

## MODELO PLIM APLICADO À PROGRAMAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE TRANSPORTE DE DERIVADOS DE PETRÓLEO EM UM POLIDUTO

**Kira, Guilherme<sup>a</sup>**  
**Autor**

kira@utfpr.edu.br

**Neves Jr, Flávio<sup>a</sup>**  
**Orientador**

neves@utfpr.edu.br

**Felizari, Luiz Carlos<sup>a</sup>**  
**Co-Orientador**

felizari@utfpr.edu.br

### RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo matemático para auxiliar a tomada de decisão operacional das atividades de *scheduling* em um poliduto com múltiplas sangrias. O poliduto em estudo é utilizado para o transporte de derivados leves de petróleo com alto valor agregado, sendo que envolve 6 áreas operacionais, incluindo 1 refinaria e 5 terminais de distribuição. Desta forma, a carga computacional para a determinação de um *scheduling* de curto prazo com o cenário considerado é uma tarefa relevante. A abordagem adotada baseia-se na decomposição do problema, onde é investigada a aplicação de um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para determinar o escalonamento das operações de curto-prazo do poliduto. Muitas análises têm sido derivadas das soluções obtidas, que são apresentadas em um tempo computacional reduzido (na ordem de alguns segundos) para horizontes típicos de programação desta rede de dutos que é de 30 a 60 dias.

**PALAVRAS CHAVE.** Poliduto. Escalonamento. Programação Linear Inteira Mista. Área de classificação principal (P&G).

### ABSTRACT

This work addresses an optimisation structure to support the operational decision-making of scheduling activities in a multiproduct pipeline with multiple deliveries. This pipeline is used to transport petroleum derivatives and involves 6 areas (1 refinery and 5 distribution centres). Thus, the computational burden for determining a scheduling within the considered scenario is a relevant issue. A decomposition approach is proposed to address such real-world problem. A Mixed Integer Linear Programming (MILP) model is developed and used to determine the operational short-term scheduling of this multiproduct pipeline. The optimization structure has been tested in typical operational scenarios which, provides short-term scheduling details at low CPU times (few seconds). The scheduling horizon is considered to be about 30 to 60 days.

**KEYWORDS.** Multiproduct Pipeline. Scheduling. Mixed Integer Linear Programming. Main area (P&G).

---

<sup>a</sup> UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Av. Sete de Setembro, 3165, Curitiba/PR – 80230-901

## 1. Introdução

O crescimento da produção de petróleo, derivados e gás natural traz como consequência o aumento da necessidade de escoamento da produção e de distribuição de combustíveis, tornando o transporte dutoviário um modal estratégico para a indústria petrolífera. Os polidutos são em geral instalações físicas de grande porte responsáveis pela interligação entre as diversas regiões produtoras e consumidoras do país. Assim o transporte por redes de dutos possui um conjunto considerável de boas práticas de operação que envolve desde a eficiência das operações de movimentação até aspectos de segurança das refinarias e dos clientes contratados.

O balanço entre a demanda requerida e a campanha de produção, satisfazendo políticas de inventário e procedimentos de bombeio nos trechos de duto é uma tarefa complexa. Sendo uma atividade diária, o gerenciamento da programação das movimentações é realizado por especialistas, envolvendo vários sistemas de informação, mas que ainda depende da experiência dos programadores e de cálculos manuais. A escolha da programação adequada para as movimentações de produtos, levando em consideração a ordem e o horário de bombeio, os volumes transferidos, o atendimento à demanda e a manutenção de estoques de segurança pode gerar ganhos financeiros significativos.

Alguns artigos da literatura contemplam decisões de *scheduling* envolvendo polidutos, podendo-se citar Magatão, Arruda e Neves (2004), Cafaro e Cerdá (2008), Relvas *et al* (2008). Abordagens relacionadas a sistemas dutoviários são escassas e os modelos matemáticos desenvolvidos, geralmente modelos PLIM (Programação Linear Inteira Mista), não podem ser direta e eficientemente utilizados em função da topologia complexa que estas redes apresentam. O desenvolvimento de modelos de programação matemática, em especial modelos PLIM que utilizam variáveis inteiras, possuem uma natureza combinatória de difícil resolução, tornando a complexidade computacional um fator relevante. Neste sentido, este trabalho pretende aplicar uma técnica de decomposição baseada nos três elementos do *scheduling*: determinação dos recursos, sequenciamento das atividades e temporização do uso dos recursos pelas atividades. Esta estratégia foi utilizada em Boschetto *et al* (2009), na modelagem de uma complexa rede de dutos com resultados computacionais relevantes. Somada a esta técnica, a etapa de temporização é realizada por um modelo PLIM proposto para gerenciar uma série de restrições operacionais do sistema, inspirado em parte no trabalho de Cafaro e Cerdá (2008).

O presente trabalho está organizado da seguinte forma. A seção 2 descreve o problema da transferência de derivados de petróleo no poliduto em estudo, destacando as principais características e restrições que devem ser consideradas na modelagem do processo. A seção 3 detalha o modelo PLIM proposto para determinar o *scheduling* do poliduto. Na seção 4 é apresentado o cenário a ser aplicado e os principais resultados obtidos. Finalmente, a seção 5 comenta as conclusões do trabalho e a aplicabilidade da formulação proposta.

## 2. Transferência de Derivados de Petróleo em Polidutos

O cenário ilustrado na Figura 1 envolve 6 áreas operacionais (ou órgãos), incluindo 1 refinaria (órgão N1) e 5 terminais de distribuição (órgãos N2 a N6), interligando diversas localidades entre as regiões Sudeste e Centro Oeste do Brasil. Cada terminal possui um conjunto de tanques que recebem os produtos originários da refinaria N1 antes de serem distribuídos ao mercado local. A refinaria N1 faz o suprimento dos terminais mediante o envio sequenciado de bateladas de derivados de petróleo, sendo o ponto de entrada de produtos na rede.

As áreas operacionais são interligadas através de 5 trechos de duto unidirecionais (dutos d1 a d5), isto é, sem reversão do sentido de fluxo. Cada trecho de duto possui um volume particular (por exemplo, o trecho d1 tem capacidade de 39759m<sup>3</sup>). Devido às características de vazão e extensão dos trechos de duto da rede, o transporte de um produto neste sistema pode envolver vários dias até que a batelada alcance seu destino final. Por exemplo, uma única

batelada ao ser injetada no duto em N1 pode ter o volume de até  $150000\text{m}^3$  e ser entregue em mais de um terminal durante seu transporte, em bateladas de menor volume. Devido à dificuldade de movimentar os produtos a partir do conjunto de bombas na refinaria N1 (inércia do sistema), normalmente as bateladas não sofrem paradas ao longo da rede. Desta forma, operações de sangria (retirada de bateladas menores) nos terminais garantem o recebimento das bateladas e simultâneo envio dos produtos para trechos de duto seguintes. As operações de sangria nos terminais e as movimentações de produtos nos trechos de duto devem respeitar faixas típicas de vazões operacionais.

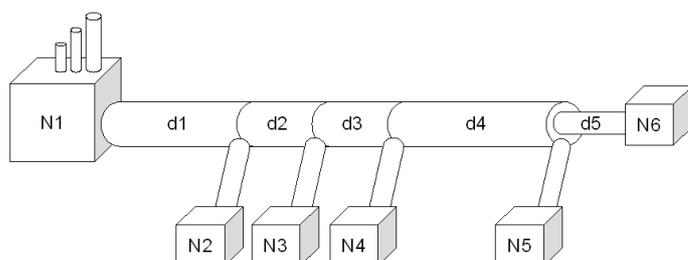


Figura 1 – Esquema simplificado da rede de dutos

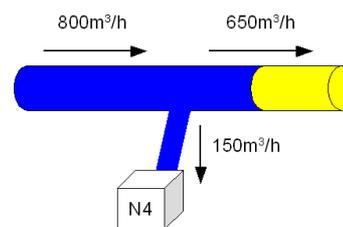


Figura 2 – Operação de sangria

A Figura 2 exemplifica uma operação de sangria ao longo da rede. Durante a operação de sangria, parte do produto é retirada através do duto secundário, sendo que a vazão da batelada a jusante é inferior (porém, não nula) àquela de montante, devendo-se manter o balanço de massa através da composição das vazões resultantes. Uma única batelada pode sofrer diversas sangrias durante seu transporte, resultando na redução do volume inicial bombeado ao passar por cada trecho do duto. Para evitar uma queda acentuada de vazão no sistema, principalmente no trecho de duto d4, um número máximo de terminais pode sofrer operações de sangria ao mesmo tempo. Atualmente, a rede transporta 3 tipos de derivados de petróleo, sendo operada 365 dias por ano, 24 horas por dia. A seguir serão descritos os principais aspectos da modelagem proposta.

### 3. Modelo de Programação do Poliduto

O objetivo da estrutura de otimização desenvolvida neste trabalho é detalhar a programação do poliduto, determinando: sequência de bombeio dos produtos a partir da refinaria N1, volume das bateladas, perfil dos estoques em cada terminal, distribuição dos produtos ao longo do horizonte de programação, volumes de sangria, respeitando restrições operacionais de vazão, capacidade de estoque dos terminais, condições iniciais da rede e demandas orientadas pelo planejamento mensal. Através das informações de demanda e produção obtidas de um sistema de planejamento mensal/bimensal e dos volumes típicos das bateladas de cada produto envolvido, uma etapa de pré-processamento determina o número de bateladas a serem movimentadas durante o horizonte de programação. Ainda nesta etapa, a sequência de envio das bateladas é gerada com base em uma heurística construtiva utilizada pelos programadores, respeitando a compatibilidade entre os produtos bombeados. Este processamento prévio permite que seja conhecido *a priori* o número de bateladas a serem movimentadas (determinação dos recursos) e a sequência de bombeio destas bateladas (sequenciamento das atividades), reduzindo a complexidade computacional do modelo PLIM proposto. O principal objetivo é gerar programações que sejam realizáveis no horizonte de programação exigido, priorizando o atendimento das restrições operacionais do problema.

Utilizando o conceito de coordenadas volumétricas, cada batelada que entra na rede através da refinaria N1 provoca o deslocamento dos volumes existentes em todos os trechos de duto adiante. Conhecendo-se os limites das vazões de sangria, a demanda, o estoque inicial e a capacidade de armazenamento de cada terminal, o modelo PLIM proposto gerencia os instantes de recebimento dos produtos para que as restrições operacionais do sistema sejam satisfeitas.

### 3.1 Função Objetivo

A função objetivo, descrita pela equação (1), consiste na minimização das variáveis de violação dos limites de tancagem ( $FO_{o,p,b2}$ ,  $EO_{o,p,b2}$ ) e do estoque meta ( $FT_{o,p,b2}$ ), relacionadas a uma batelada  $b2 \in B$ , de produto  $p \in P$ , estocada no órgão  $o \in O$ . A função objetivo é ponderada pelos fatores de custos operacionais  $kfo$ ,  $keo$  e  $kft$ .

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{\substack{o \in O, p \in P, b2 \in B \\ b2 > nbd}} FO_{o,p,b2} \cdot kfo + \sum_{\substack{o \in O, p \in P, b2 \in B \\ b2 > nbd}} EO_{o,p,b2} \cdot keo + \sum_{\substack{o \in O, p \in P, b2 \in B \\ b2 > nbd}} FT_{o,p,b2} \cdot kft \quad (1)$$

### 3.2 Restrições

O modelo de programação é sujeito a uma série de restrições operacionais numeradas de (2) até (37). A restrição (2) define a coordenada da batelada  $b1$  na rede (variável  $Coord_{b1,b2}$ ) em função de seu volume (variável  $Volume_{b1,b2}$ ), após o bombeio de uma batelada  $b2$  na origem.

$$Coord_{b1,b2} = Coord_{b1+1,b2} + Volume_{b1,b2} \quad \forall (b1,b2) \in B \mid b1 < nb, b2 \geq b1 + 1 \quad (2)$$

As restrições (3) e (4) garantem o balanço de massa das bateladas no poliduto após o bombeio de um produto na origem. O volume da batelada  $b1$  (parâmetro  $VolBat_{b1}$ ) é determinado pela etapa de pré-processamento, sendo que a variável  $VolS_{b1,b2,o}$  representa o volume de sangria da batelada  $b1$ , no órgão  $o$ , após o bombeio da batelada  $b2$ .

$$Coord_{b1,b2} = VolBat_{b1} - \sum_{\substack{(b1,b2) \in B, \\ o \in O}} VolS_{b1,b2,o} \quad \forall (b1,b2) \in B \mid b1 = b2 \quad (3)$$

$$Volume_{b1,b2} = Volume_{b1,b2-1} - \sum_{\substack{(b1,b2) \in B, \\ o \in O}} VolS_{b1,b2,o} \quad \forall (b1,b2) \in B \mid b1 \neq b2, b2 > nbd \quad (4)$$

A restrição (5) limita o volume máximo de sangria quando houver possibilidade de ocorrer tal operação ( $PS_{b1,b2,o} = 1$  e  $VolS_{b1,b2,o} \leq VolBat_{b1}$ ), caso contrário ( $PS_{b1,b2,o} = 0$  e  $VolS_{b1,b2,o} \leq 0$ ). A variável binária  $PS_{b1,b2,o}$  é definida pelas restrições (17) a (20).

$$VolS_{b1,b2,o} \leq VolBat_{b1} \cdot PS_{b1,b2,o} \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \quad (5)$$

A restrição (6) limita o volume máximo de sangria da batelada  $b1$  no evento atual (bombeio de  $b2$ ) em função do volume da batelada  $b1$  no evento anterior (bombeio de  $b2-1$ ).

$$VolS_{b1,b2,o} \leq Volume_{b1,b2-1} \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \mid b2 \geq b1 + 1 \quad (6)$$

A restrição (7) determina que o volume total de sangria da batelada  $b1$  (considerando todos os terminais de recebimento) deve ser igual ao volume da batelada  $b2$  que entra no duto.

$$\sum_{\substack{(b1,b2) \in B, \\ o \in O}} VolS_{b1,b2,o} = VolBat_{b2} \quad \forall b2 \in B \quad (7)$$

A restrição (8) determina o balanço de massa da tancagem agregada de cada órgão  $o$  após o bombeio de uma batelada  $b2$ . A variável  $VolOrg_{o,p,b2}$  determina o volume da tancagem agregada do produto  $p$ , no órgão  $o$ , após o bombeio da batelada  $b2$ . O parâmetro  $DM_{o,p,b2}$  representa o consumo linear do produto  $p$ , no órgão  $o$ , durante o bombeio da batelada  $b2$ .

$$VolOrg_{o,p,b2} = VolOrg_{o,p,b2-1} + \sum_{\substack{(b1,b2) \in B, \\ o \in O}} VolS_{b1,b2,o} - DM_{o,p,b2} \quad (8)$$

$$\forall b2 \in B, o \in O, p \in P \mid p_{b1} = p_{b2} = p, b2 > nbd$$

A restrição (9) inicializa a coordenada de cada batelada  $b1$  do estoque duto no início do cenário (parâmetro  $CEduto_{b1}$ ).

$$Coord_{b1,b2} = CEduto_{b1} \quad \forall b1 \in BEduto \mid b2 = nbd \quad (9)$$

A restrição (10) inicializa o volume agregado de produto em cada órgão  $o$ . O parâmetro  $EI_{o,p}$  representa o estoque inicial agregado do produto  $p$ , no órgão  $o$ , no início do cenário.

$$VolOrg_{o,p,b2} = EI_{o,p} \quad \forall o \in O, p \in P \mid b2 = nbd \quad (10)$$

A restrição (11) inicializa o volume de cada batelada  $b1 \in BEduto$  (referente ao estoque duto no início da programação).

$$Volume_{b1,b2} = VolBat_{b1} \quad \forall b1 \in BEduto \mid b2 = nbd \quad (11)$$

A coordenada volumétrica da cauda de uma batelada  $b1$ , após o bombeio de uma batelada  $b2$  (variável  $Cauda_{b1,b2}$ ) é dada pela restrição (12).

$$Cauda_{b1,b2} = Coord_{b1,b2} - Volume_{b1,b2} \quad \forall (b1,b2) \in B \quad (12)$$

As restrições (13) a (16) determinam se a batelada  $b1$  passou ( $PO_{b1,b2,o}=1$ ) ou alcançou ( $CO_{b1,b2,o}=1$ ) um determinado órgão  $o$ . O parâmetro  $Vduto_d$  representa o volume acumulado do trecho de duto  $d \in D$ , sendo  $Vduto_{d'}$  o volume acumulado do último trecho da rede.

$$Cauda_{b1,b2} - Vduto_d \geq -Vduto_{d'} \cdot (1 - PO_{b1,b2,o}) \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \mid d = o-1, d' = no-1 \quad (13)$$

$$Cauda_{b1,b2} - Vduto_d \leq (Vduto_{d'} + eps) \cdot PO_{b1,b2,o} - eps \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \mid d = o-1, d' = no-1 \quad (14)$$

$$Coord_{b1,b2} - Vduto_d \geq -Vduto_{d'} \cdot (1 - CO_{b1,b2,o}) \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \mid d = o-1, d' = no-1 \quad (15)$$

$$Coord_{b1,b2} - Vduto_d \leq (Vduto_{d'} + eps) \cdot CO_{b1,b2,o} - eps \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \mid d = o-1, d' = no-1 \quad (16)$$

As restrições (17) a (20) determinam através da variável binária  $PS_{b1,b2,o}$  a possibilidade de ocorrer sangria da batelada  $b1$ , num dado órgão  $o$ , em função do bombeio da batelada  $b2$ .

$$PS_{b1,b2,o} = CO_{b1,b2,o} \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \mid b1 = b2 \quad (17)$$

$$PS_{b1,b2,o} \leq CO_{b1,b2,o} \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \mid b1 \neq b2 \quad (18)$$

$$PS_{b1,b2,o} \leq 1 - PO_{b1,b2-1,o} \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \quad (19)$$

$$PS_{b1,b2,o} \geq CO_{b1,b2,o} - PO_{b1,b2-1,o} \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \quad (20)$$

As restrições (21) a (24) determinam através da variável binária  $S_{b1,b2,o}$  se houve ou não sangria da batelada  $b1$ , no órgão  $o$ , em função do bombeio da batelada  $b2$ .

$$VolS_{b1,b2,o} \geq (-VolBat_{b1} - eps) \cdot (1 - S_{b1,b2,o}) + eps \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \quad (21)$$

$$VolS_{b1,b2,o} \leq VolBat_{b1} \cdot S_{b1,b2,o} \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \quad (22)$$

$$Coord_{b1,b2} \geq Vduto_d \cdot S_{b1,b2,o} \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \mid d = o-1 \quad (23)$$

$$S_{b1,b2,o} \leq PS_{b1,b2,o} \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \quad (24)$$

As restrições (25) a (29) calculam o volume da batelada  $b1$  que ainda não passou pelo órgão  $o$  após a ocorrência do bombeio da batelada  $b2$  (variável  $VolNP_{b1,b2,o}$ ). Em particular, a restrição (25) utiliza o parâmetro  $VolNPEduto_{b1,o}$  relacionado ao volume das bateladas de estoque duto que ainda não passaram através do órgão  $o$ .

$$VolNP_{b1,b2,o} = VolNPEduto_{b1,o} \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \mid b2 = nbd \quad (25)$$

$$VolNP_{b1,b2,o} = Vduto_d - \sum_{\substack{(b1',b2) \in B, \\ o \in O \mid b1' \neq b1}} VolNP_{b1',b2,o} \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \mid b2 \neq nbd, d = o-1 \quad (26)$$

$$VolNP_{b1,b2,o} \leq VolBat_{b1} (1 - PO_{b1,b2,o}) \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \mid b2 > nbd \quad (27)$$

$$VolNP_{b1,b2,o} \geq Volume_{b1,b2} - VolBat_{b1} \cdot CO_{b1,b2,o} \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \mid b2 > nbd \quad (28)$$

$$VolNP_{b1,b2,o} \leq Volume_{b1,b2} \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O \mid b2 > nbd \quad (29)$$

As restrições (30) e (31) determinam o total de volume da batelada  $b1$  que passou pelo órgão  $o$  em função do bombeio da batelada  $b2$  (variável  $VolPT_{b1,b2,o}$ ).

$$VolPT_{b1,b2,o} = Volume_{b1,b2} - VolNP_{b1,b2,o} + \sum_{\substack{(b1,b2) \in B, \\ o \in O | o' \geq o}} VolS_{b1,b2,o'} \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O | b1 = b2 \quad (30)$$

$$VolPT_{b1,b2,o} = \sum_{\substack{(b1,b2) \in B, \\ o \in O}} VolNP_{b1,b2-1,o} - VolNP_{b1,b2,o} - \sum_{\substack{(b1,b2) \in B, \\ o \in O | o' < o}} VolS_{b1,b2,o'} \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O | b1 \neq b2 \quad (31)$$

As restrições (32) e (33) limitam as faixas mínimas e máximas dos volumes de sangria em função dos parâmetros de entrada  $RazMinS_o$  e  $RazMaxS_o$ , que representam uma parcela do volume total da batelada  $b1$  que passou pelo órgão  $o$ .

$$VolS_{b1,b2,o} \geq RazMinS_o \cdot VolPT_{b1,b2,o} - VolBat_{b1}(1 - S_{b1,b2,o}) \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O | b2 > nbd, o < no \quad (32)$$

$$VolS_{b1,b2,o} \leq RazMaxS_o \cdot VolPT_{b1,b2,o} \quad \forall (b1,b2) \in B, o \in O | b2 > nbd, o < no \quad (33)$$

A restrição (34) impõe um controle de vazão no trecho de duto  $d4$ , evitando situações de chaveamento da rede nos órgãos N2, N3 e N4, principal avanço em relação ao trabalho de Cafaro e Cerdá (2008). Para tanto, é especificada uma vazão média de sangria do órgão N5, dada pelo parâmetro  $VzMedia_{no-1}$ , sendo que  $VzBomb_{b2}$  é a vazão de bombeio da batelada  $b2$  na refinaria N1 em função da demanda e do tempo total de programação (dados de entrada conhecidos *a priori*).

$$Coord_{b1,b2} \geq Coord_{b1,b2-1} + (VzMedia_{no-1} / VzBomb_{b2}) \cdot VolBat_{b2} - \sum_{\substack{(b1',b2') \in B, \\ o \in O | o \geq no-1, b1' \geq b1}} VolS_{b1',b2',o} \quad (34)$$

$$\forall (b1,b2) \in B, o \in O | b2 > nbd$$

Finalmente, as restrições (35) a (37) relacionam as variáveis de violação aos limites de tancagem e estoque meta agregados, devendo ser minimizadas na função objetivo (equação 1).

$$VolOrg_{o,p,b2} + FO_{o,p,b2} \geq 0 \quad \forall o \in O, p \in P, b2 \in B \quad (35)$$

$$VolOrg_{o,p,b2} - EO_{o,p,b2} \leq CAP_{o,p} \quad \forall o \in O, p \in P, b2 \in B \quad (36)$$

$$VolOrg_{o,p,b2} \geq EM_o \cdot CAP_{o,p} - FT_{o,p,b2} \geq 0 \quad \forall o \in O, p \in P, b2 \in B \quad (37)$$

A seguir são apresentados os principais resultados obtidos para um estudo de caso baseado em dados reais de programação.

## 4. Resultados

A Figura 3 apresenta o resultado da programação obtida na forma de um perfil volumétrico do poliduto, para um horizonte de 30 dias (720 h). A coordenada volumétrica do órgão N1 está referenciada em 0 m<sup>3</sup>, do órgão N2 é de 39,76 m<sup>3</sup> e assim por diante até o final da rede no órgão N6, cuja coordenada equivale a 164,37 m<sup>3</sup>. Na abertura do cenário, os trechos de duto estão preenchidos com as bateladas  $b1$  a  $b6$  ( $nbd=6$ ), posicionadas na rede em função de suas coordenadas iniciais. Uma única batelada pode ocupar mais de um trecho de duto, como é o caso da batelada  $b5$ , com volume que abrange os dutos  $d1$  (entre N1 e N2),  $d2$  (entre N2 e N3) e  $d3$  (entre N3 e N4). Após o bombeio de cada uma das bateladas programadas ( $b7$  a  $b14$ ), os volumes existentes são propagados pelos trechos de duto e podem sofrer sangrias ao longo dos terminais N1 a N6. Por exemplo, durante o período de bombeio da batelada  $b7$  (de 0 a 152,25 h) ocorrem as seguintes operações: sangria das bateladas  $b7$  e  $b5$  no órgão N2, sangria das bateladas  $b7$  e  $b6$  no órgão N3, sangria das bateladas  $b5$  e  $b4$  no órgão N4, sangria das bateladas  $b3$  e  $b1$  no órgão N5 e recebimento das bateladas  $b2$  e  $b1$  no último órgão N6. Vale ressaltar que os bombeios das bateladas  $b7$  a  $b14$  ocorrem de forma contínua. Após o término de bombeio da batelada  $b7$  (produto  $p1$ ), são bombeadas as bateladas  $b8$  (produto  $p2$ ),  $b9$  (produto  $p3$ ) e assim por diante, até o final do horizonte de programação em 720 h.

Conforme discutido na seção 2, uma única batelada pode sofrer diversas sangrias durante a operação de transporte, reduzindo seu volume inicial à medida que os órgãos consumidores são percorridos. Isso pode ser observado com a batelada *b7* que sofre sangria nos terminais N2, N3, N4 e N5. Após o bombeio da batelada *b11*, o volume da batelada *b7* é de aproximadamente 1/4 do seu volume inicial, sendo que a batelada sai totalmente da rede após o bombeio da batelada *b12*. Por atuação da restrição (34), nenhuma situação de chaveamento da rede é observada nos órgãos N2, N3 e N4. O chaveamento da rede ocorre quando uma batelada é recebida num órgão consumidor sem propagar qualquer volume adiante, parando os trechos de duto posteriores. Esta situação é indesejável do ponto de vista operacional devido à inércia provocada pela parada de grandes extensões de dutos. Um exemplo de chaveamento da rede no órgão N5 é observado após o bombeio da batelada *b14*, permanecendo o duto *d5* parado (notar que as coordenadas das bateladas *b8* e *b10* ficam inalteradas). Com capacidade de aproximadamente 13740 m<sup>3</sup>, o trecho de duto *d5* é o único que pode sofrer parada de movimentação.

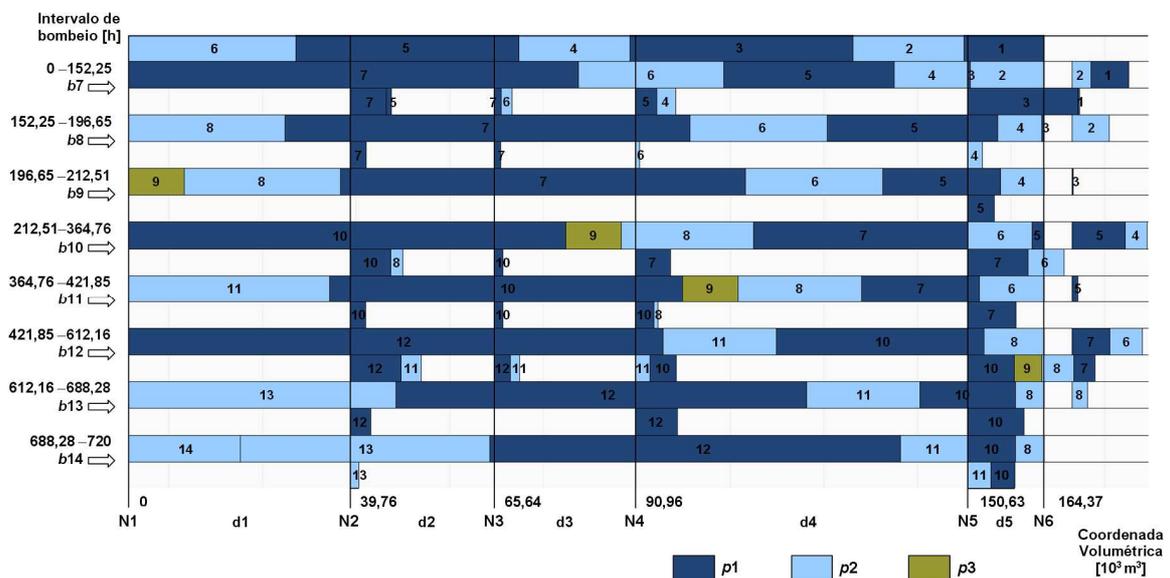


Figura 3 – Perfil volumétrico do poliduto

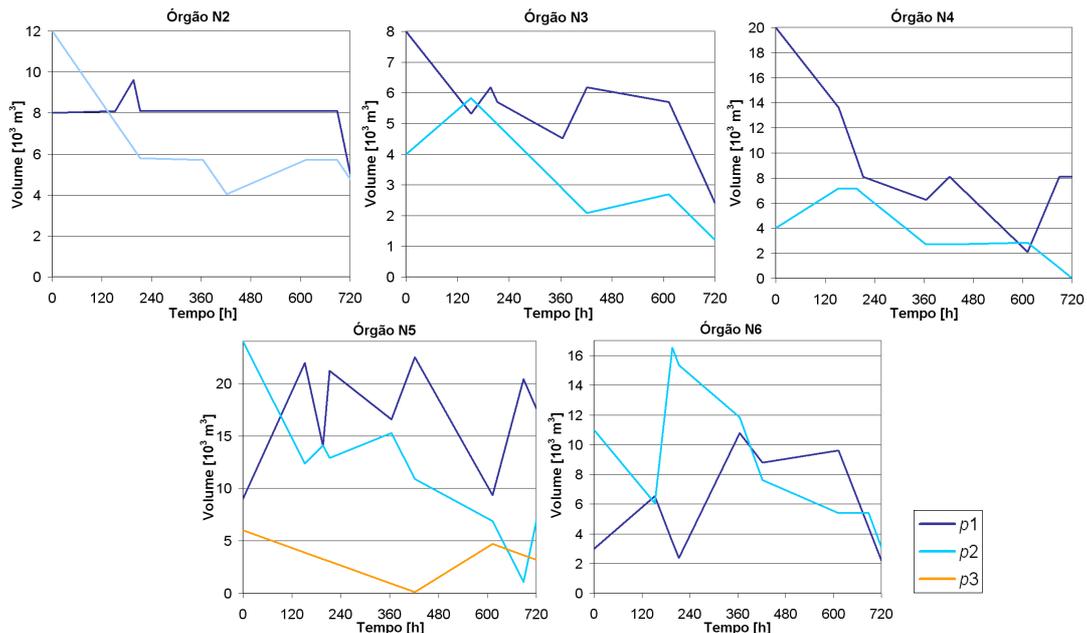


Figura 4 – Nível de estoque dos terminais consumidores

Durante a ocorrência das sangrias, que representa o recebimento dos produtos demandados, os estoques dos órgãos ( $VolOrg_{o,p,b2}$ ) são atualizados através do balanço de massa especificado pela restrição (8). A Figura 4 apresenta os níveis de estoque dos terminais consumidores ao longo do tempo, considerando uma taxa de consumo linear para os três produtos da programação. É assumido que a refinaria N1 possui níveis de produção suficientes para atender a demanda solicitada ao longo do horizonte de programação.

O modelo de programação PLIM foi implementado e o cenário de teste foi resolvido no *solver* comercial IBM ILOG OPL (IBM ILOG OPL, 2009), utilizando o algoritmo IBM ILOG CPLEX 12.1.0, numa plataforma composta por um Processador Intel Core2Quad (2,83GHz) com 3,25GB de memória RAM, Windows XP. O cenário resolvido gerou em torno de 4800 restrições, 1100 variáveis contínuas, 1300 variáveis binárias, consumindo um tempo de processamento de alguns segundos (em torno de 5s) para um horizonte de programação de 30 dias.

## 5. Considerações Finais

A formulação do modelo de programação PLIM foi desenvolvida ao longo de aproximadamente 6 meses, durante o curso de graduação do primeiro autor, fazendo parte do protótipo de uma ferramenta de auxílio a tomada de decisão. Com base no descritivo logístico da rede e nos conhecimentos heurísticos dos especialistas da Petrobras, inicialmente foram adaptados conceitos encontrados no trabalho de Cafaro e Cerdá (2008), evoluindo posteriormente para um modelo matemático que melhor representa a operação real do poliduto em estudo. O objetivo do trabalho foi desenvolver um novo modelo PLIM que pudesse contemplar a prática operacional descrita pelos programadores. O principal avanço obtido com a modelagem refere-se ao cumprimento das restrições de bombeio contínuo de produtos, além de evitar o chaveamento da rede em determinados órgãos e a consequente parada de trechos de duto. Além disso, a maior parte das restrições propostas por Cafaro e Cerdá (2008) foram reestruturadas e diversas outras foram criadas de forma mais intuitiva, visando controlar a dinâmica de sangria e as faixas de vazão de transporte ao longo da rede. Em trabalhos futuros, pretende-se considerar a geração dos volumes das bateladas da programação no próprio modelo matemático, etapa hoje efetuada através da heurística construtiva que reproduz a prática dos programadores.

## Agradecimento

Este trabalho recebeu o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo (ANP) e do CTPetro/Financiadora de Estudos e Projetos através do programa de recursos humanos para o setor de petróleo e gás natural - UTFPR/PRH10, CENPES/PETROBRAS (0050.0044324.08.4).

## Referências

- Boschetto S.N., Brondani W.M, Magatão L., Felizari L.C., Stebel S.L., Neves-Jr F., Arruda L.V.R., Ribas P.C. e Bernardo L.F.J.** Transporte Otimizado de Produtos em Redes de Dutos, *Petro & Química*, Vol. 318, pp. 32-36, 2009.
- Cafaro D.C. and Cerdá J.** Optimal Dynamic scheduling of multiproduct pipelines with multiple delivery due dates, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 32(4-5), pp. 728-753, 2008.
- IBM ILOG OPL.** Language User's Manual. IBM Corporation, 2009.
- Magatão L., Arruda L.V.R. and Neves-Jr F.** A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 28 pp. 171-185, 2004.
- Relvas S., Matos H.A., Barbosa-Póvoa A.P.F.D., Fialho J.** Oil products pipeline scheduling with tank farm inventory management, *Proceedings of 18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, Vol. 25 pp. 277-282, 2008.