

## 2

### **Transporte em polidutos e abordagens para seu planejamento**

Este capítulo descreve o problema de transporte em polidutos de forma geral, introduzindo sua estrutura e nomenclatura, realizando logo após uma revisão das abordagens encontradas na literatura para a sua solução. Esta forma de apresentação permite que as abordagens sejam comparadas de forma mais sistemática, já que inerente a elas estão simplificações do problema original cujo impacto deve ser considerado. Além disso, como o problema possui diversas facetas, é importante sempre ter em mente quais aspectos do mesmo foram considerados em cada abordagem. Finalmente, o Capítulo apresenta como a abordagem proposta nesta tese posiciona-se em relação às existentes, incluindo a motivação pelo uso de técnicas de IA, simuladores a eventos discretos e arcabouços de software.

#### 2.1

##### **Oleodutos, polidutos e gasodutos**

Oleodutos são o meio mais eficiente para o transporte de grandes quantidades de petróleo e de seus derivados por grandes distâncias. Cabe neste ponto diferenciar as redes de polidutos, que são o objeto principal da análise desta tese, de outras modalidades de transporte, dentro e fora da indústria de petróleo, que também utilizam dutos.

Um poliduto, por definição, é capaz de transportar mais de um produto. Em nosso caso, estes produtos podem ser petróleo e seus derivados, como gasolina, diesel, querosene, etc. A possibilidade de transporte de diversos produtos carrega consigo a necessidade de decisão, durante a operação do poliduto, de quais produtos devem ser movimentados em um determinado momento, ou seja, de como os produtos são seqüenciados dentro do poliduto. Já outros dutos comumente utilizados na indústria carregam um produto apenas, como por exemplo os dutos que ligam as

plataformas de exploração *offshore* à costa e os dutos que efetuam a distribuição de água.

Existem também redes de dutos que são responsáveis pela distribuição de produtos em estado gasoso, os gasodutos. A principal diferença destas redes para as redes de polidutos, que transportam sempre produtos em estado líquido, está na forma de como o balanço de massa do duto se comporta. Como os polidutos operam sempre pressurizados, ou seja, completamente cheios de líquido, o bombeamento de uma quantidade de líquido em uma extremidade do poliduto tem como consequência a saída, em sua outra extremidade, da mesma quantidade bombeada. Isto não é verdadeiro no caso dos gasodutos.

Redes de polidutos tratadas nesta tese trabalham com o conceito de produtos fungíveis ou intercambiáveis, onde não existe distinção entre volumes de um mesmo produto distribuídos pela rede. Este tipo de rede opera como uma espécie de banco, no qual o papel moeda físico que é depositado provavelmente não é o mesmo que é retirado, mas é equivalente já que é intercambiável. Em um poliduto com produtos fungíveis, o mesmo conceito aplica-se em relação aos produtos [12]. Por exemplo, uma demanda por gasolina pode ser atendida por qualquer volume de gasolina contida no poliduto, independente de sua origem.

Como o escopo desta tese restringe-se ao caso de redes de polidutos, e para facilitar a leitura do texto, nos referiremos daqui em diante aos polidutos como oleodutos ou simplesmente dutos.

## 2.2

### **O processo de transporte em oleodutos**

Esta Seção descreve o processo de transporte em oleodutos de forma genérica. Todos os componentes e conceitos envolvidos no processo são apresentados, definindo o jargão e a simbologia que são utilizados no decorrer da tese.

#### 2.2.1

##### **Redes de oleodutos**

Uma rede de oleodutos é composta por quatro elementos principais: áreas, dutos, produtos e tancagens. Um exemplo de rede de oleodutos pode ser visto na Figura 2.1.

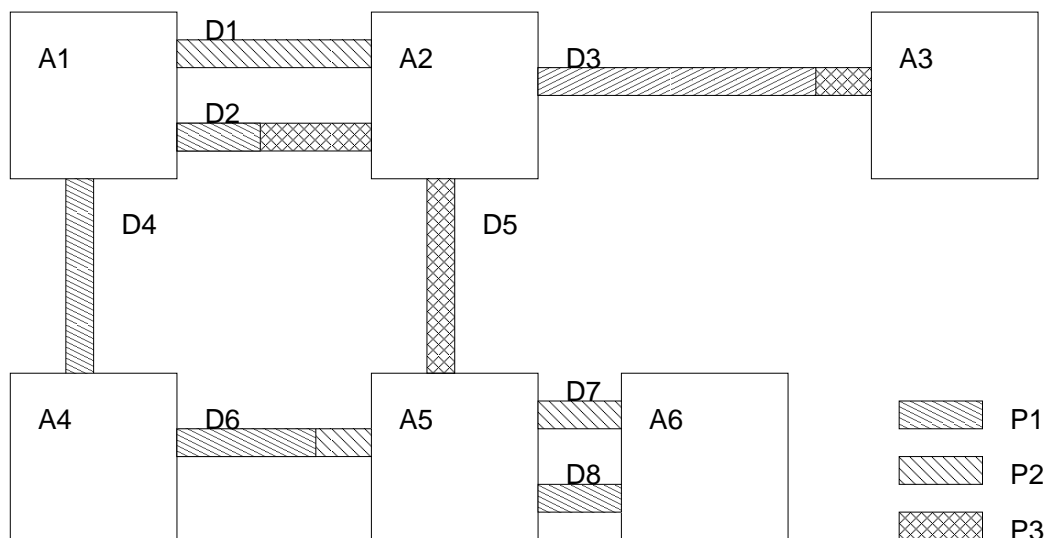


Figura 2.1: Exemplo de rede de oleodutos

As áreas, rotuladas como  $A_1, \dots, A_6$  na figura, representam refinarias, centros de distribuição ou portos da rede. Toda retirada e inserção de produtos na rede é feita nas áreas.

Os dutos, rotulados como  $D_1, \dots, D_8$  na figura, são utilizados para conectar as áreas. Cada duto conecta duas áreas, podendo haver mais de um duto conectando as mesmas áreas. Os dutos possuem um volume fixo, que é função tanto de sua extensão quanto de seu diâmetro, que pode variar ao longo do duto.

As tancagens definem a capacidade de armazenamento de cada produto em uma área. Tipicamente existem diversos tanques de um mesmo produto em uma mesma área, mas estes tanques podem ser utilizados de forma intercambiável. Logo, para efeitos de planejamento, consideraremos a tancagem agregada de cada produto em cada área, ou seja, a soma das capacidades de todos os tanques de um mesmo produto dentro da área. A tancagem agregada em uma área pode variar em função da reconfiguração dos tanques na mesma, mas isso tipicamente acontece com uma frequência bem menor do que o horizonte de planejamento com que trabalharemos.

**Definição 2.1** *Uma rede de oleodutos é definida como uma tupla*

$$R = (A, D, P, Cap)$$

onde  $A = (a_1, \dots, a_{na})$  é o conjunto de áreas da rede,  $D = (d_1, \dots, d_{nd})$  é o conjunto de dutos da rede,  $P = (p_1, \dots, p_{np})$  é o conjunto de produtos que são transportados pela rede e  $Cap$  é uma função que mapeia todos os pares  $(a_i, p_j)$  na capacidade de armazenamento de  $p_j$  em  $a_i$ . Cada duto  $d_k$  é definido por uma área de início, uma área de término e um volume.

**Definição 2.2** *O estado  $E$  de uma rede  $R$  em um instante  $t$  é definido como*

$$E(R,t) = ( Et, Ed )$$

*onde  $Et$  é uma função que mapeia todos os pares  $(a_i, p_j)$  de  $R$  no volume de  $p_j$  em  $a_i$  no instante  $t$ , e  $Ed$  é uma função que mapeia todos os dutos  $d_k$  de  $R$  em seu conteúdo, que é representado por uma lista de produtos e volumes a partir da área de início do duto. Esta forma de representação do conteúdo do duto é conhecida como linefill.*

### 2.2.2

#### **Restrição de interface**

Como durante a operação da rede produtos distintos estão em contato diretamente um com o outro dentro dos dutos, é inevitável que exista uma contaminação de ambos os produtos nesta região definida como de interface entre os mesmos. No estado representado na Figura 2.1, por exemplo, os dutos  $D2$ ,  $D3$  e  $D6$  possuem interface entre produtos distintos.

Esta interface deve ser recebida em tanques especiais para reprocessamento em uma refinaria [1] ou tratadas em unidades de separação eventualmente instaladas nas áreas de destino. De qualquer forma existem grandes custos associados ao seu tratamento [5].

As perdas de interface são reconhecidamente mais destacadas para alguns pares de produtos, com a colocação dos mesmos em contato direto no duto sendo proibida durante a operação da rede.

### 2.2.3

#### **Restrição de tancagem**

A restrição de tancagem determina que o volume armazenado em uma determinada tancagem agregada deve sempre situar-se dentro de uma faixa de operação definida para a mesma. Esta faixa tem limite inferior em zero e superior na capacidade total de armazenamento do produto na área.

## 2.2.4 Rotas de fluxo

A única forma de movimentar os produtos que estão contidos em um duto é através de operações de bombeamento realizadas a partir das áreas. Estes bombeamentos seguem sempre uma rota de fluxo, que é definida pela área que inicia o bombeamento e uma seqüência de um ou mais dutos. Estes dutos são alinhados em cada área intermediária, de forma que o fluxo proveniente de um deles é repassado integralmente ou parcialmente ao seu sucessor. A passagem parcial do fluxo é ocasionada por uma opcional retirada do produto na área intermediária, em uma operação conhecida como sangria.

Por restrições operacionais, apenas algumas seqüências de dutos podem ser utilizadas como rotas de fluxo durante a operação da rede. Cada rede define o conjunto de rotas de fluxo possíveis, assim como as vazões que podem ser utilizadas nestas rotas. Os valores possíveis de vazão para cada rota são discretos, já que são obtidos através da ligação em paralelo de bombas nas áreas de origem, com cada bomba ligada operando com uma vazão fixa. Os valores possíveis de vazão para uma rota são uma função da vazão de operação individual de cada bomba e da forma como elas podem ser combinadas.

Por exemplo, na Figura 2.1 podemos ter as seguintes rotas de fluxo definidas:  $A1 - D1 - D3$ ,  $A1 - D2 - D3$ ,  $A5 - D7$  e  $A5 - D5 - D2$ .

**Definição 2.3** *Uma rota de fluxo é definida como*

$$r = (a_i, a_f, D_r, V_r)$$

onde  $a_i$  é a área de origem da rota de fluxo,  $a_f$  é a área final da rota de fluxo,  $D_r = (d_1, \dots, d_i)$  é uma lista ordenada de um ou mais dutos e  $V_r = (v_1, \dots, v_j)$  é o conjunto dos valores possíveis de vazão, racionais positivos, a serem utilizados.

Dizemos que uma rota de fluxo está ativa em um determinado instante quando a vazão nela é diferente de zero neste instante. Duas rotas de fluxo são consideradas interferentes se ambas contém um mesmo duto. Rotas interferentes não podem estar ativas simultaneamente, mas rotas não interferentes podem, e de fato na maioria das ocasiões devem, ficar ativas de forma a minimizar o tempo total gasto no transporte dos produtos.

Por exemplo, considerando as rotas de fluxo citadas anteriormente,  $A1 - D2 - D3$  e  $A5 - D5 - D2$  são interferentes, inclusive com o sentido fluxo em  $D2$  sendo diferente em cada uma das rotas. Já as rotas  $A1 - D1 - D3$  e  $A5 - D5 - D2$  não são interferentes, e podem ser ativadas simultaneamente.

### 2.2.5 Ordens de serviço

As ordens de serviço definem operações de inserção e retirada de produtos nos tanques da rede. Existem dois tipos de ordem de serviço, produções e demandas, associadas à operações de inserção e retirada na rede, respectivamente.

**Definição 2.4** *Uma ordem de serviço é definida como*

$$s = (t_i, t_f, v, p, a)$$

onde  $t_i$  é a data de início da operação,  $t_f$  é a data final da operação,  $v$  representa a vazão utilizada,  $p$  é o produto que é inserido ou retirado da rede e  $a$  é a área na qual a operação é efetuada. Valores de vazão negativos são utilizados para demandas, enquanto valores positivos são utilizados para produções.

As ordens de serviço geram um forte componente temporal no problema, sendo que na maioria das vezes é necessário que rotas de fluxo sejam ativadas simultaneamente para que as ordens sejam atendidas.

### 2.2.6 Bombeamentos

Uma operação de bombeamento consiste na ativação de uma determinada rota, definindo qual vazão é utilizada, qual o produto é inserido no duto e o intervalo de tempo da operação.

**Definição 2.5** *Uma operação de bombeamento é definida como*

$$b = (r, v, p, t_i, t_f)$$

onde  $r = (a_i, a_f, D_r, V_r)$  é a rota que está sendo ativada,  $v \in V_r$  é a vazão utilizada,  $p$  é o produto que está sendo inserido no duto e  $t_i$  e  $t_f$  definem os instantes inicial e final do período da operação, respectivamente.

Uma operação de bombeamento está sempre associada a um produto na área de origem, mas pode ter como consequência o recebimento de mais de um produto na área de destino.

Por exemplo, na rede da Figura 2.1, se bombearmos o produto  $P_2$  na rota  $A_5 - D_5 - D_2$  teremos inicialmente o produto  $P_1$  sendo recebido em  $A_1$ . Continuando o bombeamento,  $A_1$  passa a receber  $P_3$  e somente após todo o volume de  $P_3$  inicialmente na rota ser recebido,  $A_1$  passa a receber  $P_2$ .

### 2.2.7

#### Seqüências de bombeamento

**Definição 2.6** *Uma seqüência de bombeamento é definida como um conjunto de operações de bombeamento,*

$$Bomb = (b_1, b_2, \dots, b_n)$$

Uma seqüência de bombeamento não pode, em nenhum instante de tempo  $t \in [t_i, t_f]$ , ativar rotas interferentes. Além disso, durante a sua execução, as restrições de tancagem e de interface devem ser respeitadas para que *Bomb* seja considerada viável.

### 2.2.8

#### Bateladas

O termo batelada é utilizado na indústria de oleodutos para designar uma determinada quantidade de um produto.

Bateladas quando inseridas no duto formam uma região contígua do mesmo produto dentro de uma rota de fluxo. Uma vez inseridas no oleoduto, as bateladas não podem ser divididas durante a operação da rede. Por exemplo, na Figura 2.1, a rota  $A1 - D2 - D3$  não pode ser ativada pois implica na divisão da batelada de  $P3$  que está nos dutos  $D2$  e  $D5$ , criando uma nova interface entre produtos distintos no duto. Esta criação de interfaces é o fator motivador para a proibição deste tipo de operação.

Em alguns casos, as bateladas são definidas antes da própria operação de bombeamento, quando elas estão armazenadas nos tanques. Neste caso, uma operação de bombeamento  $b$  de uma batelada em uma rota de fluxo  $r$ , deve transferir todo o volume desta batelada para o oleoduto antes que outra batelada possa ser bombeada em qualquer rota de fluxo que inicie em  $a_i$ .

## 2.3

### Planejamento e escalonamento

Antes de apresentar uma definição geral do problema, é importante ressaltar porque ele está definido como um problema de planejamento e não de escalonamento.

Tipicamente problemas de planejamento “puros” estão mais associados a “o que” deve ser feito, enquanto problemas de escalonamento “puros” preocupam-se em “como” a tarefa deve ser realizada [29]. Muitas vezes estes

problemas são endereçados de forma separada, resolvendo-se inicialmente o planejamento para depois executar o escalonamento. Por isso a otimização desempenha um papel importante nos problemas de escalonamento, já que a princípio estamos trabalhando com um conjunto viável de tarefas, definidas na fase de planejamento, restando otimizar a sua execução.

Todavia, existem poucos problemas práticos de planejamento puro, principalmente quando temos situações de compartilhamento de recursos e concorrência no acesso aos mesmos. No caso do transporte em oleodutos, por exemplo, existe um planejamento feito um nível acima do qual estamos trabalhando, que define as ordens de serviço, ou seja, uma programação macro que indica o que vai ser produzido e quando, e quais são os compromissos que serão assumidos para a entrega dos produtos. No entanto, devido à complexidade da operação da rede, em algumas vezes não é possível viabilizar um conjunto de ordens de serviço fornecido.

Neste aspecto, o problema que estamos tratando tem componentes importantes de planejamento, não a um nível da operação como um todo, que envolve a programação das refinarias, programação de atracamento de navios em portos, etc., mas ao nível da operação da rede por si só. Em função disto, utilizaremos o termo planejamento para o nosso problema, apesar de ele conter também aspectos importantes de escalonamento.

Como exemplo de um aspecto de escalonamento de nosso problema podemos citar a otimização da programação com o objetivo de reduzir o custo total de bombeamento. A componente principal deste é o custo da energia elétrica utilizada para operação das bombas, que é inclusive mais caro em algumas horas do dia.

## 2.4

### Problema de planejamento em redes de oleodutos

Neste ponto podemos definir o conceito de instância de um problema de planejamento de transporte de oleodutos e de sua solução:

**Definição 2.7** *Uma instância de um problema de planejamento em oleodutos é definida como uma tupla*

$$I = (R, O, H, T, Bat, E(R, t_i))$$

onde  $R$  é uma rede de oleodutos,  $O$  é um conjunto de ordens de serviço,  $H = [t_i, t_f]$  é um intervalo representando o horizonte de planejamento,  $T$  é um conjunto de rotas possíveis,  $Bat$  é um conjunto que pode ser vazio de



bateladas definidas para bombeamento e  $E(R, t_i)$  é o estado da rede  $R$  no instante  $t_i$ .

**Definição 2.8** A solução de uma instância  $I = (R, O, H, T, Bat, E(R, t_i))$  de um problema de planejamento em oleodutos é definida como uma seqüência de bombeamento  $Bomb$  viável em  $H$ .

Ou seja,  $Bomb$  é uma seqüência de bombeamento que determina como a rede deve ser movimentada de forma que esta acomode todas as produções e demandas definidas em  $O$ , dentro de um horizonte de planejamento  $H$ .

Opcionalmente, um conjunto de bateladas a ser bombeadas pode ser fornecido como entrada do problema. Neste caso,  $Bomb$  deve trabalhar com estes volumes, iniciando o bombeamento de uma nova batelada apenas ao final da anterior. Caso contrário,  $Bomb$  tem a liberdade de definir os volumes das bateladas.

## 2.5

### Revisão bibliográfica

Apesar de sua grande relevância, o problema de planejamento de transporte em oleodutos não é muito explorado na literatura.

As primeiras referências sobre o tema [9, 10] trabalham com redes que suportam mais de uma rota de fluxo, mas cuja topologia deve ser uma árvore direcionada, ou seja, com todas as rotas de fluxo iniciando na mesma área. Operações de sangria e injeção não são suportadas. Não existem restrições de capacidade máxima de tancagem, e as ordens de serviço são cíclicas no tempo. As bateladas são definidas, assim como o seu destino final. São apresentados algoritmos que utilizam técnicas de branch and bound para a geração da seqüência de bombeamento.

No sistema PIPES [4] a rede é restrita a uma rota de fluxo, com a operação de sangria sendo suportada. As restrições de tancagem e de interface são consideradas, e tanto as bateladas como 3 seqüências “básicas” permitidas de bombeamento são fornecidas. O resultado do sistema consiste em uma seqüência montada a partir da concatenação das seqüências básicas, e como cada batelada deve ser distribuída entre as áreas de destino. No exemplo dado, o sistema gera programações de até 1 mês de horizonte para uma rede com 5 áreas e 4 produtos. O PIPES utiliza a técnica de busca heurística com *beam search* para procura de uma solução no espaço de estados.

Outra abordagem utiliza algoritmos genéticos para atacar o problema [12]. A rede trabalhada possui 8 áreas, conectadas por dutos em uma topologia de árvore direcionada, com todas as rotas iniciando em uma mesma área e suportando operações de sangria. Ela contém apenas 2 produtos e, por conta disso, a restrição de interface não é considerada. Os volumes dos tanques são discretizados em 3 estados, alto, médio e baixo. O planejamento é feito para um regime de ordens de serviço cíclicas.

Mais recentemente, técnicas de pesquisa operacional como programação linear inteira mista ou MILP têm sido propostas para tratar o problema. Em [3], trabalha-se com uma rede com uma única rota de fluxo e com suporte para sangria. A rede é composta por 6 áreas e capaz de transportar 4 produtos. Restrições de interface e tancagem são consideradas, e as bateladas não são dadas a priori. O sistema proposto gerou soluções para um horizonte de 3 dias.

A única abordagem encontrada que trabalha com rotas de fluxo que podem ser ativadas simultaneamente é dada no sistema RSB [15]. Ela também utiliza MILP para modelar o sistema, e não impõe restrições na topologia da rede. As restrições de interface e de tancagem são dadas, e o volume das bateladas não é definido. Como o modelo MILP não é totalmente fiel às operações possíveis de serem realizadas no oleoduto, principalmente em função da discretização que é feita no tempo, é necessário um passo de “refinamento” após a solução do problema de programação inteira, quando este é resolvido. Em algumas situações este refinamento não é bem sucedido e uma programação viável não é gerada [18].

## 2.6

### Abordagem proposta

Nenhuma das técnicas descritas na Seção anterior escala para trabalhar com problemas como por exemplo o representado pela **Rede de Claros** da Transpetro. Esta rede é composta por 13 áreas, 26 dutos, 49 rotas de fluxo e capaz de transportar 16 produtos. Tipicamente deseja-se um horizonte de planejamento entre uma semana e um mês. Este é o principal motivador desta tese, que analisa como a utilização de técnicas de planejamento em IA, simuladores a eventos discretos e arcabouços de software podem ser utilizadas na construção de simuladores capazes de tratar instâncias operacionais do problema.

Em relação à utilização de técnicas de IA, a motivação está no fato de que os programadores que hoje realizam este planejamento são capazes

de gerar soluções satisfatórias, muitas vezes conseguindo a viabilidade em problemas da escala mencionada. No entanto, um esforço considerável, da ordem de centenas de horas por semana [12], é tipicamente investido nesta tarefa. Ou seja, trata-se de um processo onde a inteligência e experiência no domínio viabilizam o seu planejamento. Podemos, utilizando as técnicas de IA, capturar este conhecimento para a automação do processo.

A utilização de simuladores a eventos discretos também é motivada pela utilização destas ferramentas pelos programadores. O simulador é fortemente utilizado para a validação de cenários possíveis imaginados pelo programador. De certa forma, todas as abordagens apresentadas na Seção anterior devem incorporar um simulador no processo de planejamento. Nossa avaliação é que esta não é a forma mais eficiente de lidar com o problema, já que junta tanto o processo de tomada de decisão quanto de simulação em um mesmo modelo. Por exemplo, [3] reporta que mais de 90% das variáveis binárias do MILP representam restrições do processo de simulação do duto, enquanto apenas 10% representam a decisão de enviar ou não determinado produto em um instante de tempo.

Abordagens evolucionistas sofrem o mesmo impacto. Em [12], o sistema representa o estado da rede de duto como um cromossomo. O sistema “aprende” o processo de simulação no decorrer das gerações das populações de cromossomos, com cromossomos que não respeitam as restrições do duto sendo penalizados. Ou seja, o sistema não só deve definir quais são os bombeamentos feitos a cada momento como também deve aprender que está lidando com uma rede de dutos durante o planejamento.

Além de sobrecarregar o mecanismo de tomada de decisão com questões relacionadas ao funcionamento do processo, estas abordagens tem outro sério revés. Como o modelo utilizado tipicamente não tem expressividade suficiente para incorporar todos os aspectos do problema original, o resultado pode ser uma distância considerável entre ambos.

Em nossa análise esta modelagem unificada de simulação e planejamento é uma das causas dos problemas encontrados para que os sistemas escalem. Por exemplo, [12] menciona que cromossomos de 1GByte seriam necessários para representação de uma instância real.

Um aspecto interessante reportado em [4] é que por volta de 50% das restrições operacionais foram detectadas após uma primeira versão do sistema já estar em operação, e foram levantadas apenas durante o processo de validação das soluções geradas pelo planejador automático. Desta forma, o planejador deve ser flexível para suportar a adição dessas novas restrições com o mínimo de impacto e retrabalho. Para isso é fundamental que o

sistema seja baseado em componentes e, além disto, que exista pouco acoplamento entre estes componentes de forma a permitir o teste individual de cada um deles. Como estas técnicas inexistem, ou não são amplamente difundidas para sistemas baseados em MILP e abordagens evolucionistas, estes tem difícil manutenção.

Técnicas de engenharia de software como arcabouços e testes unitários podem ser utilizadas para este fim, como mostraremos no Capítulo 7.