

PROGRAMAÇÃO DE UMA REDE DUTOVIÁRIA CONSIDERANDO PERÍODOS DE MANUTENÇÃO PROGRAMADA

Erito Marques de Souza Filho

COPPE-Produção/UFRJ / DTL-UFRRJ
Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco F, sala 103
eritomarques@yahoo.com.br

Laura Bahiense

COPPE-Produção/UFRJ
Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco F, sala 103
laura@pep.ufrj.br

Virgílio José Martins Ferreira Filho

COPPE-Produção/UFRJ / DTL-UFRRJ
Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco F, sala 103
virgilio@ufrj.br

RESUMO

Os dutos são considerados um dos meios mais eficientes para transporte de petróleo e derivados. Eles fazem a conexão entre origens e destinos, interligando, por exemplo, refinarias e centros de distribuição. O presente trabalho tem por objetivo aprimorar um modelo de Programação Linear Inteira para auxiliar o tomador de decisão em relação à programação das atividades de distribuição e transporte de derivados de petróleo em uma rede dutoviária considerando a existência de períodos de manutenção programada. Essa programação deve responder quais produtos devem ser bombeados, em que ordem essa tarefa deve ser realizada, o volume de cada bombeamento, suas respectivas vazões e o destino de cada um dos produtos, desde que sejam atendidas um conjunto de restrições operacionais, de forma a otimizar um conjunto de critérios pré-estabelecidos pelo decisor.

PALAVRAS CHAVE. Dutos, Programação Linear Inteira, Manutenção Programada.

P&G: Pesquisa Operacional na área de petróleo e gás

ABSTRACT

Pipelines are considered one of the most efficient means of transporting oil and derivatives. They make the connection between sources and destinations, linking, for example, refineries and distribution centers. The present work aims to improve an integer linear programming model to assist the decision maker regarding the schedule of activities for distribution and transportation of oil in a pipeline network considering the existence of periods of predetermined maintenance. This schedule should answer which products should be pumped, in order that this task should be performed, the volume of each pumping, their flow and destination of each product, provided it complies with a set of operational constraints and it optimizes a set of criteria predetermined by the decision maker.

KEYWORDS. First keyword. Second keyword. Last keyword.

P&G: OR in oil and gas

1. Introdução

A tendência de nacionalização e globalização, constatada nas últimas décadas, foi responsável por uma maior preocupação com os sistemas logísticos nas mais diversas áreas. Nas indústrias, a logística contribui para incrementar os processos de produção e distribuição, promovendo a eficiência e competitividade das empresas. O elemento chave na cadeia logística é seu sistema de transporte; quando eficiente e barato, ele contribui para aumentar a concorrência de mercado, elevar as economias de escala e promover a redução do preço das mercadorias (TSENG, TAYLOR e YUE, 2005; BALLOU, 2001).

O transporte de petróleo e derivados tem um papel fundamental na redução dos custos logísticos das empresas petrolíferas. No Brasil, em particular, isso constitui um grande desafio, pois a maior parte do petróleo é produzida no mar, devendo ser transportada para as refinarias para que sejam produzidos derivados de maior valor agregado. Após o processamento nas refinarias, esses derivados são direcionados aos centros consumidores e aos terminais marítimos, onde serão embarcados para distribuição no próprio país ou no exterior (SANGINETO, 2006).

Os dutos são considerados um dos meios mais eficientes para transporte de petróleo e derivados. Eles fazem a conexão entre origens e destinos, interligando, por exemplo, refinarias e centros de distribuição. Apesar ter um elevado custo de implementação, seus custos de operação são baixos quando comparados com outros modais de transporte. Além disso, eles possuem elevados níveis de confiabilidade, menores taxas de perda de produto, sofrem menor influência das condições climatológicas e possuem um baixo impacto ambiental (REJOWSKI e PINTO, 2003; SASIKUMAR *et al.*, 1997; RENNÓ e LEMGRUBER, 2009).

A atividade de distribuição e transporte de derivados ocupa uma posição de destaque na cadeia de suprimentos da indústria petrolífera. Segundo Felizari (2009) ela deve coordenar objetivos de produção e compromissos contratados com clientes e distribuidores tendo como objetivo otimizar o desempenho econômico do sistema, levando-se em consideração alterações nas demandas, especificações de produtos, datas de entrega, qualidade e quantidade de matérias-primas e na disponibilidade e desempenho das unidades de processo. Em particular, a programação das atividades de transporte dutoviário constitui um grande desafio: elas são na sua maioria complexas e sua relevância do ponto de vista econômico está atrelada ao fato que uma parcela significativa do custo do petróleo depende de seu custo de transporte (LIPORACE, 2005). Uma programação bem realizada pode trazer economias significativas para a empresa, bem como a otimização dos recursos disponíveis, um melhor aproveitamento de seu capital humano e ganhos de produtividade que podem ser traduzir em uma maior competitividade. Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo aprimorar um modelo de Programação Linear Inteira para auxiliar o tomador de decisão em relação à programação das atividades de distribuição e transporte de derivados de petróleo em uma rede dutoviária. Essa programação deve responder quais produtos devem ser bombeados, em que ordem essa tarefa deve ser realizada, o volume de cada bombeamento, suas respectivas vazões e o destino de cada um dos produtos, desde que sejam atendidas um conjunto de restrições operacionais, de forma a otimizar um conjunto de critérios pré-estabelecidos pelo decisor.

2. Estado da arte

A literatura a respeito do transporte dutoviário teve suas origens no fim da década de 60. Os primeiros trabalhos desenvolvidos tratavam basicamente da utilização de um poliduto que transportava poucos produtos. Nessa época o desenvolvimento de algoritmos para o problema era bastante incipiente, pois não se dispunha de um aparato computacional que se verifica nos dias de hoje. Nesse contexto, os primeiros trabalhos desenvolvidos neste assunto focavam a solução de problemas baseadas no cômputo de cálculos manuais e/ou o uso de planilhas eletrônicas como se verifica, por exemplo, em Amiragov e Nuriev (1970).

A quantidade de trabalhos sobre programação de dutos tem crescido bastante na última década, principalmente aqueles relativos à rede dutos, que atualmente superam a quantidade de trabalhos envolvendo um único duto. A maior parte dos trabalhos envolvendo um único poliduto utiliza modelos MILP, entretanto existem abordagens heurísticas, como a de Sangineto (2006).

Isso pode ser explicado, quando se leva em conta porte dos modelos matemáticos gerados, os quais na maior parte das vezes podem ser resolvidos em um tempo computacional razoável. Nos trabalhos relacionados à rede de dutos foram propostas diversas abordagens, tanto exatas quanto heurísticas. Apesar desse do predomínio de modelos MILP, como os desenvolvidos por Mirhassani e Jahomi (2011), Cafaro e Cerdá (2004) e Relvas et al (2006), merece destaque a técnica de Programação Lógica Por Restrições, utilizada com sucesso em alguns trabalhos recentes, como os modelos descritos em Magatão *et al.* (2008) e Lopes *et al.* (2010). Existe ainda um equilíbrio entre o uso da representação discreta e contínua do tempo.

Um detalhe importante na programação de oleodutos são as hipóteses e restrições consideradas em cada modelo. Em geral, são feitas simplificações que tem o intuito de tornar o modelo matemático mais tratável, entretanto frequentemente tais suposições ignoram algumas características relevantes do processo. Ainda, que se tenha em mente que um modelo é uma simplificação da realidade, nenhum dos modelos disponíveis hoje na literatura, contempla todas as necessidades da programação de oleodutos. Tome-se, por exemplo, que apenas o trabalho de Rejowski (2007) considera restrições hidráulicas; poucos trabalhos como, o de Felizari (2009), consideram restrições de troca de turno; ou mesmo a hipótese de vazão constante de bombeamento, muito comum nesse tipo de problema, pode não ser verdadeira. Esse panorama dá indícios de que esse tipo de problema continuará sendo objeto de estudo da comunidade científica, inclusive com um aumento na quantidade de publicações na área, nesta próxima década, em função dos óbices a serem transpostos e do desafio que eles representam.

De uma maneira geral, os trabalhos desenvolvidos possuem como característica principal o desenvolvimento de ferramentas computacionais que auxiliem o tomador de decisão na tarefa de programação dos dutos. Esse foco é responsável pela literatura incipiente com relação a trabalhos teóricos, destacando-se principalmente os trabalhos de Milidiú e Liporace (2003) e Pessoa (2003). Além disso, apesar da natureza não-linear inerente nesse tipo de problema, poucos trabalhos fazem uma abordagem não linear, como se pode destacar nos trabalhos de Neiro e Pinto (2004) e Rejowski (2007). Entretanto, é importante pontuar que a utilização de qualquer método depende do *trade-off* entre a qualidade da solução obtida e o tempo computacional necessário para obtê-la. Nesse ínterim, a opção da maioria dos autores de não considerar tais tipos de modelos, reside basicamente na complexidade de obtenção de soluções viáveis, uma vez que nesse tipo de problema a quantidade de variáveis e restrições facilmente supera os limites máximos recomendados pelos pacotes de otimização que se encontram disponíveis no mercado ou o tempo computacional gasto para obtenção de alguma solução viável é significativamente elevado.

Outra particularidade relevante na literatura é a inexistência de trabalhos que considerem incerteza em alguns dos parâmetros do modelo de otimização. Novamente, a razão para tal situação está atrelada a tratabilidade dos modelos matemáticos. Destaque-se ainda, que apesar do aumento da literatura sobre o assunto, a quantidade de instâncias disponíveis para testes é bastante escassa e, além disso, não existe uma biblioteca de instâncias-testes similar a que ocorre, por exemplo, em problemas clássicos de Programação Inteira, como o Problema da Mochila ou o Problema do Caixeiro Viajante. Parte das explicações relativas a esse panorama se deve ao sigilo imposto pelas companhias na divulgação dos seus dados.

3. Problema de Transporte na Rede de Escuros

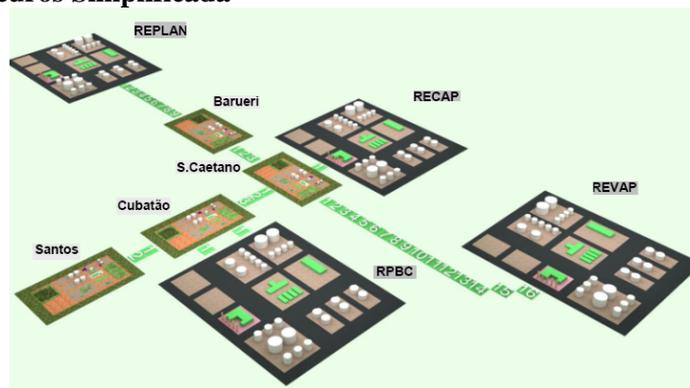
A Transpetro é a operadora logística da PETROBRÁS. Ela é responsável pelas operações relativas ao transporte de óleo, derivados, biocombustíveis e gás natural entre diversos pontos do Brasil. De acordo com as informações disponibilizadas pela companhia em seu sítio na internet, são transportados anualmente bilhões de litros de combustíveis, em uma estrutura de 7.179 mil quilômetros de oleodutos, 6.905 mil quilômetros gasodutos, 20 terminais terrestres 28 terminais aquaviários e uma frota de 52 navios petroleiros (TRANSPETRO, 2011). A rede de oleodutos da empresa está dividida em quatro Gerências Regionais, a saber, Sul, São Paulo, Centro-Oeste e Norte-Nordeste-Sudeste. Cada gerência é responsável pelos terminais terrestres e pelas estações de bombeamento situadas em sua área de atuação. As operações de transporte dutoviário são

controladas remotamente e são de responsabilidade do Centro Nacional de Controle Operacional (CNCO), localizado na sede da Transpetro no Rio de Janeiro. A Gerência de São Paulo é responsável por três redes de dutos distintas que operam de maneira independente:

- Rede de Claros: são transportados derivados de petróleo de coloração clara, baixa viscosidade e maior valor comercial, como por exemplo, o álcool etílico e os derivados leves do petróleo, como gasolina, nafta, diesel, gás liquefeito de petróleo (GLP) e querosene de aviação (Qav).
- Rede de Escuros: são transportados derivados de coloração escura, grande viscosidade e menor valor comercial, como por exemplo, o óleo combustível marítimo (*bunker*), o gásóleo para craqueamento e o resíduo atmosférico.
- Rede de abastecimento de cru: é responsável pela distribuição de petróleo para as refinarias.

O presente trabalho tem por objetivo realizar o planejamento das operações de transporte de uma rede simplificada construída a partir da Rede de Escuros. Essa rede transporta cinco tipos de produtos e é composta por oito dutos, quatro refinarias (REPLAN, RECAP, REVAP e RPBC) e quatro terminais (Barueri, São Caetano, Cubatão e Santos), conforme se depreende da Figura 1. Além disso, os dutos e o horizonte de planejamento foram discretizados. Uma versão modificada desse problema foi estudada anteriormente em Alves (2007) e Pereira (2008).

Figura 1: Rede de Escuros Simplificada



4. Modelo Matemático

Pereira (2008) propôs um modelo de Programação Linear Inteira Mista para o problema, o qual será descrito em detalhes abaixo.

Índices:

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

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

Variáveis Binárias:

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

Variáveis Contínuas:

$estoque_{(d_1, p_1, k)}$ volume do produto p_1 em estoque no local d_1 , 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: $VOLMAX_{(d_1, p_1)} > 0$.

4.1 Formulação Matemática

A função objetivo do modelo é apresentada pela equação (4.1). Ela possui duas parcelas, a primeira refere-se ao volume total de produto bombeado, o qual é dado pela soma dos volumes enviados em cada duto. O parâmetro $VOLLOTE_{(d_1, d_2)}$ representa o volume do lote padronizado para o duto $d_1 \rightarrow d_2$, que será contabilizado sempre que houver bombeamento, isto é, se $envia_{(d_1, d_2, p_1, k)} = 1$. O segundo termo calcula a quantidade total de interfaces, as quais são contabilizadas se a variável $contamin_{(d_1, d_2, p_1, p_2, k)} = 1$. Como a função objetivo trata quantidades volumétricas de produtos e número de interfaces, é necessário ponderar cada critério adequadamente de forma que o valor do peso W_2 não seja desprezível em relação ao primeiro

ponderador. Sendo assim, foram assumidos os seguintes valores para os pesos da função objetivo, conforme também foi utilizado por Alves (2007):

$$W_1 = 1$$

$W_2 = 1 * 10^5$, o volume máximo que pode ser bombeado durante o horizonte de programação de sete dias é 482.160 m³. Este valor de W_2 corrige a ordem de grandeza da parcela referentes às interfaces e ainda prioriza à minimização deste critério.

$$\begin{aligned} \text{Min } C = & W_1 * \sum_{d_1} \sum_{d_2} \sum_{p_1} \sum_k \left(\text{VOLLOTE}_{(d_1, d_2)} * \text{envia}_{(d_1, d_2, p_1, k)} \right) + \\ & W_2 * \sum_{d_1} \sum_{d_2} \sum_{p_1} \sum_{p_2} \sum_k \text{contam}_{(d_1, d_2, p_1, p_2, k)} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Restrições dos Locais

Os balanços de massa dos locais são dados pelas restrições (4.2) e (4.3). A primeira (4.2) se refere ao primeiro período da programação e se difere da segunda (4.3) pelo uso do estoque inicial. A quantidade estocada do produto p_1 no local d_1 em um dado intervalo de tempo k é dada pelas quantidades:

- estocada em d_1 no período anterior ou pelo estoque inicial (para $k = 1$);
- produzida em d_1 ;
- recebida em d_1 ;
- demandada por d_1 e;
- enviada por d_1 .

Conforme exposto anteriormente, cada local tem ou um valor de produção ou um valor de demanda para determinado produto.

$$\begin{aligned} \text{estoque}_{(d_1, p_1, k)} = & \text{VOLZERO}_{(d_1, p_1)} + \text{PRODUCAO}_{(d_1, p_1)} + \\ & \sum_{d_2} \text{recebe}_{(d_2, d_1, p_1, k)} * \text{VOLLOTE}_{(d_2, d_1)} - \text{DEMANDA}_{(d_1, p_1)} - \\ & \sum_{d_2} \text{envia}_{(d_1, d_2, p_1, k)} * \text{VOLLOTE}_{(d_1, d_2)} \quad \forall d_1, p_1 \quad k = 1 \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \text{estoque}_{(d_1, p_1, k)} = & \text{estoque}_{(d_1, p_1, k-1)} + \text{PRODUCAO}_{(d_1, p_1)} + \\ & \sum_{d_2} \text{recebe}_{(d_2, d_1, p_1, k)} * \text{VOLLOTE}_{(d_2, d_1)} - \text{DEMANDA}_{(d_1, p_1)} - \\ & \sum_{d_2} \text{envia}_{(d_1, d_2, p_1, k)} * \text{VOLLOTE}_{(d_1, d_2)} \quad \forall d_1, p_1 \quad k \geq 2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

As quantidades estocadas devem respeitar os limites mínimos e máximos impostos pelas restrições (4.4), assumindo valores reais não negativos.

$$0 \leq \text{estoque}_{(d_1, p_1, k)} \leq \text{VOLMAX}_{(d_1, p_1)} \quad \forall d_1, p_1, k \quad (4.4)$$

Restrições dos Dutos

As restrições (4.5) garantem que será enviado no máximo um produto p_1 em cada intervalo de tempo k pelo duto $d_1 \rightarrow d_2$. As restrições (4.6) garantem que o produto bombeado p_1 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 (4.7) afirmam que cada trecho t do duto $d_1 \rightarrow d_2$ pode conter apenas um tipo de produto p_1 , em cada intervalo de tempo k .

$$\sum_{p_1} \text{envia}_{(d_1, d_2, p_1, k)} \leq 1 \quad \forall d_1, d_2, k \quad (4.5)$$

$$\text{prod}_{-dt_{(d_1, d_2, p_1, t, k)}} \geq \text{envia}_{(d_1, d_2, p_1, k)} \quad \forall d_1, d_2, p_1, k \quad t = 1 \quad (4.6)$$

$$\sum_{p_1} \text{prod}_{-dt_{(d_1, d_2, p_1, t, k)}} = 1 \quad \forall d_1, d_2, t, k \quad (4.7)$$

As equações (4.8) e (4.9) representam deslocamento dos lotes dentro do duto, para o primeiro intervalo de tempo ($k = 1$) e para $k \neq 1$ respectivamente. Essas restrições garantem que se o duto está em operação, isto é, se $\sum_{p_1} \text{envia}_{(d_1, d_2, p_1, k)} = 1$, 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 do primeiro trecho ($t = 1$) é dado pela restrição (4.6).

$$\text{prod}_{-dt_{(d_1, d_2, p_1, t, k)}} - \sum_{p_1} \text{envia}_{(d_1, d_2, p_1, k)} \geq \text{LOTEZERO}_{(d_1, d_2, p_1, t-1)} - 1 \quad (4.8)$$

$$\forall d_1, d_2, p_1 \quad t \geq 2 \quad k = 1$$

$$\text{prod}_{-dt_{(d_1, d_2, p_1, t, k)}} - \sum_{p_1} \text{envia}_{(d_1, d_2, p_1, k)} \geq \text{prod}_{-dt_{(d_1, d_2, p_1, t-1, k-1)}} - 1 \quad (4.9)$$

$$\forall d_1, d_2, p_1 \quad t \geq 2 \quad k \geq 2$$

Quando o duto está em operação, o lote que estava contido no último trecho deve ser recebido no destino (d_2), conforme mostram as restrições (4.10) e (4.11). 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.

$$\text{recebe}_{(d_1, d_2, p_1, k)} - \sum_{p_1} \text{envia}_{(d_1, d_2, p_1, k)} \geq \text{LOTEZERO}_{(d_1, d_2, p_1, \text{NUMLOTES}_{(d_1, d_2)})} - 1 \quad (4.10)$$

$$\forall d_1, d_2, p_1 \quad k = 1$$

$$\text{recebe}_{(d_1, d_2, p_1, k)} - \sum_{p_1} \text{envia}_{(d_1, d_2, p_1, k)} \geq \text{prod}_{-dt_{(d_1, d_2, p_1, \text{NUMLOTES}_{(d_1, d_2)}, k-1)}} - 1 \quad (4.11)$$

$$\forall d_1, d_2, p_1 \quad k \geq 2$$

$$\sum_{p_1} \text{recebe}_{(d_1, d_2, p_1, k)} = \sum_{p_1} \text{envia}_{(d_1, d_2, p_1, k)} \quad \forall d_1, d_2, k \quad (4.12)$$

Nos intervalos em que o duto não está em operação, isto é quando não há bombeamento, os lotes devem permanecer parados dentro do duto, o que é dado pelas restrições (4.13) e (4.14).

$$\text{prod}_{-dt_{(d_1, d_2, p_1, t, k)}} + \sum_{p_1} \text{envia}_{(d_1, d_2, p_1, k)} \geq \text{LOTEZERO}_{(d_1, d_2, p_1, t)} \quad (4.13)$$

$$\forall d_1, d_2, p_1, t \quad k = 1$$

$$prod_dt_{(d_1, d_2, p_1, t, k)} + \sum_{p_1} envia_{(d_1, d_2, p_1, k)} \geq prod_dt_{(d_1, d_2, p_1, t, k-1)} \quad (4.14)$$

$$\forall d_1, d_2, p_1, t \quad k \geq 2$$

As restrições de interface são dadas segundo (4.15) e (4.16). Elas detectam o contato entre dois produtos distintos dentro do duto ($p_1 \neq p_2$). Esta condição é caracterizada sempre que é bombeado um produto (p_2) diferente daquele (p_1) que estava contido no primeiro trecho. Cabe-se ressaltar que, nessa modelagem proposta por Pereira (2008), 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 de um, mas se não há interface, estas variáveis não estão “amarradas”. Por exemplo, se o primeiro trecho do duto contém um produto p_1 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 o valor de zero ou um. No entanto, como a função objetivo minimiza o número de interfaces, esta variável será zerada na solução ótima.

$$contam_{(d_1, d_2, p_1, p_1, k)} - LOTEZERO_{(d_1, d_2, p_1, t)} - envia_{(d_1, d_2, p_2, k)} \geq -1 \quad (4.15)$$

$$\forall d_1, d_2, p_1 \neq p_2 \quad t = 1 \quad k = 1$$

$$contam_{(d_1, d_2, p_1, p_1, k)} - prod_dt_{(d_1, d_2, p_1, t, k-1)} - envia_{(d_1, d_2, p_2, k)} \geq -1 \quad (4.16)$$

$$\forall d_1, d_2, p_1 \neq p_2 \quad t = 1 \quad k \geq 2$$

As restrições (4.17), (4.18), (4.19) e (4.20) mostram que as variáveis em questão são binárias.

$$recebe_{(d_1, d_2, p_1, k)} \in \{0, 1\} \quad \forall d_1, d_2, p_1, k \quad (4.17)$$

$$envia_{(d_1, d_2, p_1, k)} \in \{0, 1\} \quad \forall d_1, d_2, p_1, k \quad (4.18)$$

$$contam_{(d_1, d_2, p_1, p_2, k)} \in \{0, 1\} \quad \forall d_1, d_2, p_1, p_2, k \quad (4.19)$$

$$prod_dt_{(d_1, d_2, p_1, t, k)} \in \{0, 1\} \quad \forall d_1, d_2, p_1, t, k \quad (4.20)$$

4.2 Atualizações na formulação Matemática

Em função da complexidade do problema abordado, a formulação proposta por Pereira (2008) não obteve soluções viáveis para as instâncias cuja discretização do horizonte de tempo era de 7 dias, mesmo com 24 horas de execução. Apesar de o modelo proposto por Pereira (2008) ser um modelo de Programação Linear Inteira Mista (MILP), constata-se que as variáveis contínuas são as variáveis $estoque_{(d_1, p_1, k)}$. Essas variáveis só figuram nas restrições (4.2), (4.3) e (4.4). Como as restrições (4.2) e (4.3) são de igualdade, é possível substituí-las diretamente na restrição (1.4). O novo modelo obtido elimina as variáveis de $estoque_{(d_1, p_1, k)}$ e reduz o número de restrições.

Além disso, na modelagem proposta pela autora, 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 1. Quando essas variáveis assumirem o valor zero, a variável de interface pode valer zero ou um, conforme se constata na restrição (4.16). Entretanto, como a função objetivo minimiza o número de interfaces, na solução ótima estas variáveis de interfaces seriam zeradas. Entretanto, é possível que as soluções intermediárias geradas durante a execução do algoritmo B&B, satisfaçam a restrição (4.16), mas apresentem, por exemplo, as variáveis $contam_{(d_1, d_2, p_1, p_1, k)}$

e $prod_dt_{(d_1, d_2, p_1, t, k-1)}$ não nulas e as variáveis $envia_{(d_1, d_2, p_2, k)}$ nulas ($1-1-0 \geq -1$). Nesse caso, essas soluções intermediárias não são viáveis para o problema original. Para contornar esse inconveniente foram inseridas as seguintes restrições (4.16a) e (4.16b). Elas indicam que quando existe uma interface, em um dado tempo k , entre os produtos p_1 e p_2 então necessariamente o produto p_1 deve ocupar o primeiro trecho do duto no período anterior e o produto enviado no tempo k deve ser p_2 .

$$\begin{aligned}
 & -contam_{(d_1, d_2, p_1, p_2, k)} + prod_dt_{(d_1, d_2, p_1, t, k-1)} \geq 0 \\
 & \forall d_1, d_2, p_1 \neq p_2 \quad t=1 \quad k \geq 2
 \end{aligned} \tag{4.16a}$$

$$\begin{aligned}
 & -contam_{(d_1, d_2, p_1, p_1, k)} + envia_{(d_1, d_2, p_2, k)} \geq 0 \\
 & \forall d_1, d_2, p_1 \neq p_2 \quad t=1 \quad k \geq 2
 \end{aligned} \tag{4.16b}$$

Outra modificação na formulação original foi à inclusão de uma nova restrição (4.21). 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. Essa restrição, denominada *knapsack cascading*, em geral acelera o desempenho do método de *branch-and-bound*, conforme descreve Rocha (2010).

$$\begin{aligned}
 & -prod_dt_{(d_1, d_2, p_1, t, k)} + prod_dt_{(d_1, d_2, p_1, t-1, k-1)} \geq 0 \\
 & \forall d_1, d_2, p_1, \quad t \geq 2, \quad k \geq 2
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

Ao longo do horizonte de programação pode ser necessário paralisar as operações, em um duto ou em um nó da rede, por um determinado período de tempo. Se um nó j estiver inoperante, então todos os dutos da rede que possuam uma extremidade em j também devem ficar inoperantes. Nesse caso, o duto não pode operar enquanto uma manutenção programada não estiver concluída. Considere o parâmetro binário $MANUT(d_1, d_2)$, que indica se um duto está com manutenção programada ou não. Seja S o conjunto de intervalos de tempo para o qual o duto deva ficar inoperante. Então não ocorrerá o envio ou recebimento de produto em todo instante $t \in S$ para todos os dutos que possuem o parâmetro $MANUT(d_1, d_2)$ igual a 1. Essa situação é modelada pelas equações (4.22) e (4.23).

$$\sum_{k \in S} envia(d_1, d_2, p, k) = 0 \mid MANUT(d_1, d_2) = 1, \forall p \tag{4.22}$$

$$\sum_{k \in S} recebe(d_1, d_2, p, k) = 0 \mid MANUT(d_1, d_2) = 1, \forall p \tag{4.23}$$

5. Experimentos computacionais

Os experimentos computacionais foram realizados em três instâncias propostas por Alves considerando a existência de manutenção programada no terminal de São Caetano no período de 16 a 20. Isso significa que, durante este período, esse terminal não deve enviar ou receber nenhum produto. Os experimentos foram implementados na linguagem Mosel e resolvidos pelo *solver* do software XPRESS-MP mediante uso da técnica *cut-and-branch*, a qual consiste na inserção de cortes apenas no nodo raiz da árvore de *branch-and-bound*. Os experimentos computacionais foram realizados em um computador Intel Core 2 Duo 2.66GHz com 8GB de

memória RAM. As instâncias utilizadas estão disponíveis no trabalho de Alves (2007) e Pereira (2008).

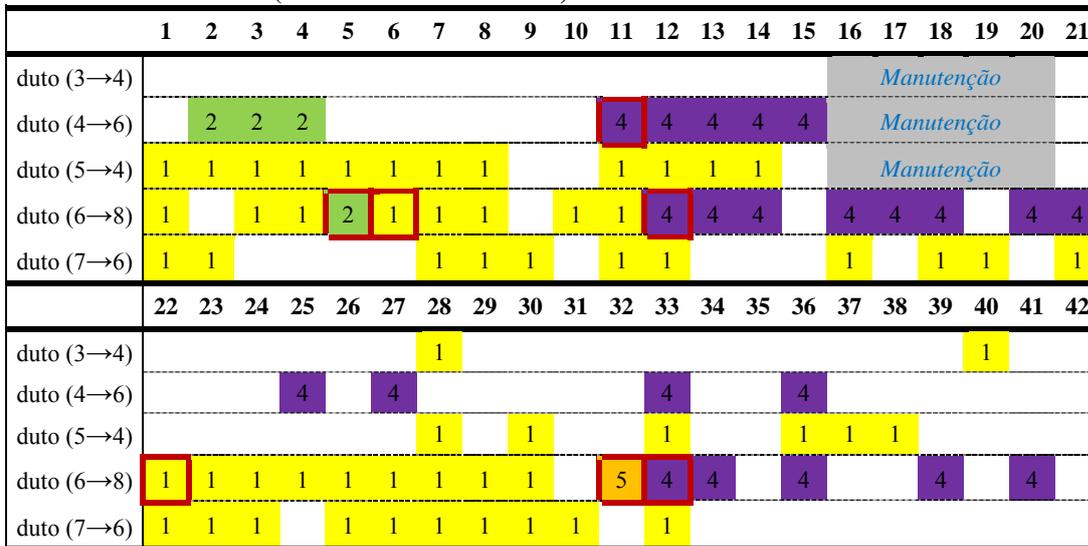
Conforme se verifica na Tabela 1, foi encontrada na primeira instância uma solução cujo valor da função objetivo é de 1.043.640, sendo bombeado um total de $143.640 m^3$ de produto, resultando na ocorrência de 9 interfaces. Para a segunda instância, ocorreram 8 interfaces, o volume total bombeado foi de $163.920 m^3$ e a função objetivo alcançou o valor de 963.920. Na terceira instância, o valor da função objetivo do modelo foi bastante elevado. Foram bombeados $181.160 m^3$ e contabilizadas 12 interfaces. Por outro lado, a etapa de pré-processamento permitiu uma redução de 45% no número de variáveis e no número de restrições. Durante a busca foram encontradas 19 soluções viáveis durante a resolução da primeira instância, 21 durante a segunda e 13 durante a terceira. Apesar de o tempo limite de execução do algoritmo ser de 4 horas (limite para obtenção de uma solução viável por um operador especializado), o tempo para necessário para alcançar a melhor solução obtida, na primeira instância foi de 16 minutos. Por outro lado, apesar de os *gaps* serem elevados, diálogos com especialistas indicaram que essas soluções são de grande valia ao processo de tomada de decisões, dada a complexidade do problema e a qualidade das soluções obtidas. Destaque-se ainda, que as soluções encontradas foram melhores que as soluções obtidas pelo operador especializado.

Tabela 1: Resultados computacionais obtidos

	instância 1	instância 2	instância 3
Função Objetivo	1.043.640	963.920	1.381.160
Qtde. de interfaces	9	8	12
Total bombeado (m^3)	143.640	163.920	181.160
Tempo Limite (s)	14.400	14.400	15400
Tempo para encontrar a melhor solução (s)	953	12010	15105
GAP (%)	77,54	83,84	89,60
Número de Variáveis (APP)*	14322	14322	14322
Número de Restrições (APP)	39289	39371	39289
Número de Variáveis (DPP)**	7747	7741	311
Número de Restrições (DPP)	21337	21315	8970
Quantidade de soluções viáveis encontradas	19	21	9
Melhor solução conhecida	1.592.320	1.588.120	1.726.720

O Gráfico 1 exibe, a título de exemplo, a solução encontrada pelo modelo para a primeira instância. Os períodos de manutenção foram satisfeitos com folga, isto significa que, caso fosse necessário estender o tempo da manutenção por mais quatro períodos devido a algum imprevisto, ainda assim a programação não sofreria alteração. Caso fosse necessário antecipar a manutenção em um período de tempo, isto seria viável apenas para as conexões São Caetano-Barueri e REVAP-São Caetano. No terminal que conecta de São Caetano a Cubatão ocorre uma interface após o envio de *bunker* no 11º período. A ligação entre Cubatão e o porto de Santos é responsável por 6 interfaces, as quais ocorrem nos períodos 5, 6, 12, 22, 32 e 33, após o envio respectivamente de óleo combustível, óleo combustível de exportação, *bunker*, óleo combustível de exportação, gásóleo para craqueamento e *bunker*. Além disso, essa conexão tem menor taxa de ociosidade, a qual é de 23%. Por outro lado, a conexão entre Barueri e São Caetano tem a maior taxa de ociosidade, com o envio de apenas duas bateladas de óleo combustível de exportação nos períodos 28 e 40.

Gráfico 1: Carta de Gantt representando, para a primeira instância com períodos de manutenção programada, os produtos enviados em cada duto ao longo do horizonte de planejamento bem como as interfaces formadas (destacadas em vermelho)



Legenda

1	óleo combustível de exportação
2	óleo combustível
3	LCO
4	bunker
5	gasóleo para craqueamento
duto (3→4)	Barueri → São Caetano
duto (4→6)	São Caetano → Cubatão
duto (5→4)	REVAP → São Caetano
duto (6→8)	Cubatão → Santos
duto (7→6)	RPBC → Cubatão

5. Conclusões

O estado-da-arte da literatura sobre dutos dá indícios de que esse tipo de problema continuará sendo objeto de estudo da comunidade científica, inclusive com um aumento na quantidade de publicações na área, nesta próxima década, em função dos óbices a serem transpostos e do desafio que eles representam. O presente trabalho apresentou um modelo matemático para programação de uma rede dutoviária considerando períodos de manutenção programada. A partir, dos resultados obtidos o gestor pode avaliar as taxas de ocupação de cada duto, as interfaces formadas bem como os produtos bombeados em cada período de tempo.

Referências

Alves, V.R.F.M. (2007), *Programação de transferência de derivados de petróleo em rede dutoviária usando algoritmo genético*. Programa de Engenharia de Produção, Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ.

Amiragov, K.A., Nuriev, F.S. (1970), Algorithm for operative control of pumping in a multiproduct pipeline. *Avtomatika i Telemekhanika*, 8, pp. 119-126.

Ballou, R. H. (2001), *Gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial*, 4ª ed., Porto Alegre: Bookmann.

Cafaro, D. C. e Cerdá, J. (2004), Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete MILP formulation. *Computers & Chemical Engineering* v.28, n.10: pp.2053-2068.

Felizari, L. C. (2009), *Programação das operações de transporte de derivados de petróleo em redes de dutos*. Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

- Liporace, F. D. S.** (2005), *Planejadores para transporte em polidutos*. Departamento de Informática. Rio de Janeiro, RJ, Brasil., PUC-Rio. Tese de Doutorado.
- Lopes, T. M. T., Ciré, A. A., De Souza, C. C. e Moura, A. V.** (2010), *A hybrid model for a multiproduct pipeline planning and scheduling problem*. *Constraints* (Dordrecht), v. 15, p. 151-189.
- Magatão, L., Arruda, L.V.R, Neves-Jr, F.** (2008), Um modelo híbrido (CLP-MILP) para *scheduling* de operações em polidutos, *Pesquisa Operacional*, v. 28, n.3, 511-543.
- Milidiú, R. L. e Liporace, F.D.S.** (2003), *Planning of pipeline oil transportation with interface restrictions is a difficult problem*. PUC-Rio, Inf.MCC56/03. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Mirhassani, S.A. e Jahromi, H.F.** (2011), Scheduling multi-product tree-structure pipeline, *Computers and Chemical Engineering*, 35, 165-176.
- Neiro, S. M. S. e Pinto, J.M.** (2004), A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains. *Computers & Chemical Engineering*, v.28, n.6-7: pp.871-896.
- Pereira, B.C.** (2008), *Programação de transferência de derivados de petróleo em rede dutoviária: uma análise exata via branch-and-bound*. Programa de Engenharia de Produção, Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ.
- Pessoa, A. A.** (2003), *Dois problemas de otimização em grafos: Transporte em redes de dutos e Busca com custos de acesso*. Departamento de Informática. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, PUC-Rio. Tese de Doutorado.
- Rejowski Jr., R. e Pinto, J.M.** (2003), Scheduling of a multiproduct pipeline system, *Computers & Chemical Engineering*, v.27, n.8-9: pp.1229-1246.
- Rejowski Jr, R.** (2007). *Otimização da programação de operações dutoviárias: formulações eficientes e considerações hidráulicas*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo.
- Relvas, S., Matos, H. A., Barbosa-Póvoa, A.P.F.D, Fialho, J., Pinheiro, A. S.** (2006), Pipeline scheduling and inventory management of a multiproduct distribution oil system. *Industrial Engineering and Chemical Research*, 45, 7841-7855.
- Rennó, M., Lemgruber, N.** (2009), O ciclo de vida de um empreendimento de dutos. In. FREIRE, J. L. F., *Engenharia de Dutos*, 1ª Edição, Rio de Janeiro, ABCM.
- Rocha, R.** (2010), *Petroleum supply planning: model, reformulations and algorithms*. Departamento de Informática. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, PUC-Rio. Tese de Doutorado.
- Sangineto, M. L. T.** (2006), Um algoritmo genético para a programação de transferências em um poliduto. Programa de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. COPPE/UFRJ. Dissertação de Mestrado
- Sasikumar, M., Ravi Prakash, P., Patil, S.M. E Ramani, S.,** (1997). Pipes: A heuristic search model for pipeline schedule generation, *Knowledge-Based Systems*, v.10, n.3, pp.169-175.
- Techo, R. E Holbrook, D.L.** (1974), Computer Scheduling the World's Biggest Product Pipeline. *Pipeline and Gas Journal*, 4, 27.
- Tseng, Y., Taylor, M. A. P., Yue, W. L.** (2005), *The Role of Logistics in Transportation*. Proceedings of 6th EASTS Conference, 21–24 September.
- Transpetro**, (2011). *Atividades: O que fazemos*, disponível em: <http://www.transpetro.com.br>, acesso em abril de 2011.