4
Modelagem proposta da programação do sub-sistema

Este capítulo descreve como será abordado o problema real da programação do duto OSPAR, quais simplificações serão utilizadas, hipóteses, restrições e objetivos do modelo.

É importante ressaltar que, até o presente momento, existem poucos trabalhos que retratem a programação de dutos permitindo que a quantidade movimentada em um período de tempo discretizado varie ao longo dos trechos. Rejowski e Pinto (2003) elaboraram um modelo em que o duto é segmentado em lotes de diferentes tamanhos, representando como ocorre a distribuição no poliduto OSBRA, principal via de abastecimento de derivados do norte do Estado de São Paulo, Oeste de Minas Gerais e Estados do Centro-Oeste. O OSBRA é conhecido na malha brasileira de dutos de derivados de petróleo por ser o único a realizar a operação de sangria. Segundo Oshiro (2008), a sangria é a transferência de parte do produto movimentado ao longo do OSBRA por um duto menor, fazendo com que a vazão à jusante daquele ponto em direção à Goiânia seja menor do que a vazão a montante oriunda da REPLAN. O diferencial destas vazões é a vazão que com que os terminais conectados ao longo do trecho do duto recebem o produto.

Já Magatão *et al* (2004) formularam um modelo MILP com uma estratégia de decomposição de um problema de larga escala composto por um porto, uma refinaria e um duto. Neste modelo, não existe a variável navio; e sim uma demanda de produtos pelo porto que deve ser atendida para suprir a refinaria. A vazão do duto era uma variável determinada pelos resultados do modelo, objetivando operar o duto com o menor custo operacional atendendo a demanda. A estrutura para decompor o problema era composta por um modelo MILP principal que determina a sequência de bombeio dos produtos, um modelo MILP auxiliar que determina a utilização dos tanques, uma rotina auxiliar que determina as restrições de tempo e um banco de dados que coleta dados de entrada e informações fornecidas pelos blocos da otimização.

Segundo Pereira (2008), para acompanhar o deslocamento dos lotes de produtos dentro dos dutos, e saber qual deles será entregue em cada momento, geralmente são criadas restrições que baseiam-se na simplificação de que os dutos são divididos em trechos uniformes e cada trecho corresponde a um lote de bombeio. Como pode-se notar na Figura 4, ao acontecer o envio do lote 4 do terminal para o duto, no mesmo instante o lote 1, do mesmo tamanho, que está na outra extremidade do duto é entregue para a refinaria.

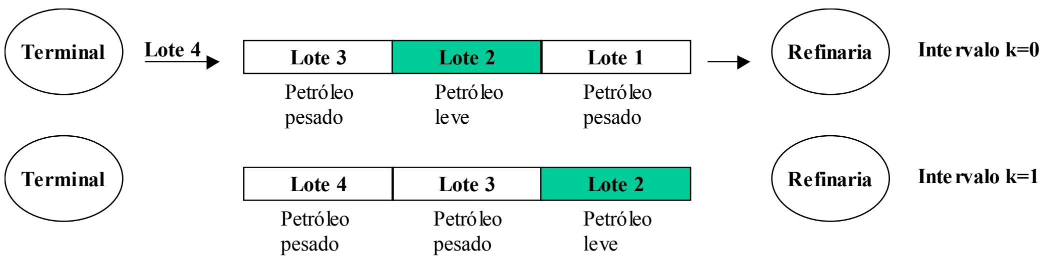
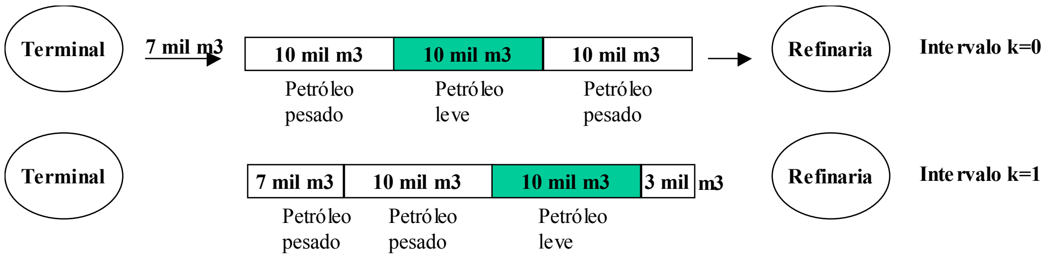


Figura 1 – Deslocamento de lotes de produtos dentro de um duto

Fonte: elaborada pela autora

A possibilidade de os lotes variarem de tamanho é uma característica que confere maior complexidade à modelagem. Ao permitir a flexibilização do volume bombeado a cada intervalo de tempo, deve-se prever que o recebimento na refinaria pode ser de parte de um lote (para o caso do volume bombeado ser menor que o lote que já está na extremidade final do duto), ou pode ser de vários lotes (para o caso do volume bombeado corresponder a mais de um dos lotes já localizados na extremidade final do duto). Conforme a ilustração da Figura 5, observa-se que o duto contém três lotes de 10 mil m3 de petróleo. Ao acontecer um bombeio de 7 mil m3 do terminal para a refinaria, ocorre o deslocamento do mesmo volume (7 mil m3) do lote que está na extremidade onde encontra-se a refinaria. Logo, esta recebe 7 mil m3 e sobram 3 mil m3 na "ponta" do duto. Neste instante, é necessário representar o volume do duto como quatro lotes, considerando que possuem volumes diferentes.

Figura 2 – Deslocamento de lotes de tamanho variável dentro de um duto



Fonte: elaborada pela autora

Para este trabalho será considerada a hipótese simplificada de operar com lotes fixos, e para atender o objetivo de comparar programações feitas com vazões diferentes, o mesmo modelo será implementado para casos com instâncias de diferentes vazões.

Utilizando uma vazão fixa, o modelo deve encontrar uma programação de transferência de petróleo para um determinado horizonte de tempo que atenda à demanda, evite a redução de estoque da refinaria e respeite os limites de capacidade de armazenamento dos tanques. Será resposta também do modelo se será necessário utilizar o bombeio do duto durante o horário de ponta, minimizando o custo da energia e o custo dos navios no terminal.

4.1. Hipóteses Consideradas

Devido à dificuldade de se representar todas as limitações e características do problema real, foram adotadas as seguintes hipóteses na construção do modelo:

- H1: São considerados apenas dois tipos de petróleo: o petróleo leve, utilizado em menor proporção no consumo diário da refinaria (usualmente chamado de petróleo de injeção), e o petróleo pesado que é utilizado em larga escala (também chamado de petróleo base).
- H2: As tancagens da refinaria e do terminal são agregadas por tipo de petróleo. Considera-se que a tancagem máxima de um determinado tipo de

petróleo é igual à de todo o conjunto de tanques na refinaria utilizados para armazenar aquele petróleo. O custo de tancagem é desconsiderado.

- H3: O horizonte de programação é discretizado em períodos de tempo de tamanho uniforme.
- H4: A capacidade do duto é discretizada, ou seja, o duto é seccionado em um número de trechos de mesmo volume.
- H5: A vazão do duto é constante, e o volume de produto (lote) bombeado durante cada período de tempo é constante e igual à vazão multiplicada pelo tamanho do período de tempo.
- H6: Cada lote é composto por um único tipo de petróleo.
- H7: O duto pode ter sua operação interrompida, e neste caso, o produto que está contido em um dado lote em um intervalo de tempo permanece no mesmo lote no intervalo seguinte.
- H8: Os navios não podem ter sua operação de descarga interrompida. A descarga do navio deve ser sequencial e integral, ou seja, não é permitido que aconteça a descarga de apenas parte do volume a bordo.
- H9: A vazão de descarga dos navios na monobóia é um parâmetro dado no problema, e pode ser diferente de acordo com o petróleo a bordo e o porte de navio.
- H10: A demanda é constante para cada período de tempo e seu valor é dado pela razão do valor diário de necessidade da refinaria por tipo de petróleo e o número de períodos de tempo em um dia.
- H11: São desconsiderados os tempos de preparo de tanques para consumo na refinaria e preparo no terminal; desta forma o petróleo está pronto para ser utilizado imediatamente após seu recebimento pela refinaria, e analogamente também está pronto para ser bombeado do terminal para a refinaria imediatamente após sua descarga pelo navio.
- H12: Inicialmente, todos os segmentos do duto estão totalmente preenchidos, assim como durante e ao término da operação.

- H13: Todos os parâmetros do modelo são determinísticos. Não são consideradas incertezas.
- H14: A demanda deve ser integralmente atendida diariamente.
- H15: O estoque de petróleo na refinaria deve respeitar o limite mínimo e máximo de tancagem da refinaria, respectivamente, o estoque mínimo da refinaria por tipo de petróleo e o somatório da capacidade de armazenamento dos tanques.
- H16: O estoque de petróleo no terminal deve respeitar o limite mínimo e máximo de tancagem, respectivamente, os lastros dos tanques e o somatório da capacidade de armazenamento dos tanques.

4.2.
Critérios de avaliação e solução do modelo

A função objetivo do modelo é minimizar o custo do sub-sistema Tefran – OSPAR - REPAR e evitar o desabastecimento da refinaria.

As primeiras duas parcelas do custo são a demanda de energia e o custo dos navios. O custo de demanda é contabilizado caso haja um ou mais bombeios em horário de ponta. Já o custo de navios será calculado multiplicando-se o total dos intervalos de tempo da chegada do navio até o término da descarga pelo respectivo custo diário.

A terceira parcela da função objetivo refere-se à política existente na programação da cadeia de suprimentos da Petrobras de minimizar o risco de falta de petróleo na refinaria para produção de derivados. Na prática, havendo estoque no Tefran (que é supridor exclusivo da Repar) e havendo espaço na Repar, deve-se transferir este estoque para a refinaria.

A idéia é não "desabastecer" a refinaria e não "segurar" estoque no terminal, que funciona como um entreposto. Esta lógica deve estar presente no modelo, para evitar que a solução resulte na redução da posição de estoque da refinaria.

É considerada então na função objetivo uma parcela que evita a redução de estoque na refinaria, favorecendo a manutenção e permitindo o aumento do nível de estoque na refinaria (caso possível, a depender a chegada dos navios).

A solução do modelo é a programação de movimentação do petróleo do navio para o terminal, e do terminal até a refinaria. Esta programação determina o sequenciamento da atracação dos navios no terminal e o volume e composição dos itens de petróleo bombeados para a refinaria através do duto. Para cada período do horizonte de tempo, é determinado:

1) que navio deve atracar e iniciar descarga;
2) se deve haver, ou não, bombeio de um lote de petróleo, e havendo, qual o tipo que deve ser bombeado. Logo, quando há bombeio na origem do duto, há o recebimento de um lote no destino do duto. A sequência dos lotes e os momentos de chegada na refinaria também são outros dados de saída do modelo.

As informações necessárias para uma instância do problema são: capacidade mínima e máxima de armazenamento por tipo de petróleo na refinaria e no terminal, volume inicial de cada tipo de petróleo na refinaria e no terminal, composição inicial dos lotes que estão no duto, demanda da refinaria, chegada de navios no terminal, composição e volume do petróleo a bordo dos navios, tarifa de demanda de energia, custo diário dos navios, número de períodos de tempo e número de lotes do duto.

4.3. Modelo

Nesta seção será descrita a formulação matemática correspondente ao problema que engloba o sequenciamento da atracação de navios e descarga do petróleo no terminal, e da transferência deste petróleo para a refinaria através de um duto, de único sentido.

A modelagem referente à interface entre navios e terminal foi fundamentada no modelo proposto por Lee et al (1996). Os autores elaboraram um modelo de programação linear inteira mista (MILP) para lidar com o problema de gestão de estoques de petróleo considerando desde a descarga dos navios para tanques de armazenagem até o sequenciamento dos tanques da refinaria que enviam o petróleo para as unidades de destilação.

Já a modelagem referente à programação de dutos foi fundamentada na formulação proposta por Pereira (2008), na qual tratou da movimentação de 5 tipos de produtos no sistema da área São Paulo (4 terminais, 4 refinarias e 8 terminais) através de um modelo de programação linear inteira mista (MILP). Utilizou-se uma formulação semelhante no modelo deste trabalho, com alterações nas restrições de balanços de massa, para que refletissem a transferência do petróleo dos navios para o terminal, além de inclusões de restrições considerando um nível de estoque mínimo e da restrição que gera o resultado da variável que indica a necessidade de haver bombeio em horário de ponta ou não. Além disto, neste modelo não são consideradas as restrições referentes à contaminação de produtos devido à mistura de interfaces.

A junção destas duas formulações descritas com as devidas alterações permitirá a visão da programação conjunta de atracação e descarga de navios no terminal, e do sequenciamento do duto já com a visibilidade da necessidade de bombear durante o horosazonal ou não, e garantindo o menor custo para o atendimento da demanda com a manutenção dos estoques.

4.3.1. Notação

Índices

p = leve, pesado	petróleo
k = 1,..,Ktemp	períodos de tempo
t = 1,..,Nlote	trechos (lotes) que compõem o duto
n=1,..,navios	navios que chegam no terminal

Parâmetros

Nome	Unidade	Descrição
Vol_lote	m^3	volume do lote
Nlote	quantidade	número de lotes contidos no duto
Dias	quantidade	número de dias do horizonte de tempo considerado
$Demanda_{(p,k)}$	m^3	demanda de petróleo p pela refinaria em cada período de tempo k
$Volmax\_ref_{(p)}$	m^3	capacidade máxima de tancagem na refinaria por petróleo p
$Volmin\_ref_{(p)}$	m^3	capacidade mínima de tancagem na refinaria por petróleo p
$Volzero\_ref_{(p)}$	m^3	volume inicial de cada petróleo p na refinaria
$Volmax\_term_{(p)}$	m^3	capacidade máxima de tancagem no terminal por petróleo p
$Volmin\_term_{(p)}$	m^3	capacidade mínima de tancagem no terminal por petróleo p
$Volzero\_term_{(p)}$	m^3	volume inicial de cada petróleo p no terminal
$Lotezero_{(p,t)}$	0,1	composição inicial dos lotes que estão no duto, 1 se o trecho t do duto contém p no instante inicial, 0 em caso negativo
Tarifa_Energia	R$	custo da demanda de energia relativa à utilização do duto no horário de ponta proporcional ao

		horizonte de tempo utilizado
Vazao_navio$_{(n,p)}$	m^3/k	vazão de descarga do petróleo p a bordo do navio n
Volume_navio$_{(n,p)}$	m^3	volume do petróleo p no navio n disponível para descarga
Tchegada$_{(n)}$	data	data de chegada do navio n no terminal
Custo_Navio$_{(n)}$	R$	custo por dia do navio n

Variáveis Binárias

Nome	Unidade	Descrição
Recebe $_{(p,k)}$	0,1	1 se a refinaria recebe o petróleo p no instante k, 0 caso contrário
Envia $_{(p,k)}$	0,1	1 se o terminal bombeia o petróleo p no instante k, 0 caso contrário
Prod_lote $_{(p,t,k)}$	0,1	1 se o petróleo p está contido no t-ésimo trecho do duto no instante k, 0 caso contrário
XI $_{(n,k)}$	0,1	1 se o navio n inicia descarga no instante k, 0 caso contrário
XF$_{(n,k)}$	0,1	1 se o navio n finaliza descarga no instante k, 0 caso contrário
XW$_{(n,k)}$	0,1	1 se o navio n está descarregando no instante k, 0 caso contrário
Y	0,1	1 se a demanda de energia é contratada para haver bombeio em horário de ponta, 0 caso contrário

Variáveis Contínuas

Nome	Unidade	Descrição
Estoque_terminal $_{(p,k)}$	m^3	volume no terminal do petróleo p no instante k
Estoque_refinaria $_{(p,k)}$	m^3	volume na refinaria do petróleo p no instante k
TI $_{(n)}$	tempo	instante k no qual o navio inicia descarga
TF $_{(n)}$	tempo	instante k no qual o navio finaliza descarga

4.3.2.
Formulação Matemática

A Função Objetivo do modelo é dada pela equação 1 (formada pelos componentes 1.1 ,1.2 e 1.3):

$$\text{Min} \sum_{n} (TF_{(n)} - Tchegada_{(n)} + 1) * custo\_navio_{(n)} \qquad (1.1)$$

$$+ \ Tarifa\_energia * Y \qquad (1.2)$$

$$+ \ f * [\sum_{p} (volzero\_ref_{(p)}) - \sum_{p} (estoque\_refinaria_{(p,k*)})] \qquad (1.3)$$

Equação 1

Deseja-se minimizar o custo de estadia dos navios (componente 1.1), o custo de demanda de energia no caso de utilização do duto no horário de ponta (componente 1.2) e evitar a redução de estoque na refinaria caso haja estoque no terminal e capacidade de bombeio para internar este estoque (componente 1.3).

O custo de estadia dos navios é obtido multiplicando-se o custo diário pela quantidade de intervalos de tempo que os navios permaneceram no terminal – do instante da chegada até sua saída. O custo da demanda de energia é o resultado da tarifa multiplicada pela variável binária Y – que indica se houve necessidade de bombear durante o horário de ponta ou não.

Para garantir o abastecimento da refinaria e evitar sua redução de estoque, optou-se por aplicar uma penalidade na função objetivo, através da adição do componente 1.3. Este contabiliza o acúmulo ou redução do estoque da refinaria somando a posição inicial de volume e diminuindo o volume total existente no último instante do horizonte (k*). A este acúmulo ou redução multiplica-se o parâmetro f, que penalizará a função objetivo caso haja redução de estoques, ou ajudará na minimização caso haja aumento de estoques. O valor de f será definido através de testes do modelo descritos no capítulo 5.

As restrições do modelo serão divididas em restrições dos locais, navios e dutos, a serem apresentadas nas seções seguintes.

4.3.3. Restrições da refinaria e terminal

As restrições da refinaria e do terminal referem-se aos balanços de massa e às limitações de tancagem disponível.

Os balanços de massa da refinaria estão representados nas equações 2 e 4, sendo que a equação 2 é utilizada somente no primeiro instante de tempo k, e difere-se pela utilização do estoque inicial (parâmetro volzero_ref). Analogamente, os balanços de massa do terminal estão representados nas equações 3 e 5.

<u>Para k = 1</u>:

$$Estoque\_refinaria_{(p,k)} = Volzero\_ref_{(p)} + Recebe_{(p,k)} * Vol\_lote - Demanda_{(p,k)},\ \forall\ p \qquad \text{Equação 2}$$

$$Estoque\_terminal_{(p,k)} = Volzero\_term_{(p)} - Envia_{(p,k)} * Vol\_lote + \sum_{n} (XW_{(n,k)} * vazao\_navio_{(n,p)}),\ \forall\ p \qquad \text{Equação 3}$$

<u>Para k >= 2</u>:

$$Estoque\_refinaria_{(p,k)} = Estoque\_refinaria_{(p,k-1)} + Recebe_{(p,k)} * Vol\_lote - Demanda_{(p,k)},\ \forall\ p,k \qquad \text{Equação 4}$$

$$Estoque\_terminal_{(p,k)} = Estoque\_terminal_{(p,k-1)} - Envia_{(p,k)} * Vol\_lote + \sum_{n} (XW_{(n,k)} * vazao\_navio_{(n,p)}),\ \forall\ p,k \qquad \text{Equação 5}$$

Na equação 4, a quantidade estocada do petróleo p no instante k na refinaria é dada pelas quantidades estocadas no período anterior, acrescido do volume recebido do duto no instante k, e subtraído o volume consumido pela refinaria no mesmo instante.

A quantidade estocada do petróleo p no terminal no instante k, dada pela equação 5, é dada pelas quantidades estocadas no período anterior, acrescido do volume recebido por navios no instante k, e subtraído o volume bombeado para o duto no mesmo instante.

A restrição de tancagem disponível na refinaria e terminal para armazenagem de um petróleo p é dada pelas equações 6 e 7.

$$Volmin\_ref_{(p)} <= Estoque\_refinaria_{(p,k)} <= Volmax\_ref_{(p)},\ \forall\ p,k \qquad \text{Equação 6}$$

$$Volmin\_term_{(p)} <= Estoque\_terminal_{(p,k)} <= Volmax\_term_{(p)},\ \forall\ p,k \qquad \text{Equação 7}$$

4.3.4. Restrições dos navios

Cada navio só pode atracar no máximo uma vez em todo o horizonte de planejamento, e analogamente, somente pode desatracar no máximo uma vez:

$$\sum_{k} XI_{(n,k)} <= 1, \forall n \qquad \text{Equação 8}$$

$$\sum_{k} XF_{(n,k)} <= 1, \forall n \qquad \text{Equação 9}$$

As equações 10 e 11 têm como objetivo capturar o tempo de início e de término da descarga.

$$TI_{(n)} = \sum_{k} (k*XI_{(n,k)}) , \forall n \qquad \text{Equação 10}$$

$$TF_{(n)} = \sum_{k} (k*XF_{(n,k)}) , \forall n \qquad \text{Equação 11}$$

Cada navio somente pode iniciar sua descarga a partir do momento da sua chegada no terminal. É desprezado o tempo de manobra para atracação, logo é permitido que a descarga possa iniciar-se no momento da chegada.

$$TI_{(n)} >= Tchegada_{(n)} , \forall n \qquad \text{Equação 12}$$

A duração da descarga é limitada pelo volume inicial a bordo do navio dividido pela sua vazão de descarga.

$$TF_{(n)} – TI(n) + 1 = \sum_{p} (volume\_navio_{(n,p)}/vazão\_navio_{(n,p)}) , \forall n \qquad \text{Equação 13}$$

A descarga do navio deve ser total, logo o volume transferido do navio do início até o final de sua descarga deve ser igual ao volume inicial.

$$\sum (XW_{(n,k)}* Vazão\_navio_{(n,p)}) = Volume\_navio_{(n,p)} , \forall n,p \qquad \text{Equação 14}$$

k

Por fim, a descarga do navio somente é possível entre os tempos TI e TF.

$XW_{(n,k)} <= \sum (XI_{(n,k)} - XF_{(n,k-1)})$ Equação 15

k

4.3.5. Restrições dos dutos

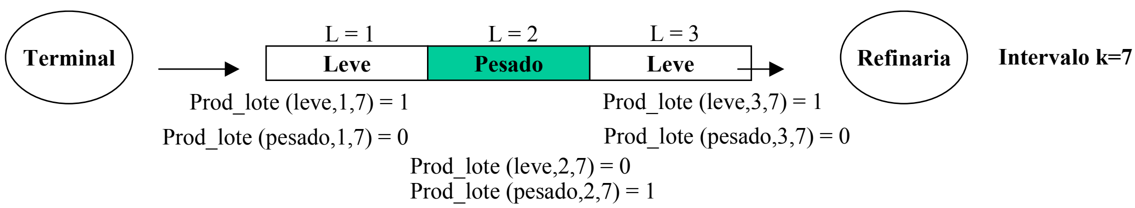
Pereira (2008) destaca em seu trabalho que a maior parte das restrições em seu modelo refere-se à operação dos dutos. Certamente, é necessário representar a movimentação do duto relacionando o lote que entra na origem e rastreá-lo até sua chegada no destino, considerando que ao longo deste percurso o duto pode ter seu bombeio interrompido ou não.

A variável binária prod_lote é responsável por auxiliar na representação do deslocamento dos lotes dentro do duto. O duto é seccionado em t trechos, e em cada instante k recebe o valor 1 caso o petróleo p esteja contido no trecho t. A equação 16 coloca que somente um p pode estar contido em cada lote do duto e em cada intervalo de tempo, e a Figura 6 ilustra esta restrição.

$\sum$ Prod_lote(p,t,k) = 1 , $\forall$ k, t Equação 16

p

Figura 3 – Desenho esquemático da restrição em que cada trecho do duto contém



apenas um produto

Fonte: elaborada pela autora

Partindo do bombeio do terminal, deve-se conseguir representar que o petróleo p bombeado no instante k “entra” no primeiro trecho do duto. Neste caso, ao haver um bombeio de lote de petróleo pesado do terminal para o duto, o primeiro trecho do duto deve conter o petróleo pesado.

A equação 17 garante que o petróleo bombeado do terminal para o duto estará contido no primeiro trecho do duto.

<u>Para t = 1</u>,

Prod_lote(p,t,k) >= Envia(p,k) , ∀ k, p Equação 17

Ao receber um novo item de petróleo, todos os outros lotes dentro do duto devem ser "empurrados" em direção à refinaria. O deslocamento destes lotes é realizado pelas equações 18 e 19. Nelas, se houve bombeio, ou seja, se $\sum_p$ Envia(p,k) = 1 , os lotes serão deslocados para o trecho seguinte. A equação 18 diferencia-se pelo fato de ocorrer no primeiro instante de tempo, e utiliza a variável lotezero que corresponde à configuração inicial do duto.

<u>Para k = 1 e t >= 2</u>

Prod_lote(p,t,k) - $\sum_p$ Envia(p,k) >= Lotezero(p,t-1) - 1 , ∀ p, t Equação 18

<u>Para k >= 2 e t >= 2</u>

Prod_lote(p,t,k) - $\sum_p$ Envia(p,k) >= Prod_lote(p,t-1,k-1) - 1 , ∀ p, t, k Equação 19

Para o deslocamento do duto deve-se considerar que, ao haver um bombeio, os lotes que estão no duto devem ser deslocados um trecho para frente.

A equação 20 garante que será enviado no máximo um petróleo p em cada intervalo de tempo k.

$$\sum_{p} Envia(p,k) <= 1 \quad , \forall\ k \qquad \text{Equação 20}$$

A identificação de que lote a refinaria receberá em cada instante de tempo k é feito através das equações 21 e 22. A equação 21 diferencia-se da 22 em razão de ser o primeiro movimento do duto, logo se há bombeio a refinaria receberá o lote que está no t-ésimo trecho do duto (chamado também de "ponta do duto", representado pelo parâmetro nlote). A lógica da formulação destas restrições é a mesma: se há bombeio, ou seja, se $\sum_{p} Envia(p,k) = 1$, então a refinaria recebe o petróleo que estava no último trecho no instante de tempo anterior. A Figura 7 ilustra as equações 21 e 22. Percebe-se que ao acontecer um bombeio no terminal, a refinaria deve receber o petróleo leve que estava contido no último trecho do duto.

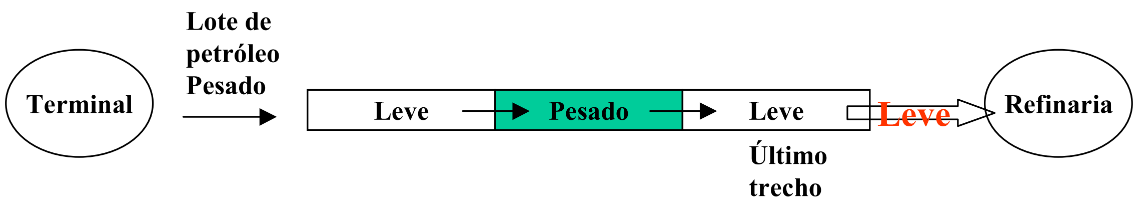
<u>Para k = 1</u>:

$$Recebe(p,k) - \sum_{p} Envia(p,k) >= Lotezero(p,nlote) - 1 \quad , \forall\ p \qquad \text{Equação 21}$$

<u>Para k >= 2</u>:

$$Recebe(p,k) - \sum_{p} Envia(p,k) >= Prod\_lote(p,nlote,k-1) - 1 \quad , \forall\ p \qquad \text{Equação 22}$$

Figura 7 – Desenho esquemático da chegada dos lotes na refinaria



Fonte: elaborada pela autora

Ainda em relação ao recebimento dos lotes pela refinaria, a equação 23 garante que só há recebimento se o duto estiver em operação.

$$\sum_{p} \text{Recebe}(p,k) = \sum_{p} \text{Envia}(p,k), \quad \forall\, k \qquad \text{Equação 23}$$

Além disso, há que se considerar que pode haver interrupções no bombeamento. Neste caso, os lotes devem permanecer parados dentro do duto, no mesmo trecho onde estão. As equações 24 e 25 garantem que, se não há bombeio em k, ou seja, se $\sum$ Envia(p,k) = 0, então os trechos dos dutos neste instante serão iguais ao do instante anterior. A diferenciação entre a equação 24 e 25 refere-se ao fato de que a primeira rege a operação do duto somente no primeiro instante de tempo.

<u>Para k = 1:</u>

$$\text{Prod\_lote}(p,t,k) + \sum_{p} \text{Envia}(p,k) >= \text{Lotezero}(p,t)\ ,\ \forall\, p, t \qquad \text{Equação 24}$$

<u>Para k >= 2:</u>

$$\text{Prod\_lote}(p,t,k) + \sum_{p} \text{Envia}(p,k) >= \text{Prod\_lote}(p,t,k\text{-}1)\ ,\ \forall\, p, t, k \qquad \text{Equação 25}$$

Finalmente, o modelo deve indicar se há necessidade de utilizar o duto em horário de ponta ou não. Para isto, a equação 26 permite que, caso a variável binária Y seja 1, pode-se utilizar o duto em horário de ponta. Multiplica-se Y pelo parâmetro de número de dias pois a equação impõe um limite de utilização de horários de ponta que é restrito pelo horizonte de tempo considerado. Sendo assim, caso haja necessidade de haver bombeio em horário de ponta, o número de utilizações possível será de no máximo a quantidade de dias do horizonte de programação realizado.

<u>Para k = períodos de horário de ponta:</u>

$$\sum_{p} \sum_{k} Envia(p,k) <= dias*Y \qquad \text{Equação 26}$$