PROGRAMAÇÃO DE UMA REDE DUTOVIÁRIA CONSIDERANDO HOROSAZONALIDADE

Erito Marques de Souza Filho
COPPE-UFRJ/ DTL-UFRRJ
Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Ilha do Fundão
eritomarques@yahoo.com.br

Laura Bahiense
COPPE-UFRJ
Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Ilha do Fundão
laura.bahiense@gmail.com

Virgilio José Martins Ferreira Filho
COPPE-UFRJ
Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Ilha do Fundão
virgilio@petroleo.ufrj.br

RESUMO

Os dutos são considerados o meio de transporte mais adequado para o transporte de grandes volumes de petróleo e derivados por longas distâncias. Entretanto, eles demandam um grande controle operacional. Este trabalho apresenta uma formulação de Programação Inteira para o escalonamento de uma rede de dutos que transporta vários produtos de várias refinarias. O objetivo do problema é determinar como operar os dutos da rede em um dado horizonte de tempo, satisfazendo restrições operacionais de atendimento da demanda e estoque, minimizando o custo total de transporte. Além disso, considerou-se a situação de envio de produtos em horários de pico, o qual requer maior consumo de energia no processo de bombeamento.

KEYWORDS. Transporte. Rede de dutos. Programação Inteira. Área Principal (P&G).

ABSTRACT

Pipelines are considered one of the most effective mechanisms for transporting high volumes of oil and derivatives for long distances, but it also demands a great operational control. This study presents an integer programming model for scheduling a network of pipelines that transports various products from several refineries. The objective of the problem is to determine how to operate the pipeline network, over a given time horizon, satisfying the operational constraints of meeting the demand and inventories, minimizing the total cost of transport. Moreover, we consider the situation of sending products at peak times, which requires higher energy consumption in the pumping process.

KEYWORDS. Transportation. Pipeline Network. Integer Programming. Main area (P&G)

1. Introdução

O transporte geralmente representa o elemento mais importante no tocante aos custos logísticos da maioria das empresas. Um sistema de transporte eficiente e barato contribui para aumentar a concorrência de mercado, elevar as economias de escala, de produção e reduzir os preços das mercadorias (BALLOU, 2001).

Os dutos são considerados um dos mecanismos mais eficientes para transporte de petróleo e derivados. Eles fazem a conexão entre origens e destinos, como por exemplo, refinarias e centros de distribuição. Sua principal desvantagem no tocante a implementação, é o alto investimento inicial. Entretanto, seus baixos custos de operação e elevados níveis de confiabilidade permitem que esse modal de transporte seja, em geral, o mais utilizado, quando se trata de envio de petróleo e derivados para longas distâncias (REJOWSKI e PINTO, 2003; SASIKUMAR et al., 1997).

Um Problema de Transporte Dutoviário consiste em responder a quatro questões principais:

a) Que produto bombear?
b) Qual a quantidade bombear de cada produto?
c) Como distribuir os produtos em cada destino?
d) Qual a sequência de bombeamento a ser utilizada?

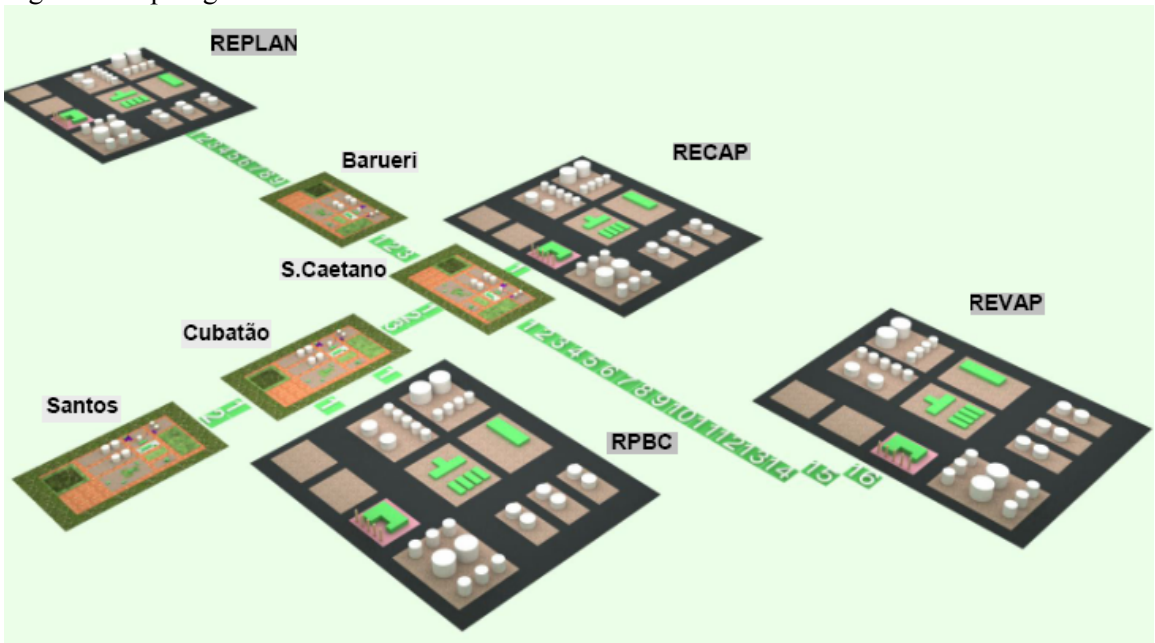
Além disso, a complexidade de cada problema varia em função das características do problema em estudo. Nesse contexto, esses problemas podem ser classificados conforme: o número de dutos, a quantidade de produtos escoados, a quantidade de destinos, a quantidade de origens (fontes) e o sentido dos dutos. Uma revisão bibliográfica do tema pode ser encontrada em SOUZA FILHO *et al*. (2006), SOUZA FILHO (2007) e ALVES (2007).

No presente trabalho propõe-se um modelo de programação inteira para *scheduling* de uma rede de oleodutos, que transporta vários produtos, oriundos de várias refinarias. O objetivo do problema é determinar como operar a rede de oleodutos durante um determinado horizonte de tempo, satisfazendo as restrições operacionais, de atendimento à demanda e de estoques e minimizando o custo total de transporte.

2. Problemática

O Problema de Transporte na Rede de Escuros (PTRE) é o problema de transporte dutoviário específico de uma rede de dutos denominada Rede de Escuros. O primeiro trabalho a respeito dessa rede específica foi realizado por ALVES (2007) que abordou o problema usando algoritmos genéticos. Esta rede é responsável pelo transporte dos derivados pesados do petróleo, como o óleo combustível, o óleo combustível marítimo (bunker), o gasóleo para craqueamento e o resíduo atmosférico, que são produtos com coloração escura e alta viscosidade. A rede transporta também o óleo leve de reciclo (LCO), que é um diluente. Os dutos podem operar em apenas um sentido, e a malha de oleodutos é então um grafo orientado, onde os vértices representam as áreas (refinarias e centros de distribuição) e os arcos representam os dutos, através dos quais é feito o transporte dos produtos (Figura 1). Os sentidos dos dutos foram escolhidos de acordo com o sentido de operação mais utilizado, que é o de escoamento dos produtos para o Terminal Santos, para serem exportados. Foi considerado o transporte de cinco tipos de produtos: LCO, gasóleo para craqueamento, bunker, óleo combustível normal e óleo combustível para exportação.

Figura 1: Topologia da Rede de Escuros



As subseções abaixo descrevem as características da rede e as hipóteses assumidas por ALVES (2007):

2.1 Considerações iniciais

Em função da complexidade do problema, foram assumidas as seguintes premissas:

• Tancagem agregada: os tanques destinados a um mesmo produto foram tratados como um único tanque com o valor de sua capacidade de armazenamento agregada.

• As vazões são constantes para cada duto.

• Horizonte de programação: 7 dias discretizado em períodos de 4 horas, resultando 42 períodos de tempo.

• Todo o produto bombeado em um duto deverá ser recebido pela área localizada na extremidade oposta deste duto. Se necessário poderá ser rebombeado para um outro duto.

• O horizonte de programação é discretizado em períodos de tempo de tamanho uniforme e as vazões são constantes para cada duto, o que implica que o volume de produto (lote) bombeado durante cada período de tempo é fixo para cada duto.

• As capacidades dos dutos também são discretizadas. Eles são divididos em trechos iguais, cujas capacidades são dadas pelos volumes dos lotes que eles transportam. Como são permitidos apenas números inteiros de trechos para cada duto, e os tamanhos dos lotes já estão fixos, as capacidades máximas dos dutos devem ser ajustadas. Para facilitar a modelagem do problema, é assumido que os lotes podem ser formados por apenas um tipo de produto.

• Não são admitidas violações no atendimento à demanda. Para que isso não aconteça, os produtos devem estar disponíveis nos tanques de armazenamento no momento em que forem demandados pelas áreas.

• Capacidade de armazenamento dos tanques: os limites mínimo e máximo considerados são, respectivamente, zero e o volume total do tanque.

2.2 Objetivo e Solução do PTRE

Em relação às simplificações nos critérios de otimização do PTRE, foram desconsiderados os custos de estocagem, e os custos de transporte e interface de produtos foram

substituídos por parâmetros relacionados a eles. Portanto, o objetivo do PTRE é encontrar uma programação de transferência de produtos, para um determinado horizonte de tempo, que atenda às demandas das áreas, respeite os limites de capacidade de armazenamento dos tanques e que ainda minimize o número de interfaces e a quantidade de produto bombeada. A minimização do número de interfaces é prioridade em relação à minimização da quantidade de produto bombeada.

A programação de transferência de produtos é a solução do PTRE. Ela estabelece as seqüências e quantidades transferidas de cada produto através de cada um dos dutos. Para cada período do horizonte de tempo e para cada duto, a programação determina se deve haver, ou não, o bombeamento de um lote de produto a partir da área de origem do duto, e em caso afirmativo, qual o tipo do produto deve ser bombeado.

3. Modelagem Matemática proposta por Pereira (2008)

PEREIRA (2008) propôs uma formulação de Programação Linear Inteira Mista (MILP) para o PRTE, assumindo as mesmas hipóteses e simplificações, mantendo as mesmas restrições e objetivo do modelo proposto por ALVES (2007). No intuito de simplificar a descrição da formulação, optou-se por codificar os locais e produtos considerados, conforme se depreende da Tabela 1.

Tabela 1: Códigos utilizados na representação dos locais e produtos

Local	Número	Produto	Número
RECAP	1	Óleo Combustível de Exportação	1
REPLAN	2	Óleo Combustível	2
BARUERI	3	LCO	3
SÃO CAETANO	4	Bunker	4
REVAP	5	Gasóleo para Craqueamento	5
CUBATÃO	6		
RPBC	7		
SANTOS	8		

A nomenclatura para a formulação proposta por PEREIRA (2008) é dada a seguir:

3.1 Índices

$d_1, d_2 = 1, \mathrm{K}\ , DLOC$	locais
$p_1, p_2 = 1, \mathrm{K}\ , PPROD$	produtos
$t = 1, \mathrm{K}\ , LDUTO$	trechos (lotes) que compõem os dutos
$k = 1, \mathrm{K}\ , KTEMP$	intervalos de tempo

3.2 Parâmetros:

$DLOC$	quantidade de locais
$PPROD$	quantidade de produtos
$LDUTO$	quantidade de lotes que compõem o maior duto
$KTEMP$	quantidade de intervalos de tempo
W_1	peso (coeficiente) na função objetivo (FO) do critério de otimização relativo à quantidade de produto enviada
W_2	peso (coeficiente) na função objetivo (FO) do critério de otimização relativo ao número de interfaces

$DUTO_{(d_1, d_2)}$	1, se existe duto com origem em d1 e destino em d2
$NUMLOTES_{(d_1, d_2)}$	número de lotes (trechos) que contém cada duto
$VOLLOTE_{(d_1, d_2)}$	volume (m3) dos lotes do duto com origem em d1 e destino em d2
$PRODUCAO_{(d_1, p_1)}$	volume (m3) de produção do produto p1 no local d1 em cada período de tempo (já subtraído o consumo local)
$DEMANDA_{(d_1, p_1)}$	volume (m3) demandado do produto p1 no local d1 em cada período de tempo (já subtraído a produção local)
$VOLMAX_{(d_1, p_1)}$	capacidade (m3) volumétrica máxima do produto p1 no local d1
$VOLZERO_{(d_1, p_1)}$	volume (m3) inicial do produto p1 no local d1
$LOTEZERO_{(d_1, d_2, p_1, t)}$	1, se o trecho t do duto d1 → d2 contém produto p1 no instante inicial

3.3 Variáveis Binárias:

$recebe_{(d_1, d_2, p_1, k)}$	1, se o local d2 recebe o produto p1, no tempo k, vindo do local d1
$envia_{(d_1, d_2, p_1, k)}$	1, se o local d1 envia o produto p1 , para o local d2, no tempo k
$contam_{(d_1, d_2, p_1, p_2, k)}$	1, se há contaminação devido a interface entre os produtos p1 e p2, no tempo k, no duto entre d1 e d2
$prod_dt_{(d_1, d_2, p_1, t, k)}$	1, se o trecho t do duto entre d1 e d2 contém o produto p1, no tempo k

3.4 Variáveis Contínuas:

$estoque_{(d_1, p_1, k)}$	volume do produto p1 em estoque no local d1, no tempo k

O índice t referente aos trechos de um determinado duto assume valor "1" para trecho mais próximo da origem e o valor igual a $NUMLOTES_{(d_1, d_2)}$ para o trecho mais próximo do destino. As variáveis $estoque_{(d_1, p_1, k)}$ assumem valores reais não-negativos.

As variáveis e restrições somente são criadas:

a) quando existe o duto em questão: $DUTO_{(d_1, d_2)} = 1$;

b) de acordo com a quantidade máxima de trechos do duto: $t \leq NUMLOTES_{(d_1, d_2)}$ e;

c) se os locais de origem e destino podem armazenar o produto em questão: $VOLMAX_{(d_1, p_1)} > 0$.

3. 5 Função Objetivo

A função objetivo do PRTE é representada pela equação 1.1.

$$Min\ C = W_1 * \sum_{d_1}\sum_{d_2}\sum_{p_1}\sum_{k}\left(VOLLOTE_{(d_1,d_2)} * envia_{(d_1,d_2,p_1,k)}\right) + W_2 * \sum_{d_1}\sum_{d_2}\sum_{p_1}\sum_{p_2}\sum_{k} contam_{(d_1,d_2,p_1,p_2,k)} \quad (1.1)$$

O primeiro termo da FO corresponde ao volume total de produto enviado, que é dado pela soma dos volumes de produtos bombeados em cada duto. O parâmetro $VOLLOTE_{(d_1,d_2)}$ dá o volume do lote padronizado para o duto d1 → d2, que será contabilizado se houver bombeamento, isto é, se $envia_{(d_1,d_2,p_1,k)} = 1$. O segundo termo contabiliza o número de interfaces. A variável $contam_{(d_1,d_2,p_1,p_2,k)}$ detecta as interfaces entre os produtos p1 e p2, no duto d1 → d2, no período de tempo k.

Como a função objetivo abrange quantidades volumétricas e número de interfaces, o valor de W_2 deve ser escolhido de tal forma que o segundo termo não seja desprezível em relação ao primeiro. Sendo assim, foram assumidos os seguintes valores para os pesos da função objetivo: $W_1 = 1$ e $W_2 = 1*10^5$. Esses valores foram utilizados por Alves (2007) e Pereira (2008) em suas formulações. A idéia é que este valor de W_2 corrija a ordem de grandeza da parcela referente às interfaces e ainda dê prioridade à minimização deste critério.

3.6 Restrições dos Locais

Os balanços de massa dos locais são dados pelas restrições (1.2) e (1.3). A primeira (1.2) se refere ao primeiro período da programação e se difere da segunda (1.3) pelo uso do estoque inicial. A quantidade estocada do produto p1 no local d1 em um dado intervalo de tempo k é dada pelas quantidades:

a) estocada em d1 no período anterior ou pelo estoque inicial (para k=1);
b) produzida em d1;
c) recebida em d1;
d) demandada por d1 e;
e) enviada por d1.

Vale lembrar que cada local tem ou um valor de produção ou um valor de demanda para determinado produto.

$$estoque_{(d_1,p_1,k)} = VOLZERO_{(d_1,p_1)} + PRODUCAO_{(d_1,p_1)} + \sum_{d_2} recebe_{(d_2,d_1,p_1,k)} * VOLLOTE_{(d_2,d_1)} - DEMANDA_{(d_1,p_1)} - \sum_{d_2} envia_{(d_1,d_2,p_1,k)} * VOLLOTE_{(d_1,d_2)} \qquad \forall d_1,\ p_1 \quad k = 1 \quad (1.2)$$

$$estoque_{(d_1,p_1,k)} = estoque_{(d_1,p_1,k-1)} + PRODUCAO_{(d_1,p_1)} + \sum_{d_2} recebe_{(d_2,d_1,p_1,k)} * VOLLOTE_{(d_2,d_1)} - DEMANDA_{(d_1,p_1)} - \sum_{d_2} envia_{(d_1,d_2,p_1,k)} * VOLLOTE_{(d_1,d_2)} \qquad \forall d_1,\ p_1 \quad k \geq 2 \quad (1.3)$$

As quantidades estocadas devem respeitar os limites mínimos e máximos impostos pelas restrições (1.4), assumindo valores reais não-negativos.

$$0 \le estoque_{(d_1,\, p_1,\, k)} \le VOLMAX_{(d_1,\, p_1)} \qquad \forall d_1,\, p_1,\, k \tag{1.4}$$

3.7 Restrições nos dutos

A maior parte das restrições se refere à operação dos dutos. Como estes operam de forma intermitente, é necessário fazer um acompanhamento do deslocamento dos lotes para que se possa determinar qual o produto e quando será recebido no destino.

Além disso, como o produto recebido pode ser bombeado para outro nó da rede, deve-se saber exatamente qual o volume se tem em estoque.

As restrições (1.5) garantem que será enviado no máximo um produto p1 em cada intervalo de tempo k pelo duto d1 → d2. As restrições (1.6) garantem que o produto bombeado p1 é igual àquele contido no primeiro trecho do duto (t = 1), ou seja, o que está sendo enviado está entrando no início do duto. As restrições (1.7) afirmam que cada trecho t do duto d1 → d2 pode conter apenas um tipo de produto p1, em cada intervalo de tempo k.

$$\sum_{p_1} envia_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, k)} \le 1 \qquad \forall d_1,\, d_2,\, k \tag{1.5}$$

$$prod_dt_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, t,\, k)} \ge envia_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, k)} \qquad \forall d_1,\, d_2,\, p_1,\, k \quad t = 1 \tag{1.6}$$

$$\sum_{p_1} prod_dt_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, t,\, k)} = 1 \qquad \forall d_1,\, d_2,\, t,\, k \tag{1.7}$$

As equações (1.8) e (1.9) representam deslocamento dos lotes dentro do duto, para o primeiro intervalo de tempo (k = 1) e para k ≠ 1 respectivamente. Essas restrições garantem que se o duto está em operação, isto é, se $\sum_{p_1} envia_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, k)} = 1$, os lotes são deslocados. Neste caso, os produtos contidos do primeiro ao penúltimo trecho são deslocados para o trecho seguinte. Ressalta-se que o produto contido no primeiro trecho (t = 1) é dado pela restrição (1.6).

$$\begin{gathered} prod_dt_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, t,\, k)} - \sum_{p_1} envia_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, k)} \ge LOTEZERO_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, t-1)} - 1 \\ \forall d_1,\, d_2,\, p_1 \quad t \ge 2 \quad k = 1 \end{gathered} \tag{1.8}$$

$$\begin{gathered} prod_dt_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, t,\, k)} - \sum_{p_1} envia_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, k)} \ge prod_dt_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, t-1,\, k-1)} - 1 \\ \forall d_1,\, d_2,\, p_1 \quad t \ge 2 \quad k \ge 2 \end{gathered} \tag{1.9}$$

Além disso, quando o duto está em operação, o lote que estava contido no último trecho deve ser recebido no destino (d2), conforme mostram as restrições (1.10) e (1.11). Por sua vez, a restrição (1.12) garante que só há recebimento, se o duto estiver em operação e que é possível receber no máximo um produto (um lote) em cada intervalo de tempo.

$$\begin{gathered} recebe_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, k)} - \sum_{p_1} envia_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, k)} \ge LOTEZERO_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, NUMLOTES_{(d_1,\, d_2)})} - 1 \\ \forall d_1,\, d_2,\, p_1 \quad k = 1 \end{gathered} \tag{1.10}$$

$$recebe_{(d_1,d_2,p_1,k)} - \sum_{p_1} envia_{(d_1,d_2,p_1,k)} \geq prod_dt_{(d_1,d_2,p_1,NUMLOTES_{(d_1,d_2)},k-1)} - 1$$
$$\forall d_1, d_2, p_1 \quad k \geq 2 \tag{1.11}$$

$$\sum_{p_1} recebe_{(d_1,d_2,p_1,k)} = \sum_{p_1} envia_{(d_1,d_2,p_1,k)} \qquad \forall d_1, d_2, k \tag{1.12}$$

Nos intervalos em que o duto não está em operação (não há bombeamento), os lotes devem permanecer parados dentro do duto, o que é dado pelas restrições (1.13) e (1.14).

$$prod_dt_{(d_1,d_2,p_1,t,k)} + \sum_{p_1} envia_{(d_1,d_2,p_1,k)} \geq LOTEZERO_{(d_1,d_2,p_1,t)}$$
$$\forall d_1, d_2, p_1, t \quad k = 1 \tag{1.13}$$

$$prod_dt_{(d_1,d_2,p_1,t,k)} + \sum_{p_1} envia_{(d_1,d_2,p_1,k)} \geq prod_dt_{(d_1,d_2,p_1,t,k-1)}$$
$$\forall d_1, d_2, p_1, t \quad k \geq 2 \tag{1.14}$$

Finalmente, as restrições de interface são dadas segundo (1.15) e (1.16). Estas restrições detectam o contato entre dois produtos distintos dentro do duto (p1 ≠ p2). Esta condição é caracterizada sempre que é bombeado um produto (p2) diferente daquele (p1) que estava contido no primeiro trecho. Cabe-se ressaltar que estas restrições garantem que quando houver interface, ela será contabilizada nas variáveis $contam_{(d_1,d_2,p_1,p_2,k)}$ que assumirão o valor 1, mas se não há interface, estas variáveis não estão "amarradas". Por exemplo, se o primeiro trecho do duto contém um produto p1 de forma que $prod_dt_{(d_1,d_2,p_1,t,k-1)} = 1$ e não é bombeado um produto $p_2 \neq p_1$ de forma que $envia_{(d_1,d_2,p_2,k)} = 0$, a variável $contam_{(d_1,d_2,p_1,p_2,k)}$ pode assumir os valores Zero ou Um. No entanto, como a função objetivo procura minimizar o número de interfaces, esta variável assumirá o valor Zero na solução ótima.

$$contam_{(d_1,d_2,p_1,p_1,k)} - LOTEZERO_{(d_1,d_2,p_1,t)} - envia_{(d_1,d_2,p_2,k)} \geq -1$$
$$\forall d_1, d_2, p_1 \neq p_2 \quad t = 1 \quad k = 1 \tag{1.15}$$

$$contam_{(d_1,d_2,p_1,p_1,k)} - prod_dt_{(d_1,d_2,p_1,t,k-1)} - envia_{(d_1,d_2,p_2,k)} \geq -1$$
$$\forall d_1, d_2, p_1 \neq p_2 \quad t = 1 \quad k \geq 2 \tag{1.16}$$

As restrições (1.17), (1.18), (1.19) e (1.20) definem que as variáveis em questão são binárias.

$$recebe_{(d_1,d_2,p_1,k)} \in \{0,1\} \qquad \forall d_1, d_2, p_1, k \tag{1.17}$$

$$envia_{(d_1,d_2,p_1,k)} \in \{0,1\} \qquad \forall d_1, d_2, p_1, k \tag{1.18}$$

$$contam_{(d_1,d_2,p_1,p_2,k)} \in \{0,1\} \qquad \forall d_1, d_2, p_1, p_2, k \tag{1.19}$$

$$prod_dt_{(d_1, d_2, p_1, t, k)} \in \{0, 1\} \qquad \forall d_1, d_2, p_1, t, k \tag{1.20}$$

4. Nova formulação

Em função da complexidade do problema abordado, com a formulação proposta por Pereira (2008) não foi possível obter soluções viáveis, mesmo com 24 horas de execução, para as instâncias onde a discretização do horizonte de tempo era de sete dias. Nesse caso, a autora optou por reduzir o horizonte de planejamento e simplificar a rede original mediante a eliminação de alguns produtos de alguns locais e de um duto.

Para obtenção de soluções viáveis para o problema original são propostas algumas modificações na formulação original de Pereira (2008), que passam a ser descritas em detalhes a seguir.

4. 1 Modelo Linear Inteiro

Apesar de o modelo proposto por Pereira (2008) ser um modelo MILP, pode-se constatar que as variáveis contínuas $estoque_{(d_1, p_1, k)}$ só figuram nas restrições (1.2), (1.3) e (1.4). Como as restrições (1.2) e (1.3) são de igualdade, é possível substituí-las diretamente na restrição (1.4). Ao se eliminar as variáveis de $estoque_{(d_1, p_1, k)}$, obtém-se um novo modelo, agora um IP e não mais um MILP, e reduz-se o número de restrições.

4.2 Restrições adicionais de interface

No modelo proposto por Pereira (2008), a existência de uma interface implica necessariamente que as variáveis $prod_dt_{(d_1, d_2, p_1, t, k-1)}$ e $envia_{(d_1, d_2, p_2, k)}$ devem assumir o valor um. Quando essas variáveis assumirem o valor zero, a variável de interface pode valer zero ou um, conforme se constata na restrição (1.16). Entretanto, como a função objetivo minimiza o número de interfaces, na solução ótima estas variáveis de interface estarão necessariamente zeradas.

Por outro lado, é possível que as soluções intermediárias geradas pelo satisfaçam a restrição (1.16), mas apresentem, por exemplo, as variáveis de $contam_{(d_1, d_2, p_1, p_1, k)}$ e $prod_dt_{(d_1, d_2, p_1, t, k-1)}$ não-nulas e variáveis $envia_{(d_1, d_2, p_2, k)}$ nulas $(1-1-0 \geq -1)$. Nesse caso, estas soluções intermediárias não são viáveis para o problema original. Para contornar esse inconveniente foram inseridas as seguintes restrições (1.16a) e (1.16b). Elas indicam que quando existe uma interface, em um dado tempo k, entre os produtos p_1 e p_2 então necessariamente devemos ter o produto p_1 no primeiro trecho do duto no período anterior e o produto enviado no tempo k deve ser o produto p_2.

$$\begin{aligned} &-contam_{(d_1, d_2, p_1, p_2, k)} + prod_dt_{(d_1, d_2, p_1, t, k-1)} \geq 0 \\ &\forall d_1, d_2, p_1 \neq p_2 \quad t = 1 \quad k \geq 2 \end{aligned} \tag{1.16a}$$

$$\begin{aligned} &-contam_{(d_1, d_2, p_1, p_1, k)} + envia_{(d_1, d_2, p_2, k)} \geq 0 \\ &\forall d_1, d_2, p_1 \neq p_2 \quad t = 1 \quad k \geq 2 \end{aligned} \tag{1.16b}$$

4.3 Restrição de continuidade de produtos nos trechos

A terceira modificação na formulação original deve-se à inclusão de uma nova restrição de continuidade de produtos nos trechos (1.21): sempre que existir um produto em um determinado trecho de um duto, então necessariamente esse mesmo produto deve estar no trecho anterior do duto, no período anterior.

$$\begin{aligned} & -prod_dt_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, t,\, k)} + prod_dt_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, t-1,\, k-1)} \geq 0 \\ & \forall d_1, d_2, p_1, \quad t \geq 2, \quad k \geq 2 \end{aligned} \tag{1.21}$$

4.4 Horosazonalidade

A energia elétrica é fundamental para o desenvolvimento econômico de muitos países, dentre eles o Brasil. A crise energética ocorrida entre os anos de 2000 e 2001 reacendeu o debate acerca dessa temática e trouxe no seu bojo a necessidade de reestruturação do setor, tendo como objetivo principal o uso racional dessa fonte. Nesse contexto, tanto o setor público quanto privado procuram desenvolver instrumentos para o uso sustentável deste recurso. A título de exemplo, pode-se destacar a importância do horário de verão, como um elemento redutor do consumo de energia em diversos estados brasileiros. Pelo lado do setor privado, uma das medidas adotadas é a redução do uso de energia no horário de pico (18h às 21h). Na indústria petrolífera, em particular, no caso de oleodutos, o envio de produtos no horário de pico implica, necessariamente, em um gasto adicional de energia, que é fruto da tarifa extra da energia elétrica que o processo requer. Nesse trabalho esse comportamento foi modelado com um custo adicional na função objetivo de 10% do custo total de bombeamento no horário de pico. Assim, sempre que houver um envio de produto nesse horário contabilizar-se-á um aumento percentual de 10% na correspondente parcela da função objetivo, conforme destacado na equação (1.22).

$$\begin{aligned} Min\ C = {} & W_1 * \sum_{d_1}\sum_{d_2}\sum_{p_1}\sum_{k}\left(VOLLOTE_{(d_1,\, d_2)} * envia_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, k)}\right) + \\ & W_2 * \sum_{d_1}\sum_{d_2}\sum_{p_1}\sum_{p_2}\sum_{k} contam_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, p_2,\, k)} + \\ & 0{,}1 * \sum_{d_1}\sum_{d_2}\sum_{p_1}\sum_{s}\left(VOLLOTE_{(d_1,\, d_2)} * envia_{(d_1,\, d_2,\, p_1,\, s)}\right),\ onde\ s \in \Theta \\ \Theta : {} & conjunto\ de\ todos\ horários\ de\ pico\ no\ horizonte\ de\ planejamento \end{aligned} \tag{1.22}$$

4. Resultados Computacionais

O modelo IP proposto neste artigo foi testado em três cenários construídos por Alves (2007) e reproduzidos por Pereira (2008). Os testes foram realizados em um computador Intel Core Duo, 2.66 GHz e 8 GB de RAM, com sistema operacional Windows Server 2003. Nesses testes, o algoritmo MILP proposto por Pereira (2008) não obteve soluções viáveis para nenhuma das instâncias. Com a reformulação foi possível encontrar, para todas as instâncias, soluções viáveis e melhores que as obtidas pelo Algoritmo Genético, conforme se depreende das Tabelas 2, 3 e 4. Para a primeira instância foi possível encontrar uma solução com duas interfaces a

menos que a obtida pelo AG. O tempo para encontrar a melhor solução, nessa instância, foi elevado apenas no modelo que considera o horário de pico. Na segunda instância, foi possível reduzir em apenas uma interface e o tempo para o modelo sem horário de pico foi mais elevado que na instância anterior. Na terceira reduziu-se em duas unidades o número de interfaces, mas os tempos computacionais foram elevados. Destaque-se ainda que, apesar de elevados, esses tempos são inferiores à quatro horas, que é o tempo limite que um operador dispõe para realizar a programação na prática. Esses tempos computacionais, por vezes elevados, são fruto do porte dos modelos em questão, os quais possui cerca de 36.500 restrições e 14.400 variáveis inteiras.

Tabela 2: Resultados obtidos para a primeira instância (inst1-int-disc4-h7)

	AG (Alves, 2007)	IP Reformulação	IP com horário de pico
Função Objetivo	842.960,00	638.040,00	638.348,00
Qtde. de interfaces	7	5	5
Total bombeado	142.960,00	138.040,00	138.040
Tempo (s)	609	942	14.239

Tabela 3: Resultados obtidos para a segunda instância (inst2-int-disc4-h7)

	AG (Alves, 2007)	IP Reformulação	IP com horário de pico
Função Objetivo	901.680,00	759.560,00	760.712,00
Qtde. de interfaces	7	6	6
Total bombeado	201.680,00	159.560,00	159.560
Tempo (s)	609	2.963	13.088

Tabela 4: Resultados obtidos para a terceira instância (inst3-int-disc4-h7)

	AG (Alves, 2007)	IP Reformulação	IP com horário de pico
Função Objetivo	1.457.000,00	1.194.800,00	1.362.108
Qtde. de interfaces	12	10	12
Total bombeado	257.160,00	194.800,00	161.320
Tempo (s)	609	11.409	7.973

5. Conclusões

Os oleodutos constituem um importante elemento na cadeia logística da indústria petrolífera, pois são responsáveis pelo transporte de petróleo e derivados das unidades de origem para os destinos. A programação destes dutos é objeto de um número crescente de estudos com o intuito de desenvolver ferramentas que possam fomentar o processo de tomada de decisão pelo operador especializado. Por outro lado, em função da complexidade do problema isso se torna um grande desafio.

No presente trabalho desenvolveu-se uma ferramenta para programação de uma rede de dutos composta por três refinarias e cinco terminais, e que transporta cinco produtos em um horizonte de planejamento de uma semana. Foram desenvolvidos dois modelos que diferem apenas pela inclusão de uma parcela relativa ao custo de envio no horário de pico, que é um valor adicional pago pelo consumo extra de energia com o objetivo de promover um uso racional da energia elétrica.

Com esses modelos foi possível encontrar soluções de melhor qualidade que as obtidas

pelo AG. Ressalte-se que as soluções obtidas pelo AG são melhores que as obtidas pelo operador. O modelo que considera o horário de pico teve, em todas as instâncias, maior valor de função objetivo. Isso nos remete a importância que esse ponderador exerce na função objetivo, uma vez que o modelo tenta mitigar o número de bombeamentos nesses horários. Os tempos computacionais, que estão diretamente atrelados ao porte do modelo, foram inferiores a quatro horas, que é tempo limite da programação realizada por um técnico especializado.

Em síntese, os resultados obtidos fornecem ao tomador de decisão a possibilidade de escolha entre dois modelos em função da avaliação que se faça do *trade-off* entre tempo computacional e o valor da função objetivo. O primeiro modelo proposto por ALVES (2007) alcança soluções de pior qualidade, mas em um tempo computacional baixo e o modelo aqui proposto encontra soluções de boa qualidade, em tempos computacionais mais elevados. Entretanto, a redução desses tempos computacionais é um limitante no tocante a aplicação prática da metodologia. Nesse contexto, novos estudos devem ser encaminhados visando o desenvolvimento de novos algoritmos customizados para o problema, como por exemplo, branch-and-cut e branch-and-cut-and-price.

Referências Bibliográficas

Alves, V. R. F. M., (2007), "Programação de transferência de derivados de petróleo em uma rede dutoviária usando Algoritmo Genético". Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia de Produção, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Ballou, **R. H.**, (2001), "Gerenciamento da cadeia de suprimentos", Bookman.

Pereira, B. C., (2008), "Programação de transferência de derivados de petróleo em rede dutoviária: uma análise exata via branch-and-bound". Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia de Produção, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Rejowski Jr., R. e PINTO, J. M., (2003), "Scheduling of a multiproduct pipeline system". *Computers & Chemical Engineering*, v.27, n.8-9, p.1229-1246.

Sasikumar, M., et al., (2003), "Pipes: A heuristic search model for pipeline schedule generation". *Knowledge-Based Systems*, v.10, n.3, p.169-175, 1997.

Souza Filho , E. M., Alves, V.R.F.M, Ferreira Filho V.J.M, (2006), "Utilização de técnicas de pesquisa operacional em problemas de distribuição dutoviária: uma revisão". *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)*, Goiânia.

Souza Filho, E. M., (2007), "Variable Neighborhood Search (VNS) aplicado ao problema de distribuição dutoviária". Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia de Produção, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.