo com duração de 5 horas e o duto opera com vazão em regime intermitente de  $500 \text{ m}^3/\text{h}$ , enquanto o exemplo E10.2D é composto por 30 intervalos de tempo com duração de 5 horas, com o sistema dutoviário operando sob a mesma condição do exemplo E10.1D. Os exemplos E10.1C e E10.2C são compostos por 14 e 15 intervalos de tempo, respectivamente. A escolha destes números de intervalos de tempo para os exemplos é baseada na priorização de resultados referentes a operações intermitentes do sistema dutoviário. Desta forma, este número é sempre maior do que o número mínimo de intervalos que o duto deve ser acionado ao longo da operação, dado pelo máximo valor do parâmetro  $XSMIN_r$ . A tabela 10.1 ainda mostra os custos de interface entre produtos, dados pelo parâmetro  $CONTACT_{p,p}$ . Cabe ressaltar que, ao contrário dos exemplos mostrados nos capítulos anteriores, estes levam em consideração a possibilidade da formação da interface entre os produtos GLP e QAV.

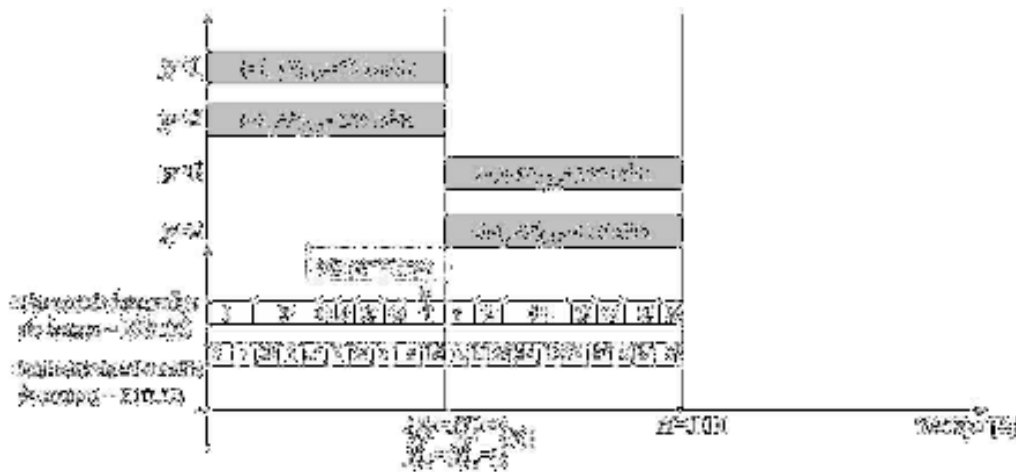


Figura 10.2 – Perfil de produção e número de intervalos de tempo para os exemplos da série E10.1





Figura 10.3 – Perfil de produção e número de intervalos de tempo para os exemplos da série E10.2

Tabela 10.1 – Dados para os exemplos das séries E10.1 e E10.2

<i>Produto</i>	$CER_p$ [\$/m <sup>3</sup> .h]	$CED_p$ [\$/m <sup>3</sup> .h]	$RP_{p,i,k}$ [x10 <sup>-2</sup> m <sup>3</sup> /h]	$CONTACT_{p,p'}$ [x10 <sup>-2</sup> \$]
Gasolina (1)	0,010	0,0240	2,5	(1,2)/(1,3)/(1,4) 100/150/120
Óleo Diesel (2)	0,009	0,0250	2,5	(2,1)/(2,3)/(2,4) 100/150/120
GLP (3)	0,005	0,0240	1,5	(3,1)/(3,2)/(3,4) 150/X/X
QAV (4)	0,007	0,0250	1,5	(4,1)/(4,2)/(4,3) 120/X/X
<i>Produto</i>	$VRZERO_p$ [x10 <sup>-2</sup> m <sup>3</sup> ]	$VDZERO_p$ [x10 <sup>-2</sup> m <sup>3</sup> ]	$XVZERO_{p,l}$	$DEM_p$ [x10 <sup>-2</sup> m <sup>3</sup> ] (E10.1/E10.2)
Gasolina (1)	1000	150	0	170/150
Óleo Diesel (2)	1050	200	$l=1,2,3,4,5,6,7,8$	100/100
GLP (3)	400	200	0	10/110
QAV (4)	700	200	0	50/50

A tabela 10.2 mostra dados relativos às restrições hidráulicas do sistema dutoviário. O perfil topográfico do sistema é dado em relação ao nível do mar. A parede da linha dutoviária é

composta por aço-carbono. Cada lote possui aproximadamente 34,6 km de extensão. A linha do sistema dutoviário é de *Número Schedule*<sup>15</sup> 80 com diâmetro externo de 12 polegadas. O sistema dutoviário é composto por 6 estágios de bombeamento de potências variáveis, sendo 3 destes localizados na primeira estação e 3 localizados na estação intermediária. Finalmente, a tabela 10.2 mostra os coeficientes para as aproximações numéricas para os fatores de atrito de cada produto, utilizadas pela formulação MINLP. Estes coeficientes foram determinados em cálculos à parte aos exemplos propostos. Para tanto, foram levadas em consideração as propriedades físico-químicas de cada produto, um determinado número de pontos operacionais situados entre os limites de vazão do duto e valores para os fatores de atrito calculados segundo a correlação proposta por Churchill (1977).

Tabela 10.2 – Parâmetros referentes às restrições hidráulicas

<i>Cotas dos lotes do sistema dutoviário</i>								
	<i>l=1</i>	<i>l=2</i>	<i>l=3</i>	<i>l=4</i>	<i>l=5</i>	<i>l=6</i>	<i>l=7</i>	<i>l=8</i>
<i>z<sub>l</sub></i> (m)	598	612	623	634	605	576	547	518
<i>Características do sistema dutoviário</i>								
$(\bar{\varepsilon}/Din)$	0,00015	<i>LEXT<sub>l</sub></i> (m)	34648	<i>U</i> (m <sup>3</sup> )	2500	<i>Din</i> (m)	0,2889	
<i>Limites de potência</i>	<i>N=1</i>	<i>n=2</i>	<i>n=3</i>	<i>Limites de velocidade</i>				
<i>PW<sub>n</sub><sup>LO</sup></i> (kW)	500	1500	3000	<i>v<sup>LO</sup></i> (m/s)			1,3978	
<i>PW<sub>n</sub><sup>UP</sup></i> (kW)	1500	3000	4500	<i>v<sup>UP</sup></i> (m/s)			2,1180	
<i>Coeficientes para o cálculo dos fatores de atrito</i>								
<i>Produto</i>	<i>a<sub>p</sub></i>	<i>b<sub>p</sub></i>	<i>c<sub>p</sub></i>					
Gasolina (1)	0,0004686	-0,0026508	0,0160525					
Óleo Diesel (2)	0,0009166	-0,0053903	0,0248931					
GLP (3)	0,0003201	-0,0017469	0,0137053					
QAV (4)	0,0009518	-0,0055862	0,0255079					

<sup>15</sup> A expressão *Número Schedule* de dutos é um padrão referente à espessura da parede de dutos. Existem dutos de *Schedule Número* 40, 60, 80 e 120 e quanto maior este número, maior é a espessura da sua parede e menor é o seu diâmetro interno. Esta expressão não deve ser confundida com *Schedule* de dutos, que se refere à programação de operações destes sistemas.

A figura 10.4 mostra a curva de rendimento em função das velocidades dos fluidos dentro da linha dutoviária que é adotada para os exemplos da série E10.1 e E10.2.

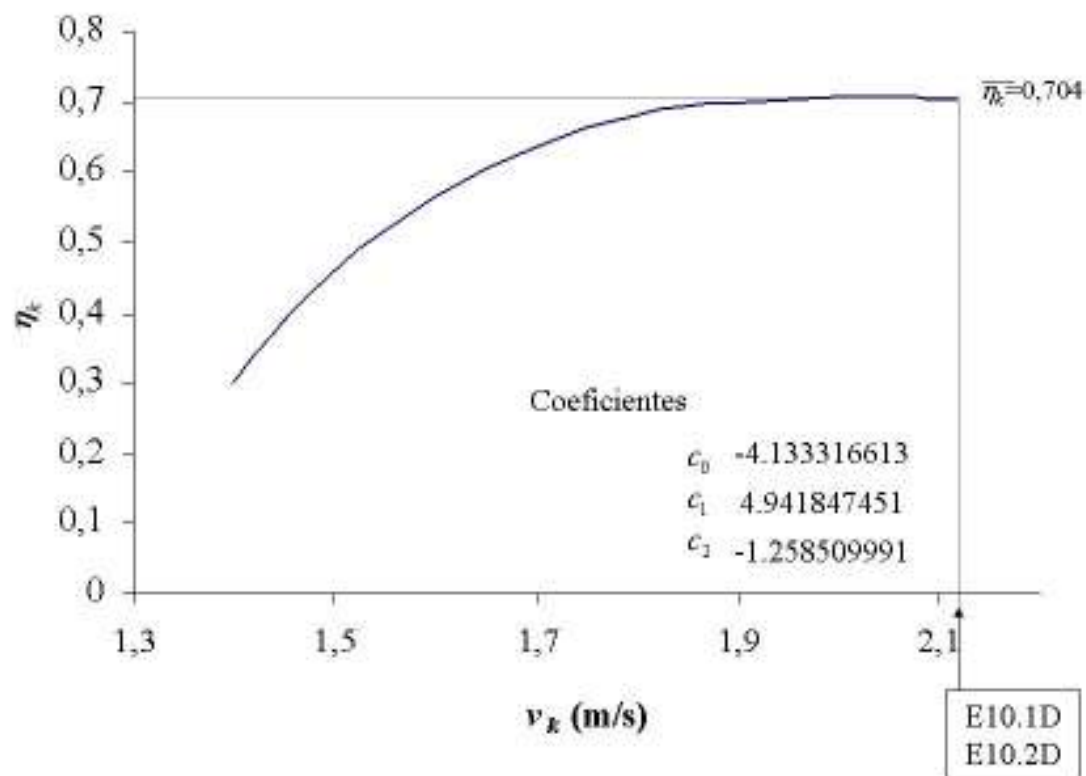


Figura 10.4 – Curva de rendimento referente aos estágios das estações de bombeamento adotada para os exemplos das séries E10.1 e E10.2

Cabe ressaltar que as formulações E10.1D e E10.2D, que utilizam a formulação linear com representação uniforme das variáveis tempo, têm os seus horizontes operacionais discretizados em intervalos de duração de 5 horas cada. Nestes exemplos, os sistemas dutoviários operam em regime intermitente com vazões fixas no seu limite máximo operacional, dada pelo produto entre o parâmetro  $v^{UP}$  e a área transversal interna do segmento dutoviário. Adicionalmente, os rendimentos das estações de bombeamento para os exemplos citados também são constantes ao longo do horizonte de tempo operacional, com valor de 0,704 e destacados na figura 10.4.

Os exemplos E10.1D e E10.2D utilizam o *solver* CPLEX (*ILOG*, 2000), enquanto os exemplos E10.1C e E10.2C usam o *solver* DICOPT++ (Viswanathan e Grossmann, 1990) com o *solver* CONOPT3 (Drud, 1992) para a resolução dos problemas não lineares e CPLEX (*ILOG*, 2000) para os MILP mestres. A tabela 10.3 ilustra os resultados computacionais para as séries E10.1 e E10.2.

Tabela 10.3 – Resultados computacionais para os exemplos E10.1 e E10.2

<i>Exemplos</i>	E10.1D	E10.1C	E10.2D	E10.2C
Solução Relaxada	36284,25	39229,61	27328,64	46333,14
Solução Encontrada	48917,93	39229,61	59826,25	51111,43
<i>Gap</i> (%)	0,00	X	49,80	X
Custos de Bombeamento (%)	69,50	63,25	47,50	38,46
Custos de Interface (%)	21,20	25,49	41,80	48,91
Custos de Estocagem na Refinaria (%)	5,70	6,77	7,30	8,62
Custos de Estocagem nos Depósitos (%)	3,60	4,49	3,40	4,01
Variáveis Binárias	200	140	300	150
Variáveis Contínuas	3107	1481	3747	1587
Tempo Computacional (s)*	1374,41	12,48	43200	62,40

\*Resultados em uma plataforma *Pentium IV* 2.4 GHz 512 Mb RAM

O exemplo E10.1D encontrou a solução ótima do problema quando o duto opera com vazão e rendimento constantes. No caso, o *schedule* encontrado possui um custo operacional de \$48917,93. Para o mesmo problema, o exemplo E10.1C gerou uma seqüência operacional com custo de \$39229,61 (19,8% menor do que E10.1D). Esta diferença se dá principalmente pelos custos de bombeamento. No exemplo E10.1D os custos de bombeamento somam \$33997,96 e no exemplo E10.1C totalizam \$24812,7. Cabe ressaltar que para o exemplo E10.1D, as vazões são fixadas no seu limite superior quando o duto se mostra operacional ( $v^{UP}=2,1180$  m/s), enquanto os intervalos de tempo possuem duração fixa de 5 horas cada. No exemplo E10.1C as vazões assim como a duração dos intervalos de tempo são variáveis. Adicionalmente, as potências consumidas pelas estações de bombeamento no exemplo E10.1D são maiores em relação às do exemplo E10.1C, apesar de no exemplo discreto as estações de bombeamento atuarem no seu ponto de rendimento máximo.

O tempo computacional despendido pelo exemplo E10.1C foi menor em relação ao exemplo E10.1D. No presente caso, o exemplo E10.1C resolveu o problema em aproximadamente 12,5 segundos com 14 intervalos de tempo. Já o exemplo E10.1D, que se utiliza de 20 intervalos de tempo, encontrou a solução ótima do problema em mais de 1300 segundos devido ao maior número de variáveis binárias e contínuas. Note que todos os exemplos que utilizam a formulação MINLP se utilizam de uma estratégia de busca por um ponto inicial que consiste em resolver o problema proposto sem as restrições referentes aos aspectos hidráulicos do sistema. Cabe ressaltar que esta estratégia é fundamental para a obtenção de soluções de boa qualidade para os exemplos mostrados neste capítulo. O tempo computacional mostrado pela tabela 10.3 considera a fração consumida por esta tarefa.

As figuras 10.5 e 10.6 mostram o seqüenciamento dos produtos dentro do sistema dutoviário ao longo do tempo e as potências consumidas pelas estações de bombeamento e os seus rendimentos para o exemplo E10.1C, respectivamente.

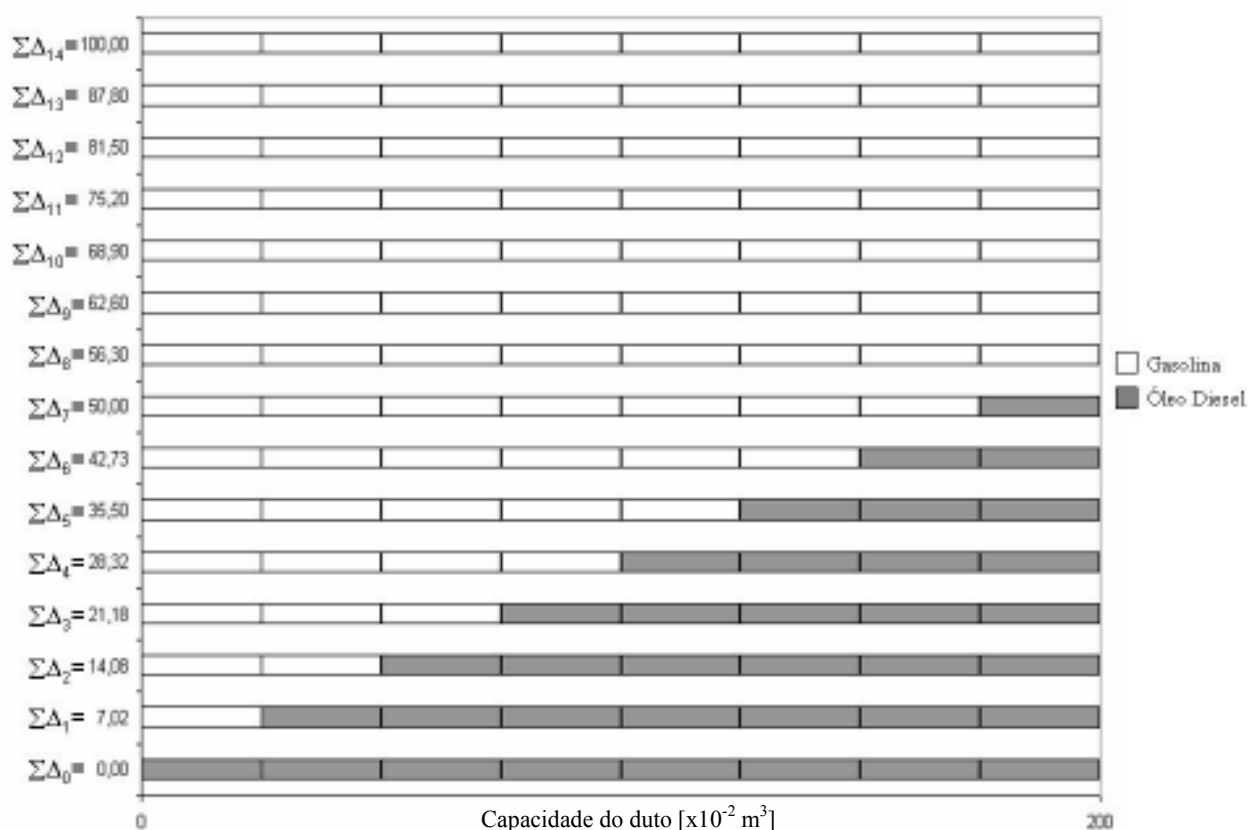


Figura 10.5 – Seqüenciamento dos produtos dentro do duto para o exemplo E10.1C

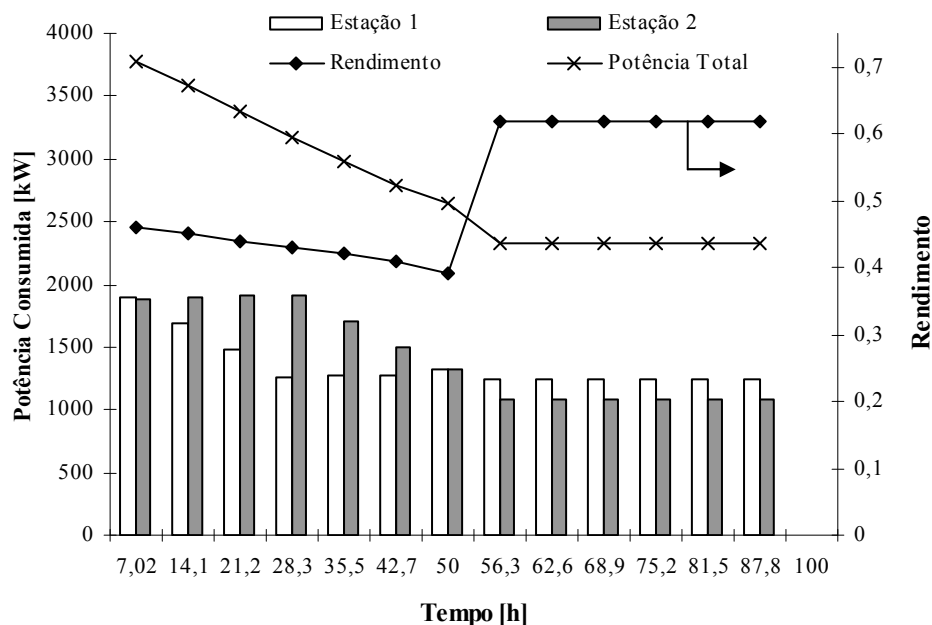


Figura 10.6 – Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento para o exemplo E10.1C

De acordo com a figura 10.5, o duto está inicialmente preenchido com óleo diesel e, do primeiro ao décimo-terceiro intervalos de tempo, a refinaria o alimenta com gasolina a fim de satisfazer as demandas na base de distribuição. Note que as potências consumidas pela primeira estação de bombeamento decrescem progressivamente do primeiro ao quarto intervalo de tempo, conforme os quatro primeiros lotes do duto são preenchidos por gasolina. Isto, pois este produto apresenta viscosidade cinemática menor que a do óleo diesel. Adicionalmente, a potência total consumida pelas estações de bombeamento também decresce ao longo do tempo, conforme a gasolina substitui o óleo diesel contido no sistema dutoviário. A figura 10.6 ainda ilustra que do primeiro ao sétimo intervalo de tempo, os rendimentos das estações de bombeamento variam de 45% a 39%. As potências consumidas pela segunda estação decrescem de forma monotônica do quinto ao oitavo intervalo de tempo. Cabe ressaltar que o quinto intervalo de tempo se caracteriza pelo instante em que a gasolina enviada pela refinaria começa a ocupar os últimos quatro lotes do duto. Do oitavo ao décimo-terceiro intervalo de tempo a primeira estação de bombeamento consome mais potência do que a intermediária, devido à variação de altitude do sistema dutoviário. Nos primeiros quatro lotes o relevo sofre um acréscimo de altitude, impondo aos fluidos que se encontram dentro do sistema um aumento de energia potencial. Do quinto ao

oitavo lotes, a altitude do relevo do duto decresce e desta forma, os produtos dentro da linha dutoviária sofrem um decréscimo de energia potencial. Finalmente, do oitavo ao décimo-terceiro intervalos de tempo, o rendimento das estações opera a um valor próximo de 62%.

As figuras 10.7 e 10.8 mostram os resultados análogos para o exemplo E10.1D.

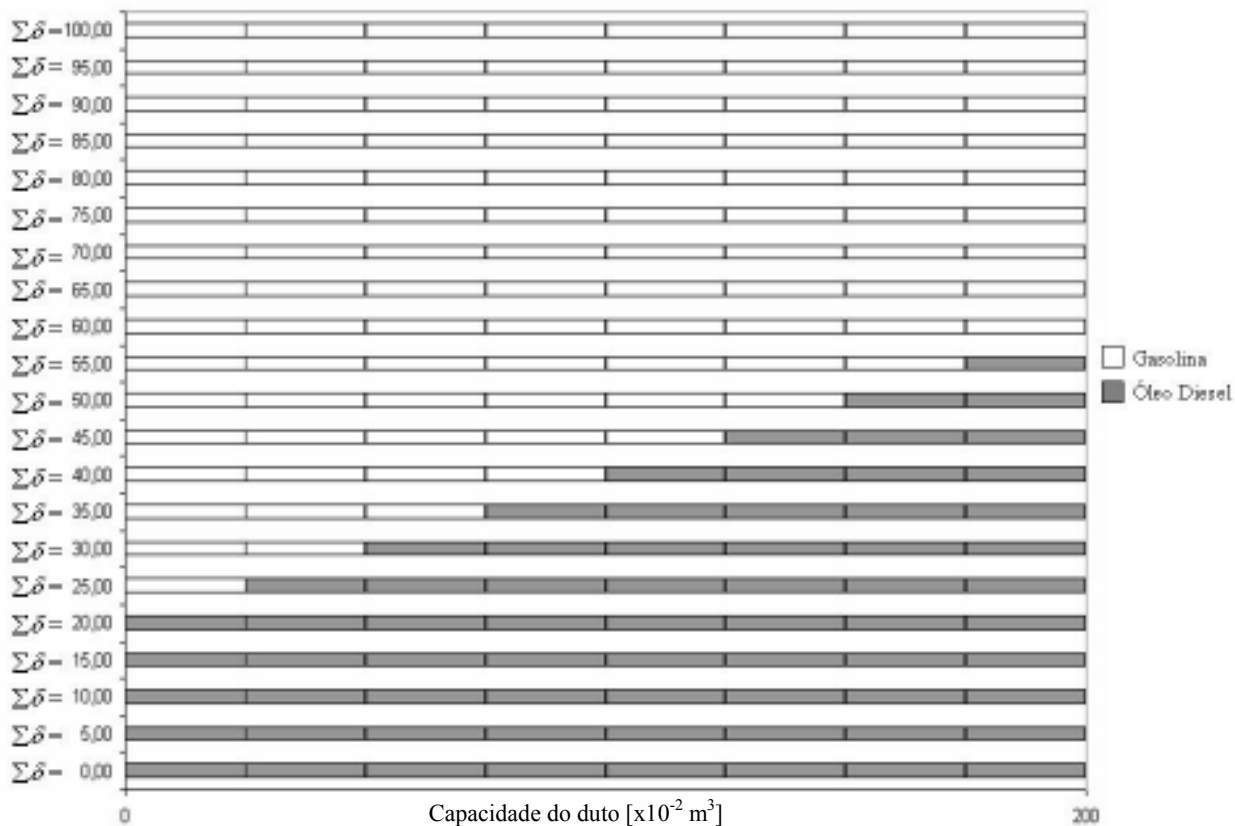


Figura 10.7 – Seqüenciamento dos produtos dentro do duto para o exemplo E10.1D

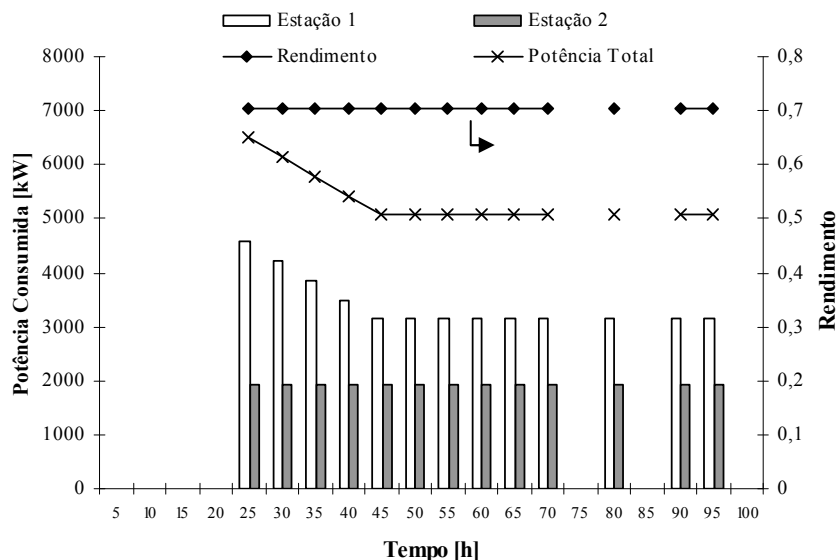


Figura 10.8 – Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento para o exemplo E10.1D

A figura 10.7 mostra que no exemplo E10.1D, a refinaria alimenta o duto com gasolina a fim de satisfazer as demandas na base de distribuição. Nos primeiros quatro intervalos de tempo, o duto permanece ocioso e somente no quinto a refinaria inicia a sua alimentação. Assim como no exemplo E10.1C, as potências consumidas pela primeira estação de bombeamento decrescem progressivamente do quinto ao oitavo intervalo de tempo conforme os quatro primeiros lotes do duto são preenchidos por gasolina. Note que neste exemplo, os rendimentos das estações de bombeamento são constantes para a operação do sistema dutoviário. A segunda estação de bombeamento opera com potências constantes em todos os intervalos de tempo em que o duto é acionado. Assim como no exemplo E10.1C, a potência total consumida pelo duto decresce ao longo do tempo, conforme a gasolina substitui o óleo diesel, devido a sua menor viscosidade cinemática. Cabe ressaltar que o gradiente hidráulico do duto é drasticamente influenciado pelas perdas de carga dos produtos para os exemplos pertencentes às séries E10.1 e E10.2.

Os resultados gerados por este exemplo encontram várias similaridades em relação ao exemplo E10.1C. A partir do oitavo intervalo de tempo, a primeira estação de bombeamento consome menos energia do que nos anteriores, pois os quatro primeiros lotes se encontram preenchidos por gasolina. Nestes intervalos de tempo, analogamente ao exemplo E10.1C, devido ao perfil topográfico do sistema dutoviário, a primeira estação de bombeamento consome mais potência do que a intermediária. Outra similaridade entre os exemplos é a de que em ambos o sistema



dutoviário é ativado em 13 intervalos de tempo. No exemplo E10.1D, o sistema dutoviário permanece 35 horas ocioso, enquanto o exemplo E10.1C impõe apenas 12,2 horas de inatividade ao sistema operacional. Todavia, o exemplo E10.1C impõe às estações de bombeamento um consumo menor de energia em relação à quantidade determinada pelo exemplo E10.1D e desta forma, a sua solução se mostra com um custo operacional menor.

O exemplo E10.2D encontrou a solução viável para o problema quando o duto opera com vazão e rendimento constantes com um custo operacional de \$59826,25, enquanto o melhor limite inferior possui o valor de \$30105,38. O exemplo E10.2C gerou uma seqüência operacional com custo de \$51111,43 (14,60% menor do que E10.2D). O problema E10.2C, formado por 15 intervalos de tempo, demandou aproximadamente 63 segundos, enquanto o exemplo E10.2D encontrou uma solução viável com um *Gap* relativo próximo a 50% em 12 horas de resolução utilizando a mesma plataforma computacional. A dimensão deste exemplo, caracterizada por 30 intervalos de tempo de 5 horas que totalizam 150 horas, se mostra como um obstáculo para que a formulação MILP gere uma solução de boa qualidade. Em suma, a sua aplicação a problemas com este número de variáveis se torna inviável.

As figuras 10.9 e 10.10 ilustram os resultados análogos para o exemplo E10.2C.

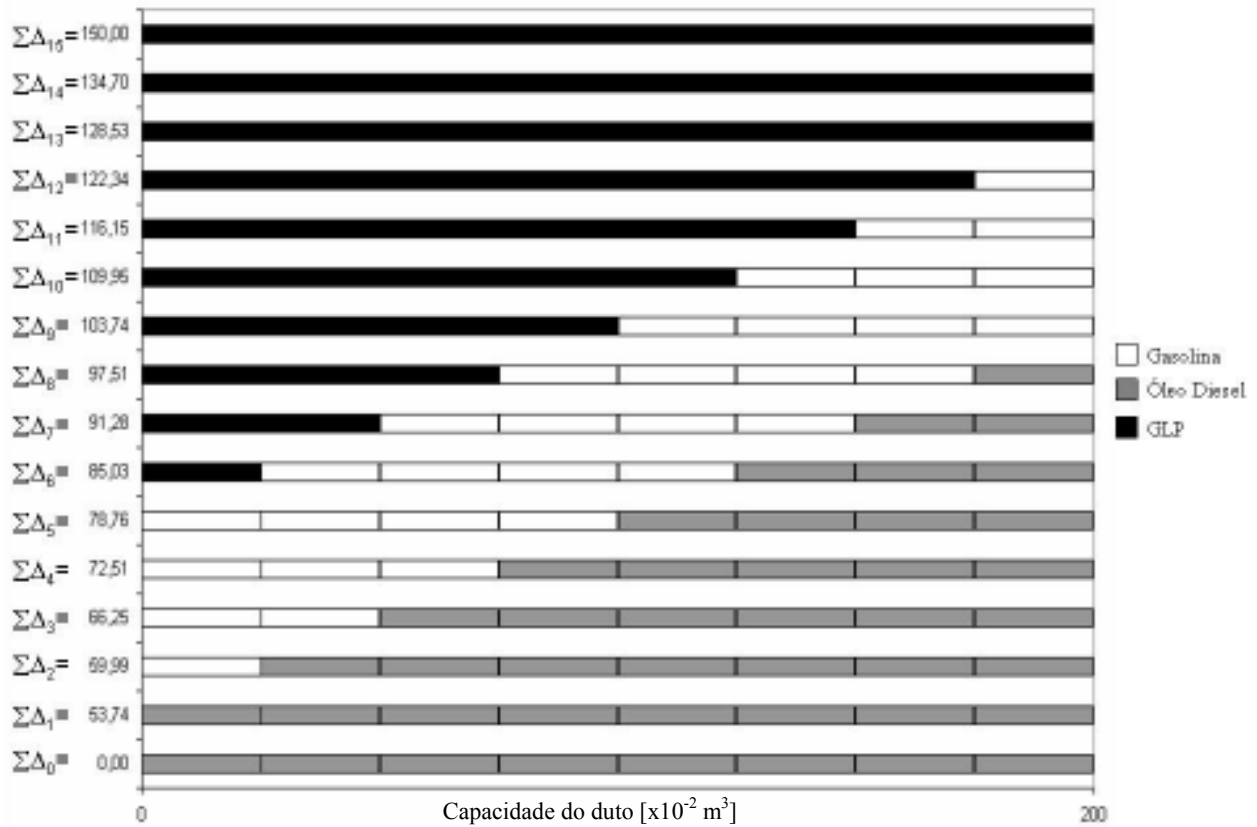


Figura 10.9 – Seqüenciamento dos produtos dentro do duto para o exemplo E10.2C

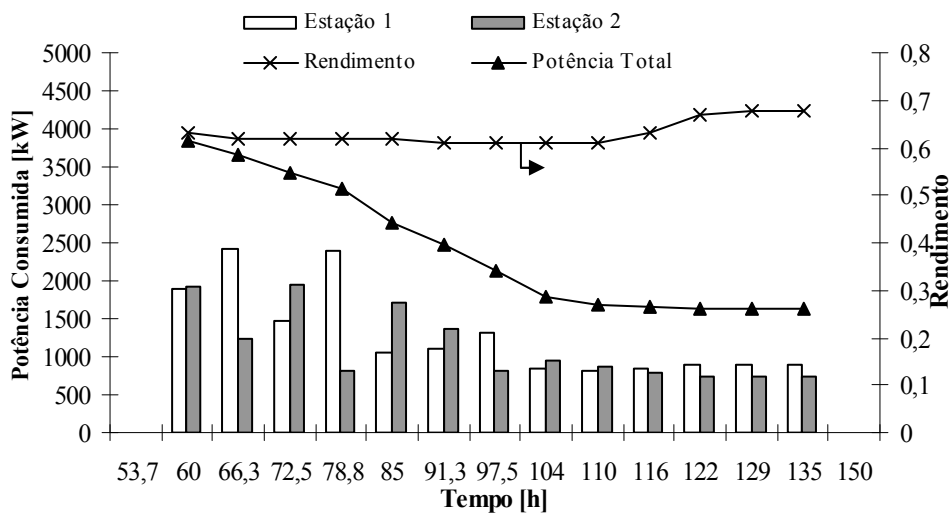


Figura 10.10 – Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento para o exemplo E10.2C

A figura 10.9 mostra que nas primeiras 53 horas o duto permanece inativo. Posteriormente, a refinaria o alimenta com 4 lotes de gasolina. Do sexto ao décimo-quarto intervalo de tempo, o duto é alimentado com GLP. A partir do décimo-quinto intervalo de tempo, o sistema dutoviário permanece inativo por 15 h. A figura 10.10 mostra que a potência total consumida pelas duas estações de bombeamento decresce progressivamente conforme o duto é alimentado com GLP pela refinaria, cuja viscosidade cinemática é menor em relação às da gasolina e do óleo diesel. Note que nos 4 primeiros intervalos em que o sistema operacional se mostra operacional, a potência total consumida pelas estações de bombeamento decresce conforme a gasolina substitui o óleo diesel na linha dutoviária, devido a sua menor viscosidade cinemática. Nos 4 intervalos posteriores, a queda se torna mais acentuada pois o GLP, cuja viscosidade cinemática possui o menor valor entre todos os produtos envolvidos na operação de transporte, substitui o óleo diesel, que é caracterizado pela maior viscosidade cinemática entre todos os derivados. Finalmente, as estações de bombeamento operam com rendimento a uma faixa de 63% a 68%.

As figuras 10.11 e 10.12 ilustram os resultados análogos para o exemplo E10.2D.

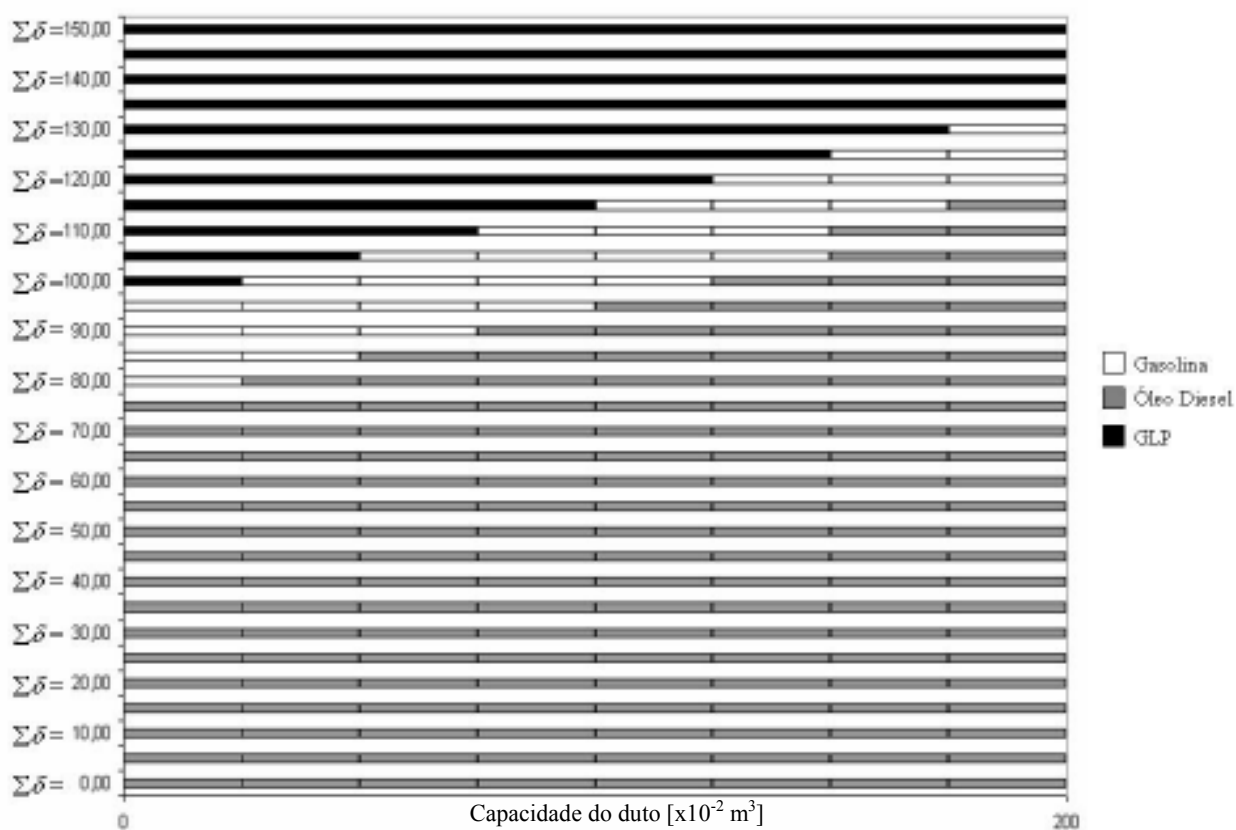


Figura 10.11 – Sequenciamento dos produtos dentro do duto para o exemplo E10.2D

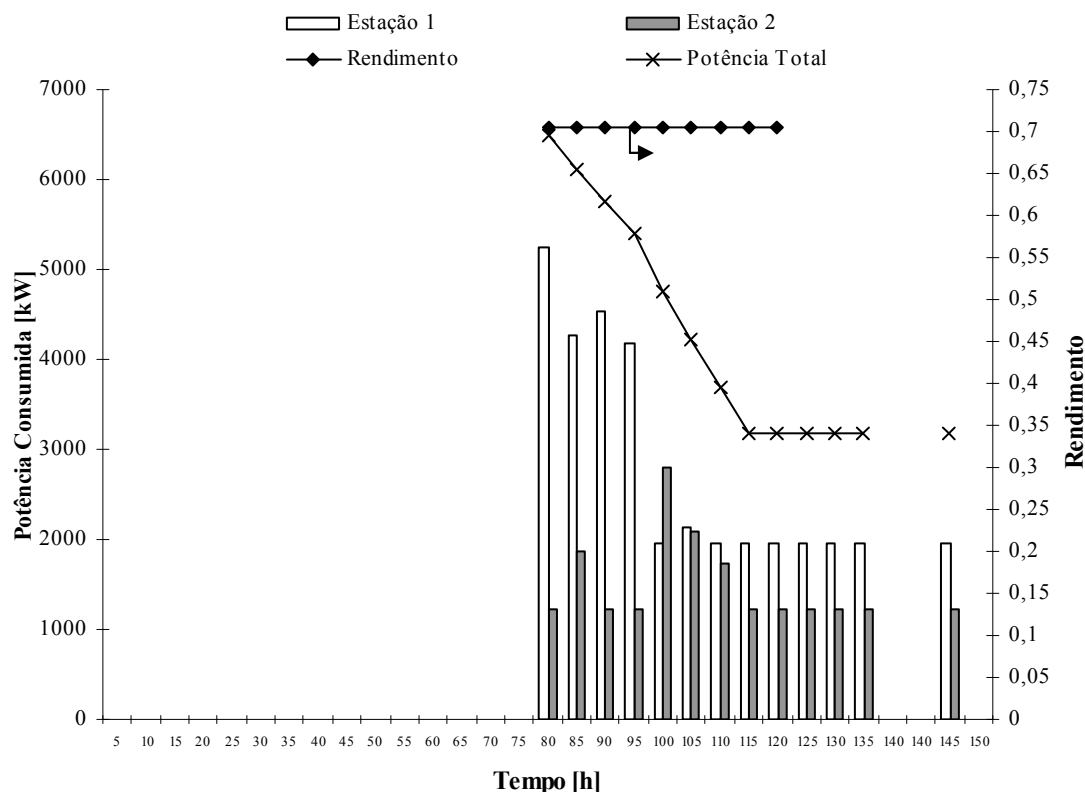


Figura 10.12 – Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento para o exemplo E10.2D

A figura 10.11 ilustra que no exemplo E10.2D a refinaria alimenta o duto com gasolina e GLP. Nos primeiros onze intervalos de tempo, o duto permanece ocioso e somente no décimo-sexto a refinaria inicia a sua alimentação com gasolina. Assim como no exemplo E10.2C, a potência total consumida pelo sistema dutoviário decresce progressivamente ao longo do tempo até o mesmo ser totalmente preenchido por GLP, de acordo com a figura 10.12. O duto recebe inicialmente 4 lotes de gasolina do décimo-sexto ao décimo-nono intervalos de tempo e GLP nos demais sempre que o sistema operacional é ativado. Note que do décimo-sexto ao décimo-nono intervalo, a potência total consumida pelas estações diminui, pois a gasolina substitui o óleo diesel na linha dutoviária.

A solução gerada por E10.2D aciona o duto por apenas 43,33% do horizonte de tempo operacional, enquanto E10.2C o ativa por aproximadamente 48% do tempo disponível. A estratégia utilizada em ambos os exemplos é a de não gerar interfaces após a formada por gasolina e GLP. Adicionalmente, a refinaria alimenta a menor quantidade possível de GLP a fim

de minimizar os custos de bombeamento. No presente caso, o GLP se mostra conveniente, pois além de ser requerido pelo mercado consumidor, ainda possui a menor viscosidade cinemática entre todos os produtos, e faz com que as estações de bombeamento consumam menor quantidade de energia.

Os exemplos desta seção mostram a complexidade de uma operação dutoviária multiproduto quando os aspectos hidráulicos são considerados e formulados segundo duas abordagens. Ambas as formulações mostram que o seqüenciamento dos produtos dentro da linha dutoviária e a sua vazão operacional afetam drasticamente as potências consumidas pelas estações de bombeamento. Os resultados gerados por ambas as formulações ilustram que produtos de maior viscosidade cinemática assim como vazões operacionais elevadas contribuem para um maior consumo de potência pelas estações de bombeamento. Em ambos os exemplos, a formulação MINLP gera melhores resultados do que a MILP. Os exemplos que tratam a vazão do sistema operacional como variável geram resultados de melhor qualidade, mesmo quando o duto opera com vazões fixas no ponto onde os estágios das estações de bombeamento possuem rendimento máximo. Estas formulações possuem a característica de otimizar as potências consumidas e os rendimentos das estações de bombeamento de acordo com o seqüenciamento dos produtos dentro do duto e com a sua vazão operacional, enquanto a formulação MILP somente as otimiza de acordo com o seqüenciamento dos produtos.

### *10.3. Séries E10.3 e E10.4 – variação do perfil topográfico do sistema dutoviário*

A figura 10.13 ilustra o perfil de produção da refinaria, o número de intervalos de tempo e a sua distribuição ao longo do horizonte de tempo para as séries E10.3 e E10.4. A tabela 10.4 mostra os dados dos exemplos que os diferenciam em relação aos das séries E10.1 e E10.2. A série E10.3 mostra a influência que alterações no relevo podem causar na vazão operacional do sistema, no rendimento das estações de bombeamento e no tempo em que o duto permanece ocioso. A série de exemplos E10.4 revela como a variação do relevo possibilita a alteração nos descarregamentos dos produtos no duto. Os 3 exemplos pertencentes à série E10.3 utilizam a formulação MINLP com representação contínua das variáveis tempo e vazão.

*10.3.1. Série E10.3 – influência da variação do perfil topográfico do sistema dutoviário na sua vazão operacional, no rendimento das suas estações de bombeamento e no seu tempo de ociosidade*

Os exemplos desta série possuem 19 intervalos de tempo, com a condição imposta pela refinaria de que lotes de gasolina e de óleo diesel são enviados aos seus tanques nas primeiras 90 h, e de GLP e de QAV nas 60 restantes, totalizando desta forma 150 h de horizonte operacional. O número de intervalos de tempo escolhido superior em relação aos dos exemplos da série E10.2 foi escolhido para que fossem gerados *schedules* com a possibilidade de o sistema operacional realizar paradas mais freqüentes, se assim necessário.

A tabela 10.4 ilustra as cotas dos lotes para os exemplos E10.3.1, E10.3.2 e E10.3.3. Note que E10.3.1 utiliza o mesmo perfil topográfico adotado pelos exemplos E10.1 e E10.2, enquanto E10.3.2 e E10.3.3 possuem variações mais acentuadas no seu relevo. O exemplo E10.3.2 possui altitude máxima de 1790 m acima do nível mar, sendo esta localizada no quarto lote do sistema. O relevo do exemplo E10.3.3 possui pico de 2590 m, situado na mesma região do sistema dutoviário. Estes dois últimos exemplos também adotam que cada um dos 4 últimos lotes da linha dutoviária possui um decréscimo de 100 m em relação ao seu antecessor. O conteúdo inicial presente no interior da linha dutoviária é composto por gasolina nos 2 primeiros lotes do sistema e por óleo diesel nos restantes. A tabela 10.4 lista o perfil de demanda requerido pelo mercado consumidor conectado à base de distribuição. No presente caso, quantidades consideráveis de gasolina, de GLP e de QAV são requeridas ao final da operação. Finalmente, o conjunto de interfaces proibidas,  $FS_{p,p'}$ , é alterado de forma que a interface entre GLP e QAV passe a ser permitida, embora a um custo mais elevado do que as outras permitidas.

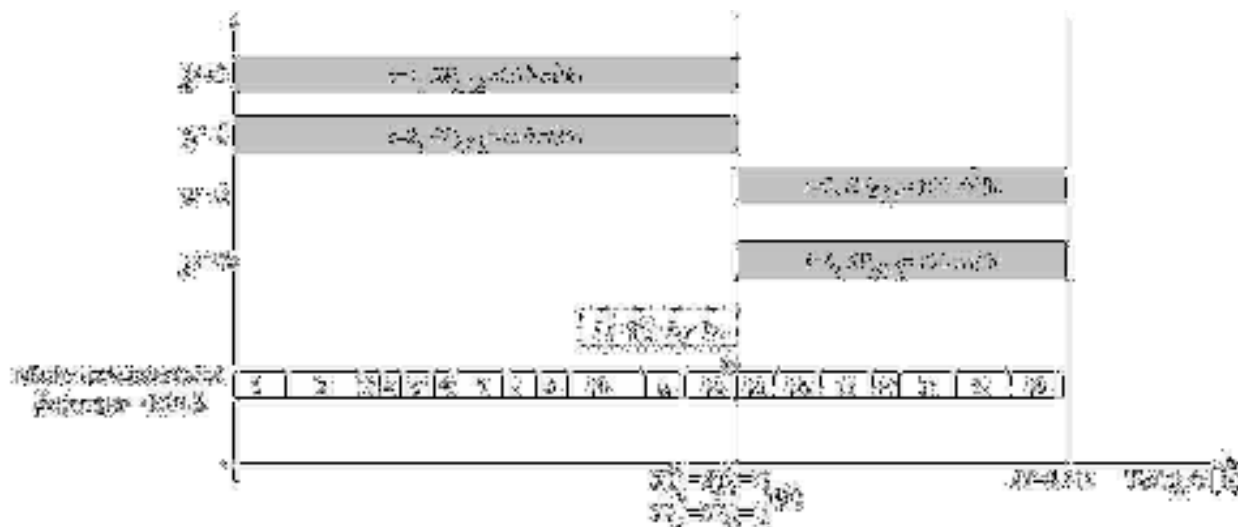


Figura 10.13 – Perfil de produção e número de intervalos de tempo para os exemplos da série E10.3

Tabela 10.4 – Cotas dos lotes do sistema dutoviário e parâmetros para a série E10.3

Exemplos	$z_l$ (m)							
	$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=4$	$l=5$	$l=6$	$l=7$	$l=8$
E10.3.1	598	612	623	634	605	576	547	518
E10.3.2	890	1190	1490	1790	1690	1590	1490	1390
E10.3.3	1090	1590	2090	2590	2490	2390	2290	2190

Produto	Estoque inicial	Demanda	$CONTACT_{p,p'} [x10^{-2} \$]$			
	no duto	$[x10^{-2} m^3]$	$p'=1$	$p'=2$	$p'=3$	$p'=4$
	$XVZERO_{p,l}$	$DEM_p$				
Gasolina (1)	$1/(l=1,2)$	100	0	100	150	150
Óleo diesel (2)	$1/(l=3,4,5,6,7,8)$	10	100	0	X	X
GLP (3)	0/0	170	150	X	0	180
QAV (4)	0/0	150	150	X	180	0

A tabela 10.5 mostra os resultados computacionais para os exemplos da série E10.3.

Tabela 10.5 – Resultados computacionais para os exemplos E10.3

<i>Exemplos</i>	E10.3.1	E10.3.2	E10.3.3
Solução Relaxada	40777,49	47415,63	53496,20
Solução Encontrada	58235,33	64986,73	70872,52
Custos de Bombeamento (%)	31,87	38,94	44,00
Custos de Interface (%)	56,67	50,78	46,56
Custos de Estocagem na Refinaria (%)	7,33	6,57	6,04
Custos de Estocagem nos Depósitos (%)	4,13	3,71	3,40
Variáveis Binárias	190	190	190
Variáveis Contínuas	2011	2011	2011
Tempo Computacional (s)*	773,17	603,61	622,12

\*Resultados em uma plataforma *Pentium IV* 2.4 GHz 512 Mb RAM

O exemplo E10.3.1 encontrou a solução com custo operacional de \$58235,33 em 773,17 segundos com o relevo utilizado pelos exemplos E10.1 e E10.2. Os tempos computacionais dos exemplos da série E10.3 são maiores do que os de E10.1C e E10.2C, devido à maior dimensão do problema. No presente caso, os exemplos desta série possuem 19 intervalos de tempo, ao passo que os das séries E10.1 e E10.2 contém 15 intervalos.

A maior parcela dos custos operacionais referente ao exemplo E3.10.1 é a relativa aos custos de interface, responsáveis por 56,67% do custo operacional total. Os custos de bombeamento somam 31,87%. Os custos de estocagem na refinaria somam 7,33% e os na base de distribuição respondem por 3,50% do custo operacional.



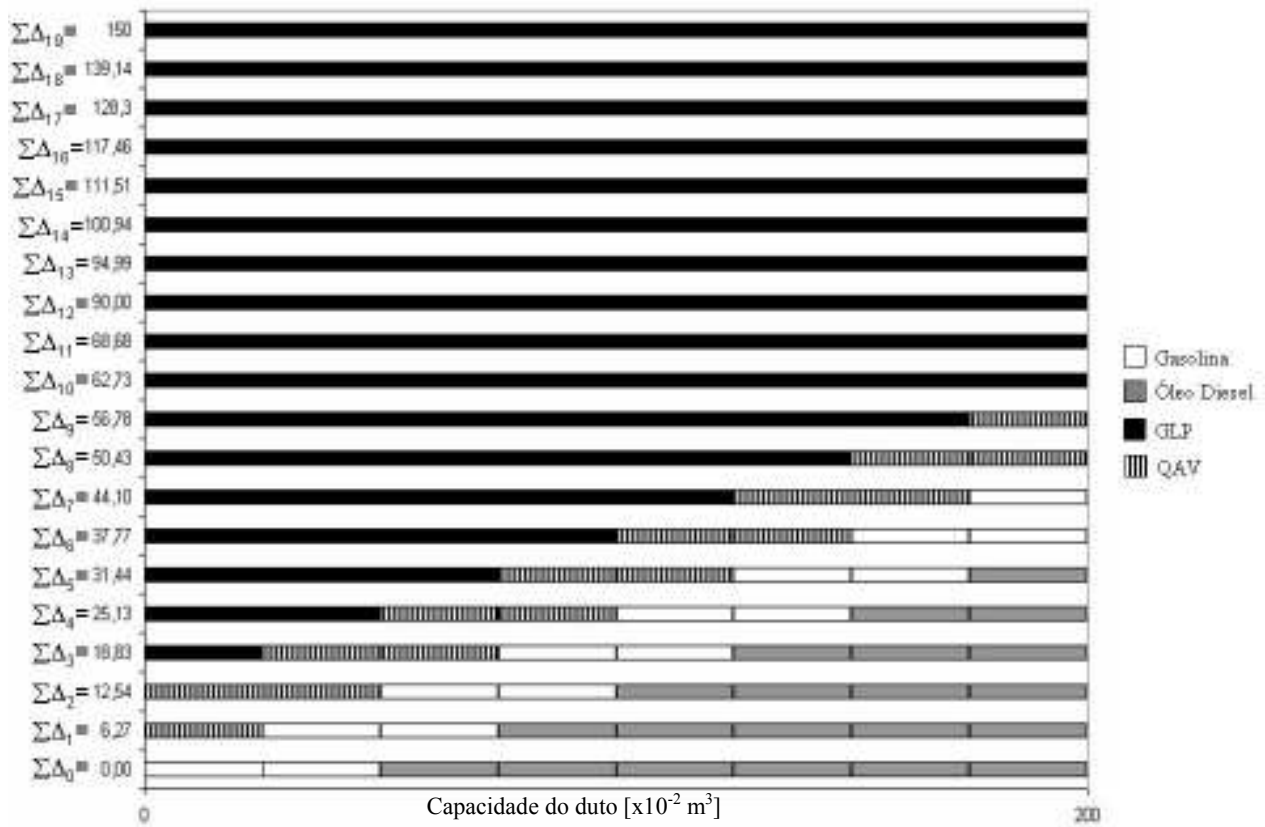


Figura 10.14 - Seqüenciamento dos produtos dentro do duto para o exemplo E10.3.1

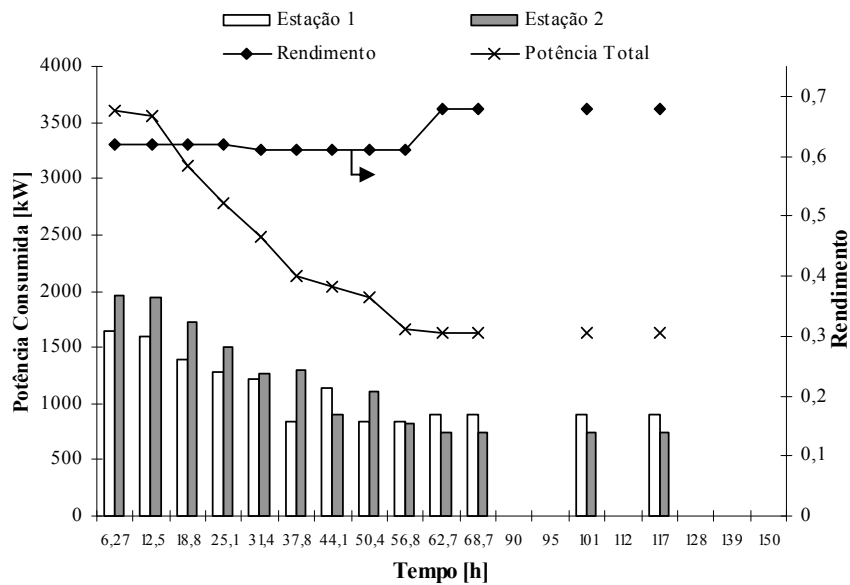


Figura 10.15 – Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento para o exemplo E10.3.1

A refinaria alimenta o duto com QAV nos 2 primeiros intervalos de tempo, de acordo com a figura 10.14. Nos intervalos posteriores, o duto recebe GLP sempre que o mesmo é ativado. No décimo-segundo, décimo-terceiro, décimo-quinto e a partir do décimo-sétimo intervalo, o sistema permanece ocioso. Cabe ressaltar que para esta série de exemplos, a base necessita retirar da linha dutoviária ao menos 2 lotes de gasolina, 3 de GLP e 2 de QAV a fim de satisfazer as demandas estabelecidas ao final do horizonte de tempo.

A figura 10.15 mostra que as potências consumidas pelas estações de bombeamento decrescem progressivamente, quando o duto é alimentado com QAV e GLP e quando o óleo diesel presente nos últimos 6 lotes começa a alimentar a base de distribuição. Note que o decréscimo de potência consumida ao longo do *schedule* resulta da retirada deste produto da linha dutoviária e a alimentação de GLP, cuja viscosidade cinemática possui valor inferior aos dos outros derivados. A partir do décimo intervalo as potências utilizadas pelas estações assumem valores constantes, pois o duto é totalmente preenchido por GLP. Adicionalmente, os rendimentos estão dentro da faixa de 61 a 68%.

O exemplo E10.3.2 encontrou a solução com custo operacional de \$64986,73 em aproximadamente 622 segundos. Analogamente ao primeiro exemplo desta série, os custos de interface constituem a maior parcela dos custos operacionais, sendo responsáveis por 50,78% do total. Note que esta parcela é consideravelmente menor do que a obtida pelo exemplo E10.3.1, devido ao relevo mais elevado do sistema dutoviário, o que eleva a parcela relativa aos custos de bombeamento, que totaliza 38,94%. Os custos de estocagem na refinaria somam 6,57% e a fração referente aos custos de estocagem na base de distribuição responde por 3,71% do custo operacional. As figuras 10.16 e 10.17 ilustram os resultados operacionais para o exemplo E10.3.2.

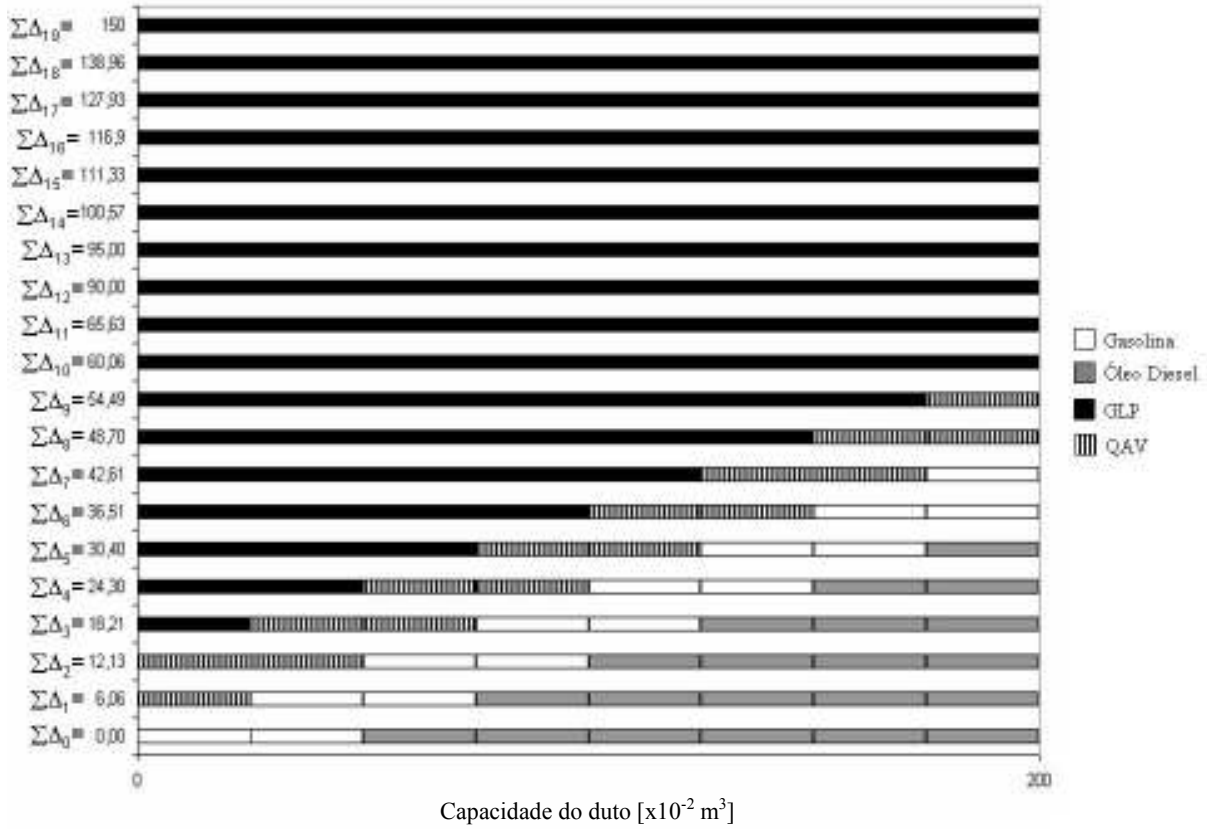


Figura 10.16 - Seqüenciamento dos produtos dentro do duto para o exemplo E10.3.2

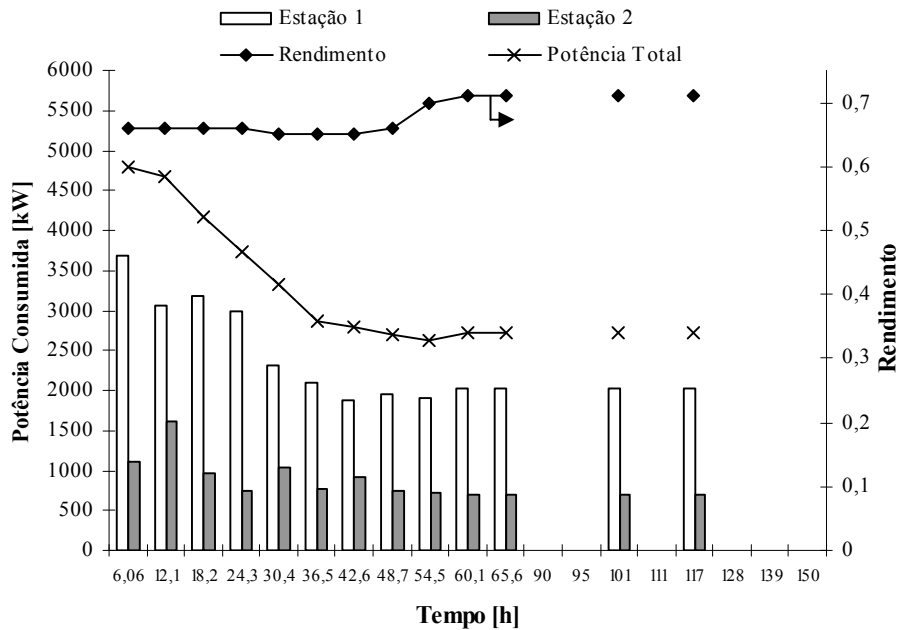


Figura 10.17 – Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento para o exemplo E10.3.2

Analogamente ao exemplo E10.3.1, a refinaria alimenta o duto com QAV nos 2 primeiros intervalos de tempo, de acordo com a figura 10.16. Do terceiro intervalo em diante, o duto recebe GLP. Assim como no primeiro exemplo da série, o sistema operacional permanece ocioso no décimo-segundo, décimo-terceiro, décimo-quinto e a partir do décimo-sétimo intervalo. No entanto, o duto opera com vazões e rendimentos das estações superiores às aquelas do exemplo E10.3.1. Note que neste exemplo as estações e o duto permanecem acionados por uma fração menor (51,19%) do que em E10.3.1, que ativa o duto por 53,73% do horizonte operacional.

O exemplo E10.3.3 encontrou a solução com custo operacional de \$70872,52 em 622 segundos. O custo operacional deste exemplo é mais elevado em comparação aos encontrados por E10.3.1 e por E10.3.2 devido ao perfil topográfico mais acentuado para o sistema dutoviário. Analogamente ao segundo exemplo desta série, os custos de interface constituem a maior parcela, sendo responsáveis por 46,56% dos custos operacionais. Cabe ressaltar que esta parcela é consideravelmente menor do que as obtidas pelos exemplos E10.3.1 e E10.3.2. A parcela referente aos custos de bombeamento totaliza 44% enquanto a dos custos de estocagem na refinaria representa 6,04% e a dos custos de estocagem na base de distribuição totaliza 3,40% do custo operacional. As figuras 10.18 e 10.19 mostram os resultados operacionais para o exemplo E10.3.3.

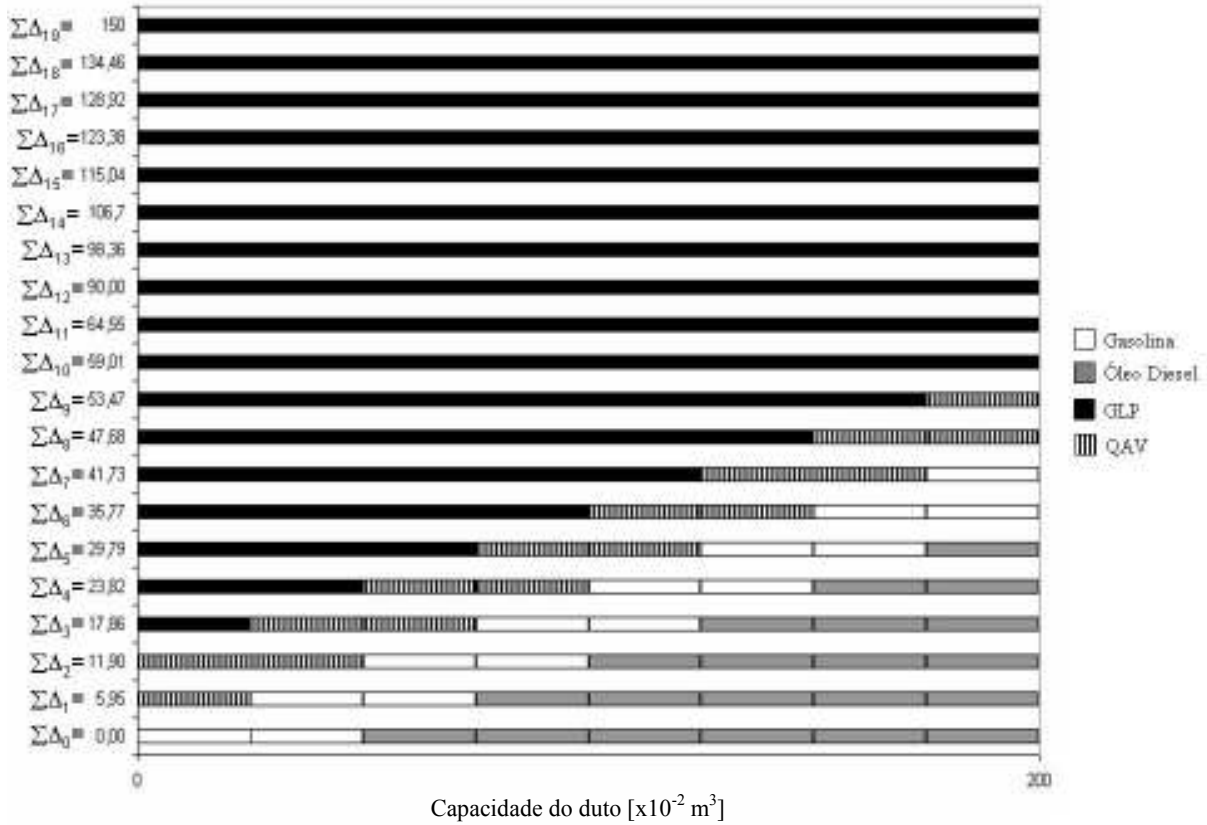


Figura 10.18 - Seqüenciamento dos produtos dentro do duto para o exemplo E10.3.3

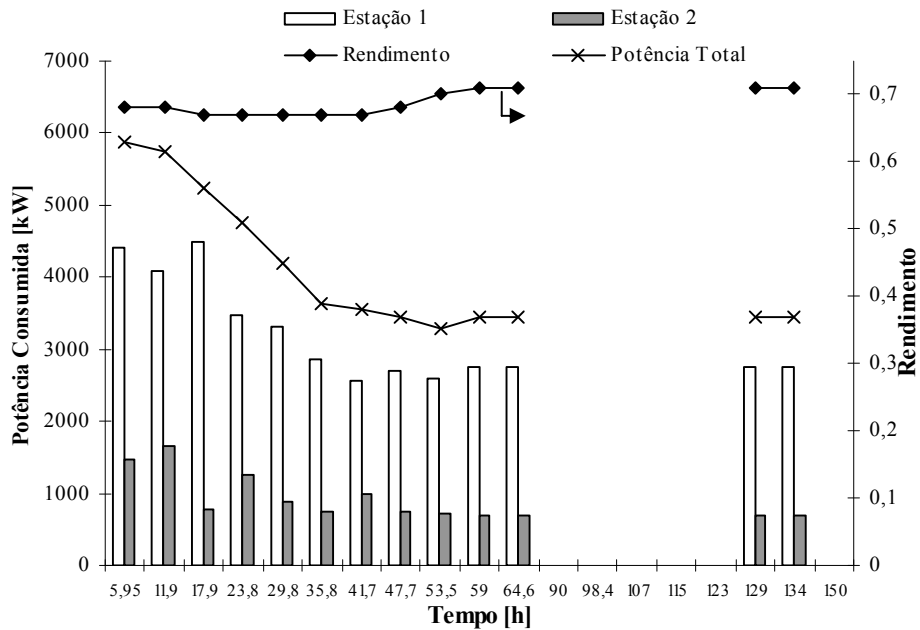


Figura 10.19 – Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento para o exemplo E10.3.3

No último exemplo da série, a refinaria alimenta o duto de mesma maneira observada pelos exemplos E10.3.1 e E10.3.2 até o décimo-primeiro intervalo de tempo, de acordo com a figura 10.18, ou seja, com QAV nos 2 primeiros intervalos e com GLP nos demais. Todavia, o sistema dutoviário permanece ocioso do décimo-segundo ao décimo-sexto intervalo por 58,8 horas, além de 15,6 horas no décimo-nono.

A figura 10.19 mostra que as potências consumidas pelas estações de bombeamento possuem o mesmo perfil encontrado pelo exemplo E10.3.2, ou seja, decaem de forma monotônica ao longo do tempo, pois os produtos alimentados no duto pela refinaria (GLP) possuem viscosidade cinemática inferior à dos produtos que simultaneamente suprem a base de distribuição (óleo diesel e gasolina). Note que neste exemplo, o consumo de potência pelas estações de bombeamento é maior em relação aos exemplos anteriores desta série devido ao considerável acréscimo na variação do perfil topográfico do duto. Cabe resaltar que as estações de bombeamento operam com um rendimento superior aos fornecidos pelos exemplos E10.3.1 e E10.3.2. Devido à curva considerada neste exemplo, mostrada pela figura 10.4, o sistema dutoviário opera com uma vazão superior às dos 2 exemplos anteriores desta série. Adicionalmente, devido ao alto consumo de potência, o duto e as suas bombas são ativados por apenas 75,6 horas. Note que este valor é menor do que o obtido em E10.3.1 e E10.3.2.

Finalmente, acredita-se que as soluções encontradas são de boa qualidade para os exemplos propostos. Uma característica comum a todos é a de que a restrição de cortes inteiros (5.21), que relaciona as demandas e estoques iniciais na base e no duto proposta no capítulo 5, é sempre ativada. Segundo esta restrição, o sistema deve ser ativado em ao menos 13 intervalos de tempo. Todavia, as soluções não podem ser classificadas como ótimas globais dos respectivos exemplos, devido à não convexidade do modelo MINLP proposto.

### *10.3.2. Série E10.4 – influência da variação do perfil topográfico do sistema dutoviário no seqüenciamento dos produtos*

Os exemplos da série E10.4 utilizam os mesmos dados utilizados pelos da série E10.3, com exceção dos ilustrados pela tabela 10.6. Cabe ressaltar que 2 exemplos compõem a série E10.4. O primeiro (E10.4.1) utiliza o perfil topográfico utilizado pelo exemplo E10.3.1, enquanto o exemplo E10.4.2 faz uso do perfil topográfico proposto para o exemplo E10.3.2.

Tabela 10.6 – Parâmetros para os exemplos da série E10.4

<i>Produto</i>	<i>Estoque inicial do duto</i>	<i>CONTACT<sub>p,p'</sub> [x10<sup>-2</sup> \$]</i>			
	<i>XVZERO<sub>p,l</sub></i>	<i>p'=1</i>	<i>p'=2</i>	<i>p'=3</i>	<i>p'=4</i>
Gasolina (1)	0/0	0	100	80	150
Óleo Diesel (2)	1/(l=1,2,3,4,5,6,7,8)	100	0	X	X
GLP (3)	0/0	80	X	0	180
QAV (4)	0/0	150	X	180	0

Os exemplos desta série apresentam duas alterações em relação aos exemplos da série E10.3. Primeiramente, a série E10.4 adota como condição inicial que o duto está totalmente preenchido por óleo diesel. Os custos de interface são modificados, de modo que a interface entre gasolina e GLP se torna menos onerosa do que as correspondentes dos exemplos da série E10.3. A tabela 10.7 mostra os resultados computacionais para os exemplos desta série.

Tabela 10.7 – Resultados computacionais para os exemplos E10.4

<i>Exemplos</i>	E10.4.1	E10.4.2
Solução Relaxada	43159,39	50218,63
Solução Encontrada	72351,69	81096,58
Custos de Bombeamento (%)	41,06	38,76
Custos de Interface (%)	49,76	53,02
Custos de Estocagem na Refinaria (%)	5,85	5,26
Custos de Estocagem nos Depósitos (%)	3,33	2,96
Variáveis Binárias	190	190
Variáveis Contínuas	2011	2011
Tempo Computacional (s)*	835,86	836,86

\*Resultados em uma plataforma *Pentium IV* 2.4 GHz 512 Mb RAM

O exemplo E10.4.1 encontrou a solução do problema com custo operacional de \$72351,69 depois de 835 segundos. A maior parcela dos custos operacionais referente ao exemplo E10.4.1 é a dos custos de interface, responsáveis por 49,76%. Os custos de bombeamento respondem por 41,06% ao passo que os custos de estocagem na refinaria e na base somam respectivamente 5,85

e 3,33% dos custos operacionais. As figuras 10.20 e 10.21 mostram os resultados operacionais para este exemplo.

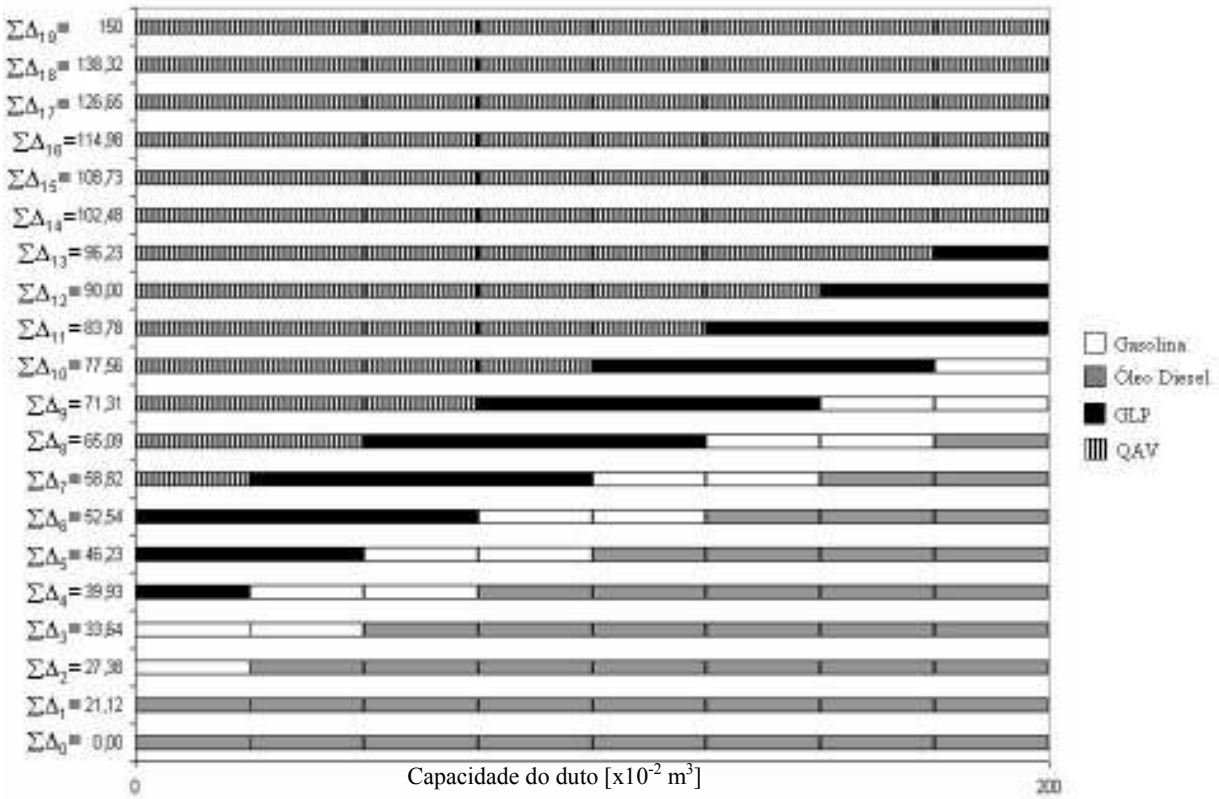


Figura 10.20 - Seqüenciamento dos produtos dentro do duto para o exemplo E10.4.1



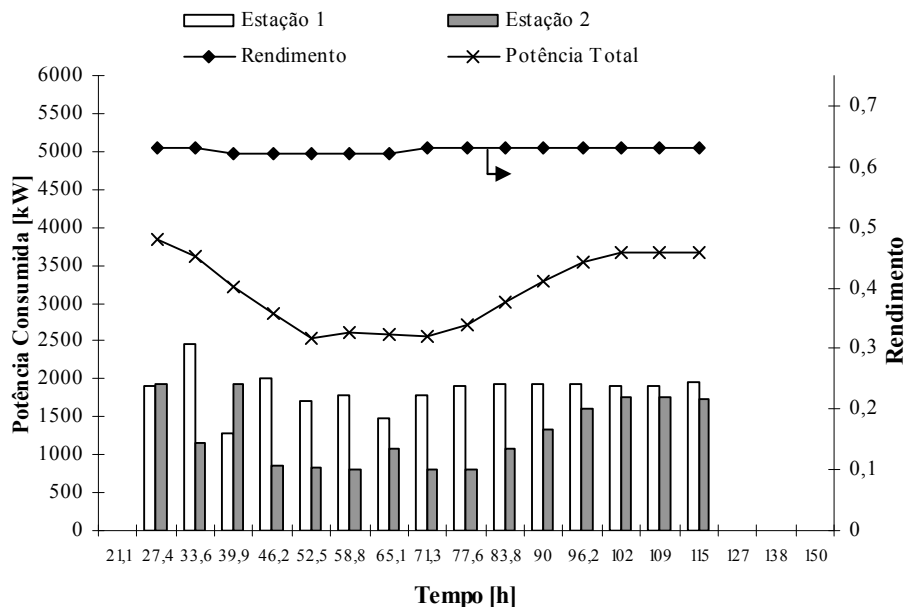


Figura 10.21 – Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento para o exemplo E10.4.1

Neste exemplo, o duto permanece inativo por 21,12 horas no primeiro intervalo de tempo. Posteriormente, a refinaria alimenta o duto com gasolina nos 2 intervalos de tempo seguintes. Depois, no quarto, quinto e sexto intervalos o duto recebe GLP. Do sétimo ao décimo-sexto intervalo de tempo, a refinaria envia QAV ao duto. O duto permanece ocioso nos 3 intervalos finais por 35 horas.

De acordo com a figura 10.21, as estações de bombeamento operam com rendimentos que variam de 62 a 63%. Nos primeiros 9 intervalos, as potências utilizadas pelas estações decrescem, pois o óleo diesel é substituído por produtos de menor viscosidade cinemática, como a gasolina, GLP e QAV. Do décimo ao décimo-quarto intervalo de tempo, a segunda estação apresenta um aumento no seu consumo de energia, pois o produto QAV substitui a gasolina e o GLP nos últimos 4 lotes da linha dutoviária. Posteriormente, as potências consumidas permanecem constantes, pois o duto é totalmente preenchido por QAV.

O exemplo E10.4.2 gera um *schedule* com custo operacional de \$81096,58 depois de 836 segundos. Os custos de interface são responsáveis por 53,02%. Os custos de bombeamento respondem por 38,76% enquanto os custos de estocagem na refinaria e na base totalizam nesta ordem, 5,26 e 2,96% dos custos operacionais. As figuras 10.22 e 10.23 ilustram os resultados operacionais para este exemplo.



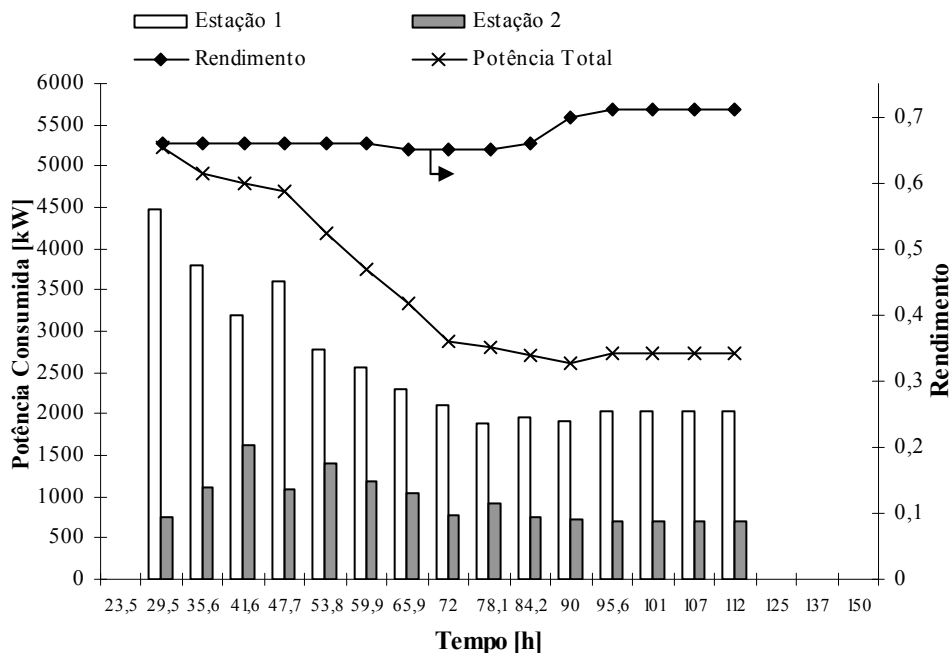


Figura 10.23 – Potências consumidas e rendimentos das estações de bombeamento para o exemplo E10.4.2

Com variações mais acentuadas do perfil topográfico do sistema dutoviário, o exemplo E10.4.2 propõe um *schedule* significativamente diferente em relação ao proposto por E4.10.1. No presente caso, o duto não é acionado nas primeiras 23,5 horas alocadas no primeiro intervalo de tempo. Nos 2 intervalos de tempo seguintes, a refinaria envia ao duto 2 lotes de gasolina. Depois, no quarto e quinto intervalos, o duto recebe QAV. Do sexto ao décimo-sexto intervalo de tempo, a refinaria envia GLP ao duto. O duto permanece ocioso nos últimos 3 intervalos por 37,7 horas.

De acordo com a figura 10.23, as estações de bombeamento operam com rendimentos que variam de 65 a 71%. As potências utilizadas pelas estações de bombeamento decaem conforme os produtos de viscosidade cinemática inferior (gasolina, QAV e GLP) substituem os produtos de maior viscosidade nos primeiros 12 intervalos de tempo. Note que uma queda mais acentuada nas potências consumidas ocorre do sexto ao nono intervalo de tempo, quando o duto recebe GLP da refinaria e simultaneamente alimenta a base com óleo diesel. Adicionalmente, a partir do décimo-terceiro intervalo de tempo, as potências consumidas assumem valores constantes quando o duto é acionado pelo mesmo estar totalmente preenchido por GLP.

### 10.3.3. Análise das soluções obtidas pelos exemplos da série E10.4

Com o objetivo de comparar diferentes seqüências de produtos na linha dutoviária, o exemplo E10.4.3 é proposto. Neste exemplo, a refinaria ativa o duto nos mesmos intervalos de tempo que o exemplo E10.4.1, porém com a refinaria alimentado o sistema com gasolina, QAV e GLP, nesta ordem. Note que o exemplo E10.4.1 propõe que a refinaria envie gasolina, GLP e QAV ao duto. A tabela 10.8 mostra os resultados de E10.4.1 e E10.4.3.

Tabela 10.8 – Resultados comparativos para os exemplos E10.4.1 e E10.4.3

<i>Exemplos</i>	E10.4.1	E10.4.3
Solução Encontrada (x 10 <sup>-2</sup> \$)	72351,69	72928,85
Custos de Bombeamento (x 10 <sup>-2</sup> \$)	29705,63	23258,71
Custos de Interface (x 10 <sup>-2</sup> \$)	36000,00	43000,00
Custos de Estocagem na Refinaria (x 10 <sup>-2</sup> \$)	4234,18	4256,65
Custos de Estocagem nos Depósitos (x 10 <sup>-2</sup> \$)	2411,18	2413,49

A solução gerada pelo exemplo E10.4.3 foi de 72928,85. Esta solução se mostra menos vantajosa, pois a seqüência (óleo diesel, gasolina, QAV e GLP) apresenta custos de interface superiores em relação ao proposto pelo seqüenciamento de E10.4.1 (óleo diesel, gasolina, GLP e QAV) para o relevo utilizado pelo exemplo E10.4.1. Mesmo o GLP possuindo viscosidade cinemática e densidade inferiores às do QAV, os custos de interface são maiores e a economia gerada pelos custos de bombeamento não é suficiente para a geração de uma solução mais econômica.

Analogamente ao exemplo E10.4.3, o exemplo E10.4.4 é proposto, de forma que neste exemplo o duto é ativado nos mesmos intervalos de tempo que o exemplo E10.4.2. Todavia a refinaria alimenta o sistema seqüencialmente com gasolina, GLP e QAV. Note que o exemplo E10.4.2 propõe que a refinaria envie gasolina, QAV e GLP ao duto. A tabela 10.9 ilustra os resultados de E10.4.2 e E10.4.4.

Tabela 10.9 – Resultados comparativos para os exemplos E10.4.2 e E10.4.4

<i>Exemplos</i>	E10.4.2	E10.4.4
Solução Encontrada (x 10 <sup>-2</sup> \$)	81096,58	83146,91
Custos de Bombeamento (x 10 <sup>-2</sup> \$)	31437,78	40523,63
Custos de Interface (x 10 <sup>-2</sup> \$)	43000	36000
Custos de Estocagem na Refinaria (x 10 <sup>-2</sup> \$)	4261,69	4245,05
Custos de Estocagem nos Depósitos (x 10 <sup>-2</sup> \$)	2397,67	2378,23

A solução gerada pelo exemplo E10.4.4 foi de 83146,91. Esta solução se mostra mais onerosa, pois a seqüência (óleo diesel, gasolina, GLP e QAV) possui custos de bombeamento superiores em relação ao proposto pelo seqüenciamento de E10.4.2 (óleo diesel, gasolina, QAV e GLP) para o perfil topográfico utilizado pelo exemplo E10.4.2. As interfaces gasolina-QAV e QAV-GLP possuem custos somados menores do que os gerados pelo seqüenciamento gasolina-GLP e GLP-QAV. No entanto, os custos de bombeamento são consideravelmente maiores do que os propostos por E10.4.2 e a economia gerada pelas interfaces não é suficiente para a geração de uma solução mais vantajosa.

#### 10.4. Análise das restrições hidráulicas no scheduling dutoviário

Nesta seção, as formulações MINLP desenvolvidas no capítulo anterior são comparadas às formulações desenvolvidas no capítulo 7. Note que as formulações no capítulo 7 consideram as restrições de *scheduling* baseadas no modelo proposto por Rejowski Jr. e Pinto (2003) e os aspectos hidráulicos de maneira simplificada, contemplando apenas a restrição de rendimento das estações e a variação de vazão do sistema operacional através da variação da duração dos intervalos de tempo.

As formulações possuem diversas diferenças, além dos aspectos hidráulicos do sistema dutoviário. A função objetivo utilizada por cada modelo difere no termo de custo de bombeamento. A formulação apresentada no capítulo 7 considera que o custo unitário de bombeamento seja expresso em unidades de [ $\$/m^3$ ], denotado pelo parâmetro  $CP_{p,d,k}$ , para cada produto ( $p$ ), base de distribuição ( $d$ ) e intervalo de tempo ( $k$ ). Este termo da função objetivo deve representar o custo de envio de uma unidade de volume de cada produto à base de distribuição em cada intervalo de tempo. Desta forma, o custo unitário deve ser multiplicado pelo volume dos derivados que alimentam a base de distribuição ( $VOD_{p,d,k}$ ). O rendimento das estações de

bombeamento ( $\eta_k$ ) se faz presente no denominador deste termo da função objetivo, que varia com a vazão utilizada pelo sistema dutoviário. A formulação apresentada no capítulo 9 contempla todos os aspectos referentes ao perfil hidráulico do duto, calculando-os de forma rigorosa. O seu custo unitário de bombeamento, dado pelo parâmetro  $CP_k$ , que possui unidades em [\$/kWh], difere da formulação proposta no capítulo 7, por considerar a potência consumida pelas estações de bombeamento do sistema dutoviário e o intervalo de tempo em que as mesmas permanecem ligadas. Nesta formulação, os diferentes seqüenciamentos influenciam drasticamente as potências consumidas pelas estações devido às diferentes propriedades físico-químicas dos produtos envolvidos na operação de transporte.

As formulações ainda possuem diferenças na representação do tempo, apesar de ambas se basearem em semelhantes representações disjuntivas em tempo contínuo. Na formulação proposta no capítulo 7, a variável de duração do intervalo de tempo é desagregada em duas. A primeira toma valores positivos quando o duto é ativado, ao passo que a segunda somente toma valores positivos quando o sistema operacional permanece ocioso. Nesta formulação, a variável referente à vazão operacional ( $v_k$ ) não necessita ser definida, pois os volumes dos lotes são discretizados em valores constantes, dados pelo parâmetro  $U_d$ . A formulação do capítulo 9 utiliza esta variável e impõe que a primeira parcela da variável de duração do intervalo de tempo ( $\Delta_k^1$ ) respeite os valores de vazão operacional, de acordo com a restrição (9.3).

As comparações entre os valores fornecidos pelas respectivas funções objetivo podem levar a conclusões precipitadas entre os *schedules* propostos, devido às diferenças nas unidades dimensionais dos custos unitários de bombeamento. Desta forma, a figura 10.24 mostra um procedimento comparativo, onde a formulação que contempla as restrições referentes ao problema de *scheduling* e as simplificações dos aspectos hidráulicos é testada para um dado problema e posteriormente, os valores obtidos para algumas das variáveis são fixados no problema com as restrições de *scheduling* e os aspectos hidráulicos do sistema.

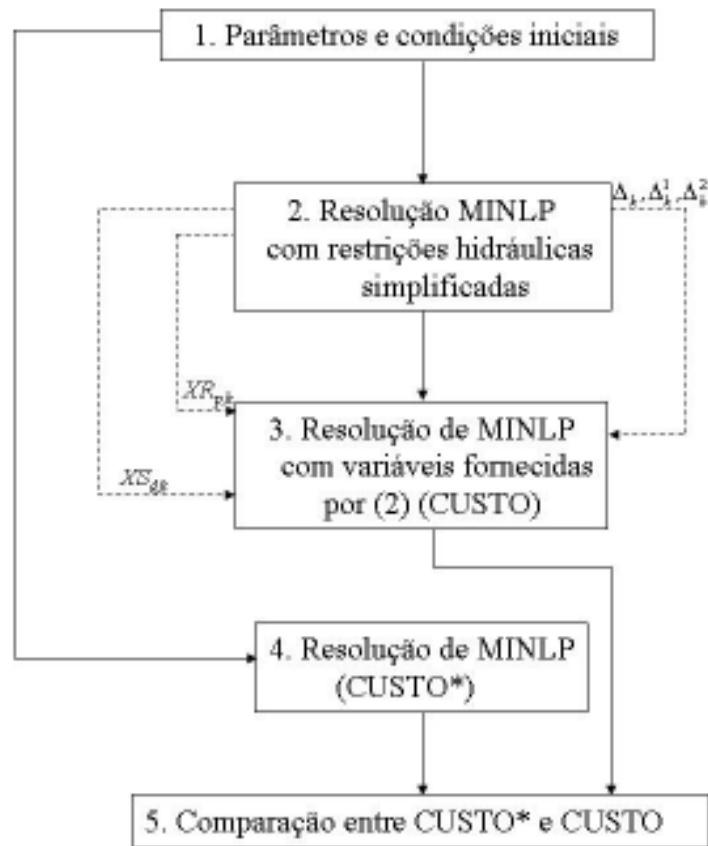


Figura 10.24 – Procedimento de comparação entre as formulações desenvolvidas no capítulo 7 e no capítulo 9

Segundo a figura 10.24, após a resolução do problema com as restrições hidráulicas simplificadas, os valores das variáveis  $XR_{p,k}$ ,  $XS_{d,k}$ ,  $\Delta_k$ ,  $\Delta_k^1$  e  $\Delta_k^2$  são fixados no modelo MINLP do capítulo 9. Este é resolvido e um valor para o custo operacional é gerado (CUSTO). Posteriormente, o modelo é novamente resolvido; contudo sem a inserção das referidas variáveis e um outro valor para o custo da operação é fornecido (CUSTO\*). Finalmente os seus valores são comparados a fim de verificar qual a melhor solução fornecida.

Desta forma, o exemplo E10.4.1 é revisitado para a aplicação deste procedimento comparativo. O exemplo E10.4.1SC utiliza o modelo simplificado, enquanto E10.4.1H utiliza o modelo MINLP proposto no capítulo 9, com as variáveis determinadas pelo exemplo E10.4.1SC, ilustradas pela figura 10.24. A tabela 10.10 ilustra os custos de bombeamento adotados para o exemplo E10.4.1SC, enquanto a tabela 10.11 mostra os resultados para os referidos exemplos.

Tabela 10.10 – Custos de bombeamento para o exemplo E10.4.1SC

<i>Produto</i>	$CP_{p,d,k}$ [ $\times 10^{-2}$ \$/m <sup>3</sup> ]
gasolina (1)	0,48
óleo diesel (2)	0,96
GLP (3)	0,36
QAV (4)	0,72

Tabela 10.11 – Resultados computacionais para os exemplos E10.4 – caso subótimo

<i>Exemplos*</i>	E10.4.1SC	E10.4.1H	E10.4.1
Solução Relaxada ( $\times 10^{-2}$ \$)	16938,58	76732,55	43159,39
Solução Encontrada ( $\times 10^{-2}$ \$)	81462,82	76732,55	72351,69
Custos de Bombeamento (%)	47,70	44,47	41,06
Custos de Interface (%)	44,20	46,92	49,76
Custos de Estocagem na Refinaria (%)	5,20	5,54	5,85
Custos de Estocagem nos Depósitos (%)	2,90	3,07	3,33
Variáveis Binárias	76	190	190
Variáveis Contínuas	1479	2011	2011

\*Resultados em uma plataforma *Pentium IV* 2.4 GHz 512 Mb RAM

O exemplo E10.4SC encontrou a solução do problema com um custo operacional de \$81462,82. Após a resolução de E10.4.1SC, as variáveis  $XR_{p,k}$ ,  $XS_{d,k}$ ,  $\Delta_k$ ,  $\Delta_k^1$  e  $\Delta_k^2$  são fixadas no modelo E10.4.1H. Este por sua vez, encontrou uma solução viável com custo operacional de \$76732,55. Este valor é 6,05% maior do que a pertencente ao exemplo E10.4.1. No presente caso, a seqüenciamento da alimentação dos produtos por parte da refinaria ao duto permanece inalterado, bem como os intervalos em que o duto é ativado. No presente caso, devido à simplificação das restrições hidráulicas, o modelo E10.4.1SC tende a maximizar o rendimento das estações de bombeamento. Apesar de o modelo utilizar a representação contínua do tempo, os intervalos em que o duto é ativado possuem duração igual e o sistema opera no seu ponto de vazão máxima, devido ao formato da curva de rendimento das estações ilustrada pela figura 10.4. Contudo, essa solução aplicada ao exemplo E10.4.1H leva a um consumo excessivo de energia por parte das estações de bombeamento. Desta forma, os modelos desenvolvidos no capítulo 7,



que levam em conta as restrições referentes ao problema de *scheduling* e simplificações das restrições hidráulicas, podem gerar soluções subótimas do problema do ponto de vista hidráulico.

Os modelos que consideram apenas as restrições do problema de *scheduling*, ou que apenas levam em conta as restrições hidráulicas simplificadas também podem levar a soluções inviáveis quando aplicadas ao modelo com as restrições hidráulicas. Para tanto, os exemplos E10.4.1 e E10.4.1H são revisitados, porém com as estações de bombeamento contando com apenas 2 estágios de bombeamento e com menores limites de potências utilizadas. A tabela 10.12 mostra os valores para estes limites para estes exemplos, intitulados de E10.4.1(2) e E10.4.1H(2). A tabela 10.13 mostra os resultados para este exemplo.

Tabela 10.12 – Valores para os limites de potência dos estágios das estações de bombeamento para o exemplo E10.4.1 – caso inviável

Potências	<i>n</i>	
	1	2
$PW_n^{LO}$ (kW)	200	400
$PW_n^{UP}$ (kW)	400	800

Tabela 10.13 – Resultados computacionais para os exemplos E10.4 – caso inviável

<i>Exemplos*</i>	E10.4.1SC	E10.4.1H(2)	E10.4.1(2)
Solução Relaxada	16938,58	Inviável	44095,07
Solução Encontrada	81462,82	Inviável	74134,79
Custos de Bombeamento (%)	47,70	X	32,99
Custos de Interface (%)	44,20	X	58,00
Custos de Estocagem na Refinaria (%)	5,20	X	5,73
Custos de Estocagem nos Depósitos (%)	2,90	X	3,28
Variáveis Binárias	76	190	190
Variáveis Contínuas	1479	2011	2011

\*Resultados em uma plataforma *Pentium IV* 2.4 GHz 512 Mb RAM

As limitações de potência e no número de estágios utilizados pelas estações de bombeamento do duto não causam nenhuma alteração no exemplo E10.4.1SC e em sua solução, devido a sua

formulação considerar as restrições hidráulicas de maneira simplificada. Contudo, o exemplo E10.4.1(2), que utiliza a formulação MINLP proposta no capítulo 9, não encontrou solução viável, pois os valores de vazão determinados pelo exemplo E10.4.1SC são elevados de maneira que os limites superiores dados pelo parâmetro  $PW_n^{UP}$  sejam violados.

### 10.5. Sumário

Neste capítulo diversos aspectos relativos às considerações hidráulicas são estudados, dentre eles:

- As duas formulações propostas no capítulo 9 são comparadas em termos computacionais e qualidade de soluções obtidas. Em todos os exemplos, a formulação MINLP gera melhores resultados computacionais, bem como *schedules* de melhor qualidade em relação à sua versão linear. A formulação MINLP possui a característica de representar o problema estudado utilizando um número inferior de variáveis em relação à MILP, além de otimizar o seqüenciamento dos produtos dentro do duto, as potências consumidas pelas estações, bem como os seus rendimentos. A formulação MILP otimiza as potências consumidas pelas estações de bombeamento apenas de acordo com o seqüenciamento dos produtos, uma vez que assume o rendimento e todos os parâmetros referentes aos aspectos hidráulicos como parâmetros constantes;
- Variações no perfil topográfico do sistema dutoviário podem afetar significativamente diversas variáveis dos modelos propostos. Primeiramente, foram detectadas alterações na vazão de operação do sistema dutoviário, na escolha dos intervalos de tempo em que o sistema é ativado, no rendimento das estações de bombeamento e no tempo total de operação do sistema. Os exemplos considerados mostram que os sistemas dutoviários tendem a operar as suas estações de bombeamento nos pontos de rendimento máximo e de acionar o duto o menor tempo possível, quanto mais acentuadas forem as variações no relevo. Posteriormente, em um outro exemplo, é mostrado que variações no relevo também podem alterar o ordenamento dos produtos alimentados pela refinaria ao duto, e;
- Por fim, destaca-se a importância da consideração das restrições hidráulicas no problema de *scheduling* de distribuição dutoviária. Os modelos de *scheduling* de sistemas dutoviários que consideram as restrições hidráulicas de maneira simplificada podem levar a soluções subótimas e até mesmo inviáveis para o referido sistema, evidenciando desta forma a importância da consideração destas restrições nos modelos de operações dutoviárias.

## **11. Conclusões**

### *11.1. Comentários gerais*

O trabalho proposto aborda diversos tópicos referentes ao problema de *scheduling* de distribuição dutoviária, dentre eles os seguintes:

- Desenvolvimento de uma formulação generalizada para o problema de *scheduling* de distribuição dutoviária de derivados de petróleo, inicialmente proposto por Rejowski Jr. e Pinto (2003);
- Desenvolvimento e incorporação a esta formulação de um conjunto de restrições que considera a contaminação dos produtos dentro da linha dutoviária e de cortes inteiros baseados em relações lógicas entre as demandas estabelecidas pelos mercados consumidores e os estoques iniciais dentro de cada respectivo segmento do duto;
- Desenvolvimento de uma formulação MINLP para o referido problema baseada em uma representação contínua do tempo, que leva em conta variações das taxas de vazão do duto e de rendimento das estações de bombeamento do mesmo;
- Desenvolvimento de formulações para o presente problema que incorporam de forma rigorosa os aspectos hidráulicos do sistema dutoviário. As formulações calculam os perfis hidráulicos dos produtos ao longo do duto e as potências consumidas suas pelas estações de bombeamento.

A seguir é apresentado um sumário do trabalho, bem como as suas principais contribuições e propostas de continuação de desenvolvimento do mesmo.

### *11.2. Sumário da Tese*

#### *11.2.1. Introdução*

Uma revisão dos principais trabalhos referentes ao *scheduling* de sistemas dutoviários foi realizada sob dois aspectos. O primeiro se refere à influência da operação de refinarias e depósitos de estocagem intermediária e final de petróleo e de seus derivados na operação de dutos e oleodutos. O segundo aspecto considera as principais formulações e estratégias de solução para o referido problema.

- Trabalhos referentes à programação de atividades operacionais em refinarias de petróleo e em sistemas de distribuição de bens de consumo. Buscou-se analisar uma cadeia de suprimentos de petróleo que considere sistemas operacionais que se conectem aos dutos e oleodutos. Nesta seção do trabalho, é mostrado que o consumo de petróleo nas refinarias bem como o consumo de derivados nos mercados consumidores influenciam a operação dos dutos e dos oleodutos. Finalmente, é concluído que o planejamento e o *scheduling* integrados de refinarias, de depósitos de estocagem intermediária e final de petróleo e derivados, bem como dos oleodutos ainda permanecem como um desafio para a Comunidade Acadêmica e para a Indústria Petrolífera;
- Diversas estratégias para a modelagem e a solução do problema de *scheduling* de operações dutoviárias são citadas. Com relação à solução do referido problema, duas estratégias de resolução são comumente utilizadas. A primeira se baseia na decomposição do problema, com a vantagem de reproduzir os problemas com um nível de detalhamento elevado. Por outro lado, esta estratégia é capaz de somente gerar soluções de boa qualidade devido ao compartilhamento de recursos por parte dos diversos sistemas operacionais que são decompostos nesta metodologia. A segunda estratégia considera a formulação do presente problema em um modelo matemático unificado. Esta estratégia é capaz de reproduzir soluções ótimas, no caso de os modelos serem convexos, porém a mesma é limitada pelo aspecto combinatório devido ao grande número de variáveis discretas dos modelos gerados. Com relação à modelagem deste problema, foi verificado que diversos modelos gerados são capazes de retratar *schedules* de operações dutoviárias contínuas. Os trabalhos referentes ao funcionamento intermitente de dutos e oleodutos são também desenvolvidos, porém em um número menor, devido a sua maior complexidade. Finalmente, a variável tempo é considerada, onde a sua representação discreta e a contínua são mostradas. A primeira gera modelos de fácil entendimento, porém com limitações operacionais, enquanto a última citada é capaz de gerar formulações mais precisas, mas com um grau elevado de entendimento.

### 11.2.2. O Problema de distribuição dutoviária de derivados de petróleo

O problema de distribuição dutoviária de derivados de petróleo foi detalhadamente descrito a partir do sistema da Petrobras composto pela refinaria REPLAN, pelo duto OSBRA e pelas bases de distribuição conectadas ao mesmo. Também foram abordados aspectos operacionais de

transferência. Os principais tópicos abordados relacionados ao *scheduling* do referido problema foram os seguintes:

- A refinaria não se dedica totalmente ao duto. Ela possui diversos outros tanques que são dedicados a outros mercados. A taxa de produção é um parâmetro utilizado nos modelos propostos neste trabalho. Como é permitido tanto na refinaria quanto nas bases de distribuição o alinhamento de apenas um tanque ao duto, os modelos trataram os tanques como capacidades agregadas em uma determinada localidade do sistema;
- As bases de distribuição devem satisfazer os requisitos dos mercados consumidores e os seus tanques podem estar ativados para este fim em qualquer instante de tempo;
- Os segmentos do duto devem permanecer sempre preenchidos ao longo da operação de transporte de derivados. Alguns dos segmentos podem permanecer inoperantes no decorrer da transferência, e;
- O seqüenciamento de produtos dentro dos segmentos do duto é restrito.

Com relação aos tópicos sobre o comportamento hidráulico do duto, destacam-se os seguintes:

- O duto possui estações de bombeamento que são responsáveis pelo suprimento de energia aos fluidos, pois estes sofrem perdas ao adentrarem a linha dutoviária. As variáveis de energia podem ocorrer através de diversas formas, dentre elas a cinética, a potencial e a decorrente do atrito dos fluidos com a parede do sistema dutoviário. Para o sistema OSBRA em particular, as duas últimas compõem as parcelas mais significativas de perdas de energia;
- As estações de bombeamento são compostas por diversos estágios que podem ser conectados em série ou em paralelo. Estas estações se localizam na refinaria (estação inicial) e em um ou mais pontos do duto (estações intermediárias). As diversas configurações fornecem diferentes ganhos de pressão aos produtos e valores para as vazões de operação do duto. Elas ainda podem trabalhar sob diferentes valores de rendimentos, sendo este um fator crucial para a operação dutoviária, e;

- O seqüenciamento dos produtos dentro da linha dutoviária também afeta a operação de transporte, pois estes determinam diferentes perdas de carga para o sistema, devido às diferenças nas características físico-químicas dos produtos. Pode-se analisar a influência dos produtos nas curvas de operação do sistema através dos valores assumidos pelas viscosidades cinemáticas, dadas pelo quociente entre as respectivas viscosidades dinâmicas e as densidades.

### 11.2.3. Modelagem do problema de distribuição dutoviária de derivados de petróleo

A modelagem do referido problema foi composta pelos seguintes tópicos:

- Foi proposta inicialmente uma formulação generalizada para o problema de *scheduling* de operações dutoviárias, baseada na proposta inicialmente por Rejowski Jr. e Pinto (2003). No presente caso, as disjunções originalmente enunciadas pelos referidos autores são reformuladas em função de variáveis lógicas;
- Restrições especiais foram incorporadas a esta formulação que impõem paradas na operação de transferência dos derivados a um dado segmento apenas se o mesmo não contenha interface ao longo de sua extensão. Apesar dos bons resultados gerados pelos modelos de Rejowski Jr. e Pinto (2003), os modelos devem levar em consideração tais restrições para evitar que os produtos dentro da linha atinjam um grau de contaminação elevado. Estas restrições especiais foram formuladas de duas maneiras distintas e ambas tiveram os seus desempenhos computacionais comparados para os casos propostos;
- Cortes inteiros, denominados de cortes de entrega, foram propostos que impõem um número mínimo de vezes que os segmentos do duto devem ser ativados durante o horizonte de tempo operacional. Estes cortes são baseados em relações lógicas entre os estoques iniciais dentro de um dado segmento do duto e das demandas estabelecidas pelo respectivo mercado consumidor. Ao todo, são enumeradas 6 situações operacionais que geram estes limites válidos para os problemas;

- As restrições especiais de contaminação dos produtos e as relativas ao atendimento das demandas nas bases de distribuição ao final do horizonte de tempo foram relaxadas de maneira a penalizar as respectivas condições operacionais. Para tanto, penalidades pelo não cumprimento destas condições operacionais foram incluídas na função objetivo do problema proposto;
- Uma formulação MINLP com representação em tempo contínuo e que leva em consideração as variações de vazão do duto ao durante a operação foi proposta. Esta formulação considera aspectos hidráulicos do duto de maneira simplificada, assim como as variações das taxas de rendimento das estações de bombeamento do duto com a vazão utilizada;
- Uma formulação MINLP que calcula os aspectos hidráulicos do sistema dutoviário de maneira rigorosa foi proposta. O objetivo principal desta formulação é o de contabilizar o balanço de energia nos mesmos, através das potências consumidas pelas estações de bombeamento e das variações de pressão que os produtos sofrem ao longo da linha dutoviária, e;
- Uma formulação MILP que considera os aspectos hidráulicos do sistema dutoviário de maneira rigorosa foi proposta. No caso, todas as não linearidades referentes aos aspectos hidráulicos são tratadas no cálculo de parâmetros. Esta formulação ainda considera que os aspectos hidráulicos do sistema dutoviário sejam dependentes exclusivamente dos diferentes seqüenciamentos possíveis entre os diversos produtos a serem bombeados ao longo da operação.

#### *11.2.4. Resultados e discussões dos modelos propostos*

Os resultados e discussões dos modelos propostos foram compostos pelos seguintes tópicos:

- Foram verificados os impactos das restrições especiais e dos cortes de entrega na formulação originalmente proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003). Para tanto, estas alterações foram analisadas em cenários de baixas, médias e de altas demandas estabelecidas pelos mercados consumidores. As restrições especiais reduziram a região viável do problema e a sua solução ótima é superior à do valor para uma solução viável da formulação originalmente proposta.

Isto pois, sempre que uma interface é detectada, o duto é obrigado a operar, mesmo que as demandas já tenham sido satisfeitas. Os cortes de entrega propostos melhoraram drasticamente o desempenho computacional para os modelos propostos que consideram as restrições especiais em cenários de demandas altas. Em cenários de demandas baixas, onde os problemas possuem fácil grau de resolução, eles não promovem nenhuma alteração. Porém, quando aplicado a cenários de demandas médias, o seu impacto foi negativo, devido à pequena melhora no valor da solução relaxada dos problemas e também à inserção de restrições adicionais na presente formulação. Cabe ressaltar que para casos de altas demandas, a melhora atingida com os cortes de entrega foi de até 84%. Estes cortes ainda foram testados na formulação originalmente proposta por Rejowski Jr. e Pinto (2003) sem levar em conta as restrições especiais para se verificar o quanto as soluções viáveis encontradas poderiam ser melhoradas. Observou-se que mesmo com os cortes de entrega, as soluções ótimas dos problemas originais não foram encontradas no limite do tempo computacional estipulado, porém soluções de melhor qualidade foram encontradas. A forma decomposta das restrições especiais foi testada nos principais exemplos propostos e apesar desta fornecer melhores valores para a relaxação dos problemas, concluiu-se que as mesmas não afetam significativamente o desempenho computacional da formulação proposta;

- Uma nova formulação que impõe modificações nas restrições especiais e no atendimento das demandas é proposta. As modificações nas restrições especiais resultam em penalidades na operação dutoviária quando os segmentos do duto param de movimentar os produtos com uma interface nos seus interiores, em lugar da sua proibição conforme proposta inicialmente pelas restrições especiais. A segunda modificação considera penalidades na operação dutoviária devido ao atraso no atendimento das demandas por parte dos clientes. Esta nova formulação possui um maior grau de complexidade com relação às propostas anteriormente. As soluções mostram que as regiões viáveis dos problemas são consideravelmente maiores em relação às das formulações com as restrições especiais. A solução do exemplo proposto se mostrou no máximo 5,4% distante da solução ótima do problema. Por fim, uma análise do efeito das demandas não atendidas ao final do horizonte de tempo é proposta. Este contexto operacional faz com que restrições ao atendimento da demanda sejam claramente identificadas, como limitações de estoque nas bases, incapacidade de distribuição da linha dutoviária e limitações de alimentação no atendimento aos mercados consumidores;



- Com relação à formulação MINLP baseada na representação em tempo contínuo com considerações hidráulicas simplificadas, foram apresentados diversos exemplos de *scheduling* de operações dutoviárias. Primeiramente, a formulação MINLP foi comparada à formulação MILP em tempo discreto com vazões e rendimentos fixos proposta previamente por Rejowski Jr. e Pinto (2004). Os exemplos mostraram que o MINLP forneceu soluções de melhor qualidade que aquelas da formulação MILP previamente proposta. Ainda foi verificado que a formulação MILP em tempo discreto é um caso particular da presente formulação proposta. Posteriormente, a influência do número de intervalos de tempo foi estudada. Finalmente, uma comparação de diversas configurações de bombeamento foi realizada e constatou-se que estas fornecem soluções com custos distintos bem como *schedules* diferentes para a operação dutoviária;
- As duas formulações propostas para o *scheduling* de sistemas dutoviários que consideram os seus aspectos hidráulicos de forma rigorosa são comparadas em termos computacionais e qualidade de soluções obtidas. Em todos os exemplos, a formulação MINLP gerou melhor desempenho computacional bem como *schedules* de melhor qualidade em relação à sua versão linear. A formulação MINLP possui a característica de representar o problema estudado utilizando um número inferior de variáveis em relação à MILP, além de otimizar o seqüenciamento dos produtos dentro do duto, as potências consumidas pelas estações, bem como os seus rendimentos. Por outro lado, a formulação MILP é somente capaz de otimizar as potências consumidas pelas estações de bombeamento de acordo com o seqüenciamento dos produtos, pois considera o rendimento e todos os parâmetros referentes aos aspectos hidráulicos como parâmetros. As variações no perfil topográfico do sistema dutoviário afetam diversas variáveis operacionais dos modelos propostos. Primeiramente, foram detectadas alterações na vazão de operação do sistema dutoviário, na escolha dos intervalos de tempo em que o sistema é ativado, no rendimento das estações de bombeamento e no tempo total de operação do sistema. Posteriormente, foi mostrado que variações no relevo também podem modificar o ordenamento dos produtos alimentados pela refinaria ao duto. No exemplo ilustrado, um relevo menos acentuado gera um *schedule* onde o sistema prioriza a minimização dos custos de interface, enquanto um perfil topográfico com maiores elevações cria uma operação na qual o produto com menores viscosidade cinemática e densidade seja bombeado pelo maior número de intervalos quando o duto se mostra operacional.

### 11.3. Contribuições do trabalho

Este trabalho fornece as seguintes contribuições para o estudo do *scheduling* de sistemas de distribuição dutoviária:

- Os modelos matemáticos propostos neste trabalho permitem o modo de operação intermitente do duto, ou seja, que ocorram paralisações totais ou parciais do mesmo durante a operação de transporte dos derivados de petróleo;
- Restrições especiais que impõem uma interrupção ao funcionamento dos segmentos do duto no caso de os mesmos não possuírem interfaces ao longo de sua extensão. Estas restrições consideram as interfaces presentes no início da operação, a extensão do duto e o número de intervalos de tempo determinado para a operação. Desta forma, se assegura que em qualquer circunstância, os segmentos duto operem quando uma interface é detectada durante a operação dutoviária;
- Cortes inteiros, denominados de cortes de entrega. Estes impõem limites inferiores válidos para o número mínimo de intervalos de tempo em que os segmentos do duto devem operar ao longo do horizonte de tempo operacional. Estes são baseados em relações lógicas das demandas dos produtos e dos estoques iniciais dos respectivos segmentos do duto. Melhorias de até 84% foram atingidas com a incorporação destes cortes no referido problema em cenários de demandas altas;
- Estudo de penalidades para as paradas do sistema dutoviário contendo interfaces e pelo não atendimento das demandas estipuladas ao final do horizonte de tempo;
- Desenvolvimento de uma formulação MINLP baseada na representação em tempo contínuo que permite variações na vazão de operação ao longo da operação de transferência dos produtos. A formulação também incorpora aspectos hidráulicos de maneira simplificada do duto através da consideração de variações das taxas de rendimento das estações de bombeamento com a vazão de operação do duto;
- Desenvolvimento de uma representação disjuntiva da variável tempo, que incorpora o funcionamento intermitente do duto. Tal formulação permite que variações na vazão de

operação do duto sejam representadas sem que tais variáveis sejam declaradas na formulação;

- A formulação baseada na representação em tempo contínuo proposta permitiu que operações dutoviárias mais longas fossem tratadas. Nos trabalhos desenvolvidos previamente por Rejowski Jr. e Pinto (2003) e Rejowski Jr. e Pinto (2004) os horizontes operacionais tratados eram de 75 horas, enquanto os exemplos apresentados neste trabalho tratam de operações de 90 horas e de 120 horas;
- Foi demonstrado que a formulação MILP previamente desenvolvida por Rejowski Jr. e Pinto (2004) com representação em tempo discreto e taxas de vazão e de rendimento fixas é um caso particular da formulação MINLP em tempo contínuo com taxas de vazão e de rendimento variável;
- Mostrou-se que as diferentes configurações assumidas pelas estações de bombeamento do duto influenciam o custo da operação dutoviária, bem como o *schedule* gerado para a presente operação;
- Duas formulações para o *scheduling* de operações dutoviárias com aspectos hidráulicos tratados de maneira rigorosa foram desenvolvidas. Mostrou-se que as considerações hidráulicas se fazem absolutamente necessárias devido às grandes variações no consumo de energia das estações de bombeamento e dos seus custos unitários. Desta forma, os ganhos proporcionados por estas formulações no *scheduling* de sistemas dutoviários se mostram significativos;
- Variações no perfil topográfico dos sistemas dutoviários possuem um grande impacto no *scheduling* destes sistemas. Foram notadas alterações na vazão de operação do sistema dutoviário, na escolha dos intervalos de tempo em que o sistema é ativado, no rendimento das estações de bombeamento e no seu tempo total de operação. Estas variações no relevo ainda podem modificar o ordenamento dos produtos alimentados pela refinaria ao duto;
- A importância da consideração das restrições hidráulicas no problema de *scheduling* de distribuição dutoviária é mostrada através da comparação dos resultados da formulação MINLP com aqueles gerados pela formulação que contém as restrições hidráulicas de

maneira simplificada. Para o presente caso, estas simplificações podem gerar *schedules* subótimos e até mesmo inviáveis para o referido sistema.

#### 11.4. Propostas de continuação do trabalho

As propostas de desenvolvimento do trabalho são as seguintes:

- Estudo de variações periódicas do custo unitário de bombeamento na formulação MINLP. No Brasil, os custos unitários de bombeamento dos dutos sofrem diariamente variações drásticas no horário compreendido entre 17 e 20 horas. Neste horário, o valor do custo unitário sobe até 5 vezes em relação ao valor nominal e desta forma, é desejável que o duto não opere nestes horários;
- Estudo de perfis de produção mais complexos na refinaria. Cabe ressaltar que este é um fator crítico, pois as temporizações devem satisfazer tanto os descarregamentos efetuados para o duto como os carregamentos dos lotes de produção enviados pela produção da refinaria;
- Desenvolvimento de algoritmos e métodos de resolução alternativos para os referidos problemas;
- Consideração de custos de parada para o sistema dutoviário na formulação com considerações hidráulicas. Estes custos devem contemplar as pressões de vapor dos produtos situados na linha dutoviária e o tempo pelo qual o sistema os estoca;
- Aplicação de formulações com considerações hidráulicas a sistemas dutoviários com múltiplas bases de distribuição;
- Aplicação de métodos de otimização global às formulações MINLP desenvolvidas neste trabalho;
- Desenvolvimento de uma formulação para o *scheduling* de sistemas dutoviários sem a discretização da linha dutoviária em lotes de igual capacidade volumétrica. Cabe ressaltar que a formulação deve considerar o regime intermitente do sistema operacional;

Espera-se que este trabalho mostre a evolução da área referente às operações de sistemas dutoviários. Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos recentemente em relação a esta complexa

operação, contribuindo desta forma para que estes sejam modelados da melhor forma bem como eles sejam resolvidos de maneiras eficazes. Cabe ressaltar que este trabalho é pioneiro na literatura de Engenharia de Sistemas de Processos e o único que mostra de maneira detalhada o *scheduling* de operações dutoviárias intermitente e que ainda incorpora os aspectos hidráulicos do sistema. Finalmente, espera-se que este trabalho agregue informações e metodologias sistemáticas e eficientes para a pesquisa do funcionamento de dutos multiproduto, pois acredita-se que este assunto possa ser pesquisado com diversas abordagens distintas.

## 12. Referências Bibliográficas

- Ahuja, R.K., Magnanti, T.L., Orlin, J.B. **Network flows: theory, algorithms, and applications**. Englewood Cliffs (EUA), Prentice-Hall, 1995.
- Ballintijn, K. Optimization in Refinery Scheduling: Modeling and Solution. In: **Optimization in Industry**, v. 1, p.191-199, John Wiley & Sons, Nova Iorque, EUA. 1993.
- Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A. **GAMS- A User's Guide (Release 2.50)**. The Scientific Press. Redwood City, EUA. 2000.
- Cafaro, D. C., Cerdá, J. Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete MILP formulation. **Computers & Chemical Engineering**, v.28, p.2053-2068. 2004.
- Chen, N. H. An explicit equation for friction factor in pipe. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v.18, p.296-297. 1979.
- Churchill S. W. Friction factor equation spans all fluid regimes. **Chemical Engineering**, v.84, p.91-92. 1977.
- Coutinho, E. M. B. G.; Gomes A. C. S.; Faria, E. A. S. T.; Fernandes, H. H. O. **Os novos agentes na exploração e produção do petróleo no Brasil**. Informe Infra-Estrutura - BNDES, **49**. 2000.
- Drud, A. S. CONOPT - A large-scale GRG code. **ORSA Journal Computing**. v.6, p.207-216. 1992.
- Escudero, L., Quintana, F., Salmerón, J. CORO, a Modeling and an Algorithmic Framework for Oil Supply, Transformation and Distribution Optimization Under Uncertainty. **European Journal of Operational Research**, v.114, p.638-656. 1999.
- Hane, C.A. & Ratliff, H.D. Sequencing inputs to multi-commodity pipelines. **Annals of Operations Research**, v.57, p.73-101. 1995.
- IBM. IBM-OSL guide and reference. Kingston, EUA. 1991.
- ILOG* Cop. **ILOG Cplex User's Manual**. Gentilly, Cedex, França. 2000.

- Jackson, J., Grossmann, I. E. Temporal decomposition scheme for nonlinear multisite production planning and distribution models. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v.42, p.3045-3055. 2003.
- Jia, Z., Ierapetritou, M. Efficient short-term scheduling of refinery operations based on a continuous time formulation. **Computers & Chemical Engineering**, v.28, p.1001-1019. 2004.
- Joly, M. **Técnicas de Otimização Mista-Inteira para o Scheduling e Gerenciamento da Produção em Refinarias de Petróleo**. São Paulo (SP) - 195p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 1999.
- Joly, M., Pinto, J. M. Mixed-integer programming techniques for the scheduling of fuel and asphalt production. **Chemical Engineering Research and Design**, v.81, p.427-447. 2003.
- Jones, W. M. C.; Paddock, K. F. Transport by Pipeline. In: Hobson, G.D. **Modern Petroleum Technology** 5<sup>th</sup> Edition Part I London (Inglaterra), John Wiley & Sons. p.225-229. 1982.
- Kallrath, J. Mixed integer optimization in the chemical process industry. **Chemical Engineering Research and Design**, v.78, p.809-823. 2000.
- Katzer, J. R., Ramage, M. P., Sapre, A. V. Petroleum refining: poised for profound changes. **Chemical Engineering Progress**, v.96, p.41-51. 2000.
- Kelly, J. D., Mann, J. L. Crude oil blend scheduling optimization: an application with multimillion dollar benefits-Part 1. **Hydrocarbon Processing**, Junho, p.47-53. 2003.
- Lee, H., Pinto, J. M., Grossmann, I. E.; Park, S. Mixed-Integer Linear Programming Model for Refinery Short-Term Scheduling of Crude Oil Unloading with Inventory Management. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v.35, p.1630-1641. 1996.
- Magalhães, V., Shah, N. Crude Oil Scheduling. In: Grossmann, I. E., McDonald C. M., **Proceedings of fourth international conference on foundations of computer-aided process operations**. Coral Springs (EUA), CAChE. p. 323–326. 2003.

- 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.
- Maravelias, C. T., Grossmann, I. E. New general continuous time state – task network formulation for short-term scheduling of multipurpose batch plants. **Industrial Engineering & Chemistry Research**, v. 42, p. 3056-3074. 2003
- Más, R. - **Técnicas de Otimização para a Distribuição de Petróleo**. São Paulo (SP) - 195p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2001.
- Más, R., Pinto, J. M. A mixed integer optimization strategy for oil supply in distribution complexes. **Optimization & Engineering**, v. 4, p. 23-64. 2003.
- McDonald, C. M., Reklaitis, G. V. Design and Operation of Supply Chains in Support of Business and Financial Strategies. In: Floudas, C.A., Agrawal R. **Proceedings of fourth international conference on foundations of computer-aided process design**. Princeton (EUA), CACHÉ, p. 1-19. 2004.
- Moro, L. F. L. Process technology in the petroleum refining industry – current situation and future trends. **Computers & Chemical Engineering**, v. 28, p.1303-1305. 2003.
- Moro, L. F. L., Pinto, J. M. A mixed integer programming approach for short term crude oil scheduling. **Industrial Engineering & Chemistry Research**, v. 43, p.85-94. 2004.
- Neiro, S., Pinto, J. M. A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains. **Computers & Chemical Engineering**, v. 28, p.871-896. 2004.
- Pinto, J. M., Joly; M., Moro; L. F. L. Planning and Scheduling Models for Refinery Operations. **Computers & Chemical Engineering**, v.24, p.2259- 2276. 2000.
- Pinto, J. M.; Grossmann, I. E. Assignment and Sequencing Models for the Scheduling of Process Systems. **Annals of Operations Research**, v.81, p.4433-4466. 1998.
- Raman, R.; Grossmann, I. E. Modelling and Computational Techniques for Logic Based Integer Programming. **Computers & Chemical Engineering**, v.7, p.563-578. 1994.



- Reddy, P. C. P., Karimi, I. A., Srinivasan, R. A new continuous-time formulation for scheduling crude oil operations. **Chemical Engineering Science**, v.59, p.1325-1341. 2004.
- Rejowski Jr., R. **Programação de Distribuição Dutoviária de Derivados de Petróleo**. São Paulo (SP) - 145p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2001.
- Rejowski Jr., R., Pinto, J. M. Efficient MILP formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling. **Computers & Chemical Engineering**, v. 28, p.1511-1528. 2004.
- Rejowski Jr., R., Pinto, J. M. Scheduling of a multiproduct pipeline system. **Computers & Chemical Engineering**, v. 27, p.1229-1246. 2003.
- Sasikumar, M., Prakash, P. R., Patil, S. M., Ramani, S. PIPES: A Heuristic Search Model for Pipeline Schedule Generation. **Knowledge - Based Systems**, v.10, p.169-175. 1997.
- Shah, N. Mathematical Programming Techniques for Crude Oil Scheduling. **Computers & Chemical Engineering**, v.20, p.1227-1232. 1996.
- Techo, R., Holbrook, D.L. Computer Scheduling The World's Biggest Product Pipeline. **Pipeline and Gas Journal**, v.4, p.27-32. 1974.
- Van den Heever, S. A., Grossmann, I. E. A strategy for the integration of production planning and reactive scheduling in the optimization of a hydrogen supply network. **Computers & Chemical Engineering**, v. 27, p.1813-1839. 2003.
- Vecchietti, A., Lee, S., Grossmann, I. E. Modeling of discrete/continuous optimization problems: characterization and formulation of disjunctions and their relaxations. **Computers & Chemical Engineering**, v. 27, p.433-448. 2003.
- Viswanathan, J., Grossmann, I. E. A Combined Penalty Function and Outer Approximation Method for MINLP. **Computers & Chemical Engineering**, v.14, n.7, p.769-778. 1990.
- Wenkai, L., Hui, C., Hua, B., Tong, Z. Scheduling crude oil unloading, storage and processing. **Industrial Engineering & Chemistry Research**, v. 41, p.6723-6734. 2004.
- Williams, H. P. **Model Building in Mathematical Programming**. John Wiley & Sons. New York, EUA. 1995.



### **Apêndice I - Trabalhos publicados em congressos e em periódicos**

O presente trabalho gerou os seguintes artigos em congressos:

- Rejowski Jr., R., Pinto, J. M. Programação Operacional de Dutos Multi-produtos. In: **XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, 2002, Natal. Anais do XIV COBEQ. São Paulo: Abeq, 2002.
- Rejowski Jr., R., Pinto, J. M. Efficient MILP Formulations for Multiproduct Pipeline Scheduling. In: **8th International Symposium on Process Systems Engineering**, 2003, Kunming. Computer Aided Process Engineering. Amsterdam : Elsevier, 2004.
- Rejowski Jr., R., Pinto, J. M. Mixed-Integer Programming Formulations for Multiproduct Pipeline Scheduling: Valid Cuts and Hydraulic Considerations. In: **2003 AIChE Annual National Meeting**, 2003, San Francisco. Proceedings of the 2003 AIChE. Nova Iorque : AIChE, 2003.
- Rejowski Jr., R., Pinto, J. M. A Novel Continuous Time Formulation for Multiproduct Pipeline Scheduling with Hydraulic Considerations. In: **2004 AIChE Annual National Meeting**, 2004, Austin. Proceedings of the 2004 AIChE. Nova Iorque : AIChE, 2004.
- Rejowski Jr., R., Pinto, J. M. The Simultaneous Scheduling and Operation of Multiproduct Pipeline Systems. In: **15th European Symposium on Computer Aided Process Engineering**, 2005, Barcelona: Elsevier, 2005.

O trabalho ainda gerou os seguintes artigos em periódicos:

- Rejowski Jr., R., Pinto, J. M. Efficient MILP formulations and Valid Cuts for Multiproduct Pipeline Scheduling. **Computers and Chemical Engineering**, Estados Unidos, v. 28, p. 1511-1528, 2004.
- Rejowski Jr., R., Pinto, J. M. A Novel Continuous Time Representation for the Scheduling of Pipeline Systems with Pumping Yield Rate Constraints. **Submetido à revista Computers and Chemical Engineering**, Estados Unidos.

- Rejowski Jr., R., Pinto, J. M. Scheduling of Pipeline Systems with Rigorous Hydraulic Constraints. **Em elaboração.**
- Pinto, J. M., Rejowski Jr., R., Neiro, S.M. Optimization-Based Approaches for Scheduling, Planning and Supply Chain Management in the Oil Industry. In: Papageorgiou, Georgiadis (Eds.): **Supply Chain Optimization Volume 4: Part II.** Inglaterra, 2007.