

MODELO PLIM PARA ALOCAÇÃO DE PRODUTOS EM TANQUES DE UMA MALHA DUTOVIÁRIA POR ONDE TRAFEGAM DERIVADOS PESADOS DE PETRÓLEO

Lucas Bueno, Helton Luis Polli, Daniel Rossato de Oliveira, João Paulo Dupinska de Oliveira, Flávio Neves Junior, Lúcia Valéria Ramos de Arruda
UTFPR / CPGEI

Av. Sete de Setembro, 3165, 80230-901, Curitiba, PR

lucasbuenolb@gmail.com, helton.polli@gmail.com, rossato.daniel@gmail.com,
joaooliveira.mlp@gmail.com, neves@utfpr.edu.br, lvrarruda@utfpr.edu.br

RESUMO

Este artigo descreve um modelo em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para alocação de derivados pesados (ou escuros) de petróleo em tanques de uma malha dutoviária da Petrobras, em São Paulo. O modelo proposto é utilizado como parte de uma estratégia de decomposição para resolução do *scheduling* completo da rede em estudo e, portanto, atua em conjunto com outros mecanismos para prover auxílio às atividades de programação desta malha dutoviária. A troca de produtos nos tanques ao longo do horizonte de programação considerado é necessária, pois nessa malha dutoviária não existem tanques suficientes para armazenar todos os produtos em todo o horizonte de tempo. Com o modelo em PLIM proposto foi possível obter resultados satisfatórios para a alocação dos produtos em tanques, respeitam-se as restrições práticas do problema, em um tempo computacional aceitável para uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão operacional.

PALAVRAS CHAVE. Programação Linear Inteira Mista. Pesquisa Operacional. Alocação.

Área principal. P&G (PO na Área de Petróleo e Gás), L&T (Logística e Transportes), PM Programação Matemática.

ABSTRACT

This article describes a model in Mixed Integer Linear Programming (MILP) for the allocation of heavy (or dark) oil derivatives on tanks from a pipeline network of Petrobras, in São Paulo. The proposed model is used as part of a strategy of decomposition for solving the complete network scheduling being studied and therefore operates in conjunction with other mechanisms to provide assistance to the programming of this pipeline network activity. The exchange of products in tanks throughout the programming horizon is considered necessary because in this pipeline network aren't enough tanks to store all products throughout the time horizon. With the proposed MILP model was possible to obtain satisfactory results for the allocation of products in tanks problem. These results respect the operational constraints of the problem and were obtained in an acceptable computational time.

KEYWORDS. Mixed Integer Linear Programming. Operational Research. Allocation.

Main area. P&G (OR in Oil & Gas), L&T (Logistics and Transportation), PM (Mathematical Programming).

1. Introdução

Derivados de petróleo são normalmente transportados através de oleodutos (Fabro *et al.*, 2013). Ainda, a programação das bateladas que trafegam nestes oleodutos atualmente é realizada por especialistas com o auxílio de ferramentas que validam as operações por eles realizadas, porém, o crescente uso deste modal motiva o desenvolvimento de ferramentas que também auxiliem durante os processos de tomadas de decisões (Polli *et al.*, 2013).

Este trabalho descreve um único módulo de uma ferramenta para auxílio da programação dos movimentos de uma malha dutoviária da Petrobras, localizada em São Paulo, por onde trafegam derivados pesados (ou escuros) do petróleo. A resolução do *scheduling* desta malha é uma atividade complexa, conforme destacado por Fabro *et al.* (2013), e uma estratégia de decomposição do problema foi adotada, conforme ilustra a Figura 1 a seguir apresentada. Outros módulos desta ferramenta já foram tratados em outros trabalhos, como em Rossato *et al.* (2013) e em Valério *et al.* (2012). Na Figura 1 destaca-se o módulo de alocação de produtos em tanques, foco do presente trabalho.

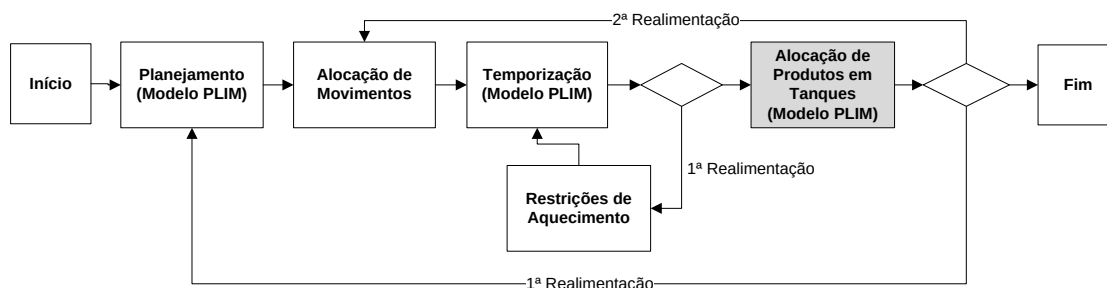


Figura 1 – Abordagem de Decomposição do Problema

Nesta malha dutoviária não existem tanques suficientes para armazenamento de todos os produtos durante todo o horizonte de programação em análise, tornando necessária a realização de trocas dos produtos que são armazenados nestes tanques no decorrer do horizonte, sendo a solução desenvolvida para este problema discutida neste trabalho.

A abordagem utilizada foi o desenvolvimento de um modelo em Programação Linear Inteira Mista, uma forma de programação matemática onde a função objetivo é maximizada ou minimizada através de mudanças em variáveis de decisão (Williams, 1999).

Com relação ao problema geral, de alocação de movimentos em malhas dutoviárias, outras abordagens já foram propostas na literatura, tais como em Rejowski e Pinto, 2008; Cafaro e Cerdá 2008; Lopes *et al.*, 2010; Magatão *et al.*, 2012. Estes trabalhos indicam que os problemas de alocação de movimentos em malhas dutoviárias são de difícil resolução (Ribas, 2012), o que justifica a estratégia de decomposição aqui adotada com o objetivo de reduzir a complexidade do problema.

Tendo em vista a rede dutoviária a qual este trabalho se destina, outras abordagens também já foram propostas: Alves (2007) utiliza duas versões de um algoritmo genético e faz algumas simplificações, como a relaxação das restrições de aquecimento e, com um pós-processamento, consegue soluções viáveis para cinco instâncias experimentadas. Moura *et al.* (2008) divide o problema em duas fases: A primeira de alocação das ordens dos movimentos, utilizando heurísticas e a segunda, de alocação temporal dos movimentos, utilizando *Constraint Programming*.

O problema específico de alocação de produtos em tanques foi abordado por Valério *et al.* (2012) através de um algoritmo que analisa as necessidades de trocas sequencialmente e sugere trocas da mesma maneira. Esta abordagem, apesar de ser modelada de maneira parecida com a aqui proposta, e encontrar soluções para o problema de troca de produtos nos tanques, não garante que as soluções encontradas sejam ótimas.

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção 2 é feita uma descrição

do cenário e do problema ao qual o modelo se destina, na Seção 3 é feita uma descrição do modelo, na Seção 4 são descritos os resultados obtidos, os experimentos realizados e é feita uma discussão dos mesmos, finalmente, na Seção 5, são feitas conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Descrição do cenário e do problema

O modelo aqui descrito faz parte de uma solução maior para o problema de programação das bateladas de derivados do petróleo que trafegam em uma malha dutoviária da Petrobras localizada em São Paulo.

Esta malha é composta por quatro refinarias, um terminal marítimo e três nós intermediários, totalizando oito nós. Sete oleodutos conectam esta malha e a Figura 2 é uma representação da mesma.

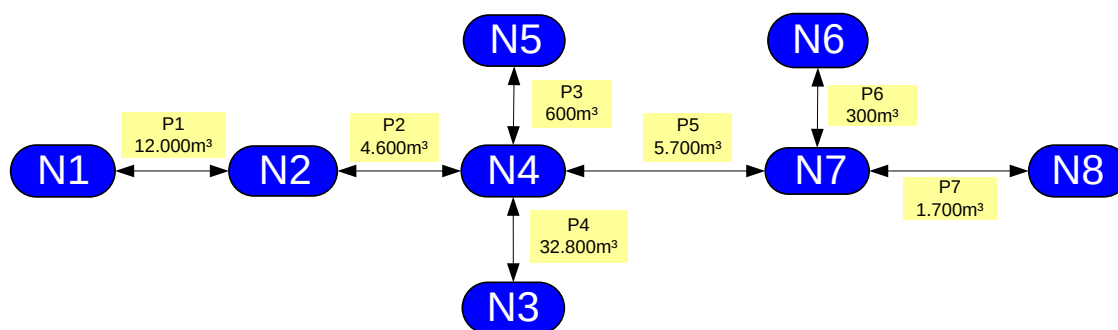


Figura 2 - Malha dutoviária
 Fonte: Rossato *et al.* (2013)

Nesta malha trafegam derivados pesados (ou escuros) do petróleo. Estes produtos são produzidos nas refinarias (N1, N3, N5 e N6) e geralmente enviados para o terminal marítimo (N8), passando pelos nós intermediários (N2, N4 e N7).

Nos nós intermediários (N2, N4 e N7) não acontece apenas a passagem de produtos, neles também ocorre uma operação aqui chamada de “pulmão”, onde um produto fica temporariamente em um tanque para ser enviado a outro nó em algum momento futuro. Operações de pulmão são exemplificadas em, por exemplo, Boschetto *et al.* (2010).

Dependendo das características do produto que estava previamente alocado em um tanque, a alocação de outro pode levar a dificuldades operacionais, tornando esta troca inviável, logo, não se podem realizar quaisquer trocas de produtos nos tanques. Além disso, realizar a troca do produto de um tanque é um processo custoso operacionalmente, portanto, opta-se por minimizar a quantidade de trocas de produtos nos tanques.

3. Descrição do modelo

Nesta seção apresenta-se o modelo em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para troca de produtos nos tanques da malha dutoviária para transporte de derivados escuros de petróleo descrita na seção 2.

O modelo PLIM recebe os seguintes dados de entrada:

- Tanques disponíveis em um nó;
- Produtos alocados inicialmente nos tanques;
- Pontos em m^3 que formam uma curva representativa do estoque de cada produto alocado nos tanques (perfil de estoque);
- Produtos possíveis de serem alocados em cada tanque.

Como não é possível realizar trocas de tanques entre nós diferentes, optou-se por executar o modelo separadamente para cada nó. Desta forma, oito diferentes instâncias do

modelo são executadas, uma para cada nó. Assim, diminuiu-se a quantidade de dados de entrada de cada instância em relação ao cenário envolvendo os oito nós de forma simultânea e, consequentemente, o número de variáveis de decisão de cada execução do modelo.

Através dos dados de entrada, o modelo PLIM calcula a capacidade de armazenamento total disponível para cada produto (somatório da capacidade dos tanques nos quais este produto está alocado) e, comparando esta capacidade com a curva de estoque, identifica os pontos onde a curva de estoque do produto, em tese, “estoura” a capacidade.

A Figura 3 representa um caso onde ocorre um “estouro” da capacidade. Nela o eixo horizontal representa o tempo, em horas, e o eixo vertical o volume, em m^3 . A linha contínua representa o perfil de estoque e a linha pontilhada a capacidade agregada de um determinado produto em um determinado nó.

O modelo analisa as curvas em busca de estouros dia a dia, ou seja, se um cenário possuir 30 dias de horizonte de programação, a resolução das curvas será de 30 pontos. Esta resolução de curva, com um ponto por dia, é justificável já que este é um período suficiente para a correção de estouros através de trocas de produtos nos tanques.

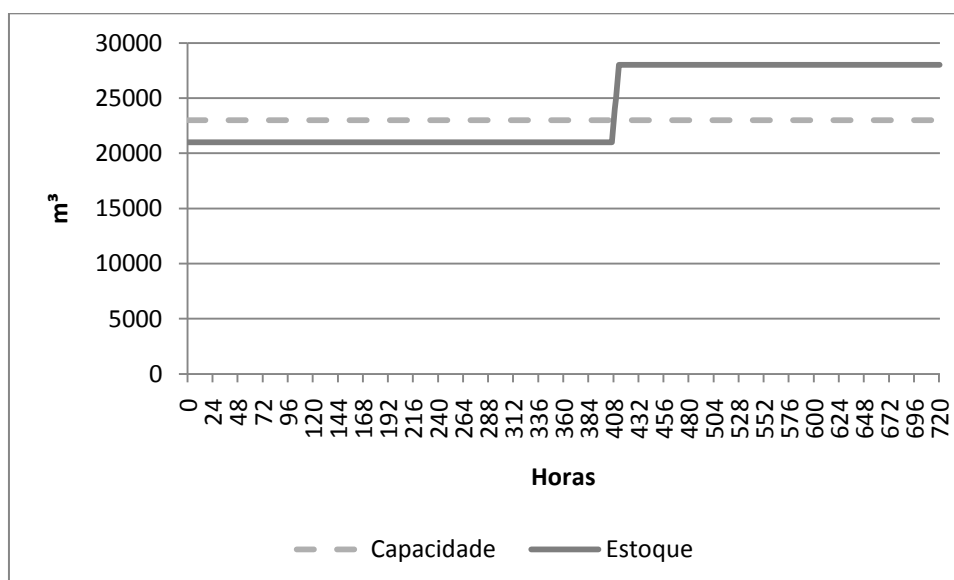


Figura 3 – “Estouro” de capacidade

Sendo assim, através de trocas de produtos nos tanques o modelo minimiza a quantidade de estouros que acontecem em um cenário de acordo com as restrições operacionais deste problema (mais detalhes em 3.1 e 3.2), mas, por nem sempre ser possível que todos os estouros sejam eliminados, o modelo não os restringe, sendo que em uma situação real, operações que fogem o escopo deste trabalho seriam realizadas para a solução destes estouros.

A nomenclatura utilizada para a formulação do modelo matemático em PLIM é detalhada na: Tabela 1, onde são descritos os conjuntos e elementos (índices); na Tabela 2, onde apresentam-se os parâmetros do modelo; e na Tabela 3, a qual detalha as variáveis utilizadas no modelo matemático. Nas tabelas, os conjuntos, elementos e parâmetros iniciam com maiúsculas, e as variáveis com minúsculas.

Tabela 1 – Conjuntos e Elementos

Conjunto/Elemento	Descrição
$p \in \text{Produtos}$	p é um produto do conjunto <i>Produtos</i>
$t \in \text{Tanques}$	t é um tanque do conjunto <i>Tanques</i>
$d \in \text{Dias}$	d é um dia do conjunto <i>Dias</i>
$\{p,d\} \in \text{ProdutoDia}$	p é um produto do conjunto <i>Produtos</i> e d é um dia do conjunto <i>Dias</i> . <i>ProdutoDia</i> relaciona os produtos com os

	dias nos quais podem ser alocados.
$\{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia}$	t é um tanque do conjunto <i>Tanques</i> , p é um produto do conjunto <i>Produtos</i> e d é um dia do conjunto <i>Dias</i> . <i>TanqueProdutoDia</i> relaciona os produtos com os tanques e com os dias nos quais podem ser alocados.
$\{t,p\} \in \text{TanqueProdutosAdmissiveis}$	t é um tanque do conjunto <i>Tanques</i> e p é um produto do conjunto <i>Produtos</i> . <i>TanqueProdutosAdmissiveis</i> relaciona os produtos com os tanques nos quais podem ser alocados.

Tabela 2 – Parâmetros

Parâmetro	Descrição
TanqCap_t	Capacidade de um tanque t em unidades de volume [u.v]
$\text{ProdutoInicialTanque}_{t,pe}$	Produto pe alocado inicialmente no tanque t
$\text{PonderacaoViolacao}$	Ponderação da violação da capacidade para ser usada na função objetivo
$\text{PonderacaoNumeroTrocas}$	Ponderação do número de trocas de produtos nos tanques
$\text{PonderacaoRelaxNumTrocas}$	Ponderação da relaxação do número de trocas de produtos nos tanques
$\text{PonderacaoRelaxPeriodoTanqProd}$	Ponderação da relaxação do período mínimo que um produto fica alocado em um tanque
Num_Dias	Número de dias do horizonte de programação do cenário
Periodo_Minimo	Número mínimo de dias que um produto deve ficar alocado em um tanque
Max_Quant_Trocas	Número máximo de trocas de produtos em um tanque
U	Limite superior utilizado em formulações <i>Big-M</i> (e.g., $U = 10^2$)
L	Limite inferior utilizado em formulações <i>Big-M</i> (e.g., $L = -10^2$)
e	Constante de pequeno valor utilizada para evitar igualdades em formulações <i>Big-M</i> (e.g., $0 < e < 0.01$)

Tabela 3 – Variáveis

Variável	Descrição
$\text{capacAgregada}_{p,d}$	Capacidade agregada (somatório dos tanques) de um produto p em um dia d em unidades de volume [u.v]
$\text{relaxViolacaoCapacAgregada}_{p,d}$	Volume de um estouro da capacidade do produto p no dia d em unidades de volume [u.v]
numeroTrocas_t	Número de trocas de produtos realizadas em um tanque t
relaxNumTrocas_t	Relaxação do número de trocas de produtos realizadas em um tanque t (para quando numeroTrocas_t ultrapassar o parâmetro Max_Quant_Trocas)
$\text{periodoTanqueProduto}_{t,p}$	Período em dias que um produto p fica alocado em um tanque t
$\text{relaxPeriodoTanqueProduto}_{t,p}$	Relaxação do número de dias em que um produto p fica alocado em um tanque t (para quando $\text{periodoTanqueProduto}_{t,p}$ for menor que o parâmetro Periodo_Minimo)
$\text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d}$	Binária que representa se um produto p está alocado em um tanque t no dia d .
$\text{binTanqueTroca}_{t,p,d}$	Binária que representa se um produto p passou a ser alocado em um tanque t no dia d
$\text{binTanqueProduto}_{t,p}$	Binária que representa se o produto p foi alocado em algum momento ao tanque t

3.1. Função objetivo

Dadas as características do problema descrito anteriormente, a função objetivo do modelo PLIM, equação (1), minimiza quatro fatores a seguir elencados:

- i. Volume dos estoques;
- ii. Número de trocas de produtos nos tanques;
- iii. Relaxação do número de trocas de produtos em cada tanque;
- iv. Relaxação do período mínimo que um produto fica em um tanque.

O volume dos estoques é minimizado (fator i), pois este é o objetivo principal do modelo: fazer com que não ocorram estoques de capacidade.

Como explicado na seção 2, a troca de um produto (fator ii) em um tanque é um processo custoso operacionalmente, por isso opta-se por minimizar o número de trocas de produtos nos tanques.

Além de minimizar o número de trocas de produtos que ocorrem em todos os tanques, também é um interesse operacional não realizar muitas trocas em um único tanque, sendo assim, no modelo optou-se por limitar que aconteça apenas uma única troca de produto em um tanque, mas com esta característica podendo ser relaxada (fator iii).

Assim como na restrição anterior, para limitar o número de trocas que acontecem em um único tanque, também optou-se por atribuir um período mínimo que um produto deve ficar em um tanque, mas com este período podendo ser relaxado (fator iv).

Desta forma, o modelo optará pela solução que tenha o menor volume de estoque de capacidade, mas que ao mesmo tempo minimize o número de trocas de produtos nos tanques e que distribua as trocas necessárias entre os tanques disponíveis.

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar } z = & \underbrace{\sum_{\{p,d\} \in \text{ProdutoDia}} \left(\frac{\text{relaxViolacaoCapacAgregada}_{p,d}^*}{\text{PonderacaoViolacao}} \right)}_{\text{fator i}} + \\
 & \underbrace{\sum_{t \in \text{Tanques}} (\text{numeroTrocas}_t * \text{PonderacaoNumeroTrocas})}_{\text{fator ii}} + \\
 & \underbrace{\sum_{t \in \text{Tanques}} (\text{relaxNumTrocas}_t * \text{PonderacaoRelaxNumTrocas})}_{\text{fator iii}} + \\
 & \underbrace{\sum_{\{t,p\} \in \text{TanquesProdutosAdmissiveis}} \left(\frac{\text{relaxPeriodoTanqueProduto}_{t,p}^*}{\text{PonderacaoRelaxPeriodoTanqProd}} \right)}_{\text{fator iv}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Os valores das variáveis multiplicadas pelos fatores de ponderação não estão normalizados (são de unidades diferentes), com exceção do número de trocas totais que ocorrem nos tanques (fator ii) e da relaxação do número máximo de trocas que ocorrem em um único tanque (fator iii), onde sempre será melhor aumentar o número de trocas totais do que o número de trocas em um único tanque. Para os outros fatores, considera-se:

- É preferível trocar um tanque se a violação da capacidade agregada for maior que 10.000 unidades de volume vezes a quantidade de dias da violação (fatores i e ii);
- É preferível fazer uma nova troca em um tanque, desrespeitando em 1 dia o período mínimo que um produto deve ficar em um tanque se a violação da capacidade agregada for maior que 2.000 unidades de volume (fatores i e iv).

3.2. Restrições

Nesta subseção serão descritas as restrições que os autores consideraram mais relevantes para o entendimento do modelo desenvolvido para solução do problema descrito na seção 2.

Como um tanque só pode ter um produto alocado em cada instante de tempo, utilizou-se

uma variável binária limitada na equação (2) para estabelecer esta propriedade:

$$\sum_{\{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia}} (\text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d}) = 1 \quad \forall t \in \text{Tanques}, d \in \text{Dias} \quad (2)$$

Como sempre deve existir um produto alocado em um tanque, utilizou-se a mesma binária da restrição anterior para garantir que o seu somatório seja igual ao número de dias do horizonte de programação, conforme estabelece a equação a (3) seguir:

$$\sum_{\{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia}} (\text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d}) = \text{Num_Dias} \quad \forall t \in \text{Tanques} \quad (3)$$

A capacidade disponível para armazenamento de cada produto é o somatório das capacidades dos tanques nos quais este produto está alocado, conforme estabelece a equação (4) a seguir:

$$\sum_{\{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia}, t \in \text{Tanques}} (\text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d} * \text{TanqCap}_t) = \text{capacAgregada}_{p,d} \quad \forall \{p,d\} \in \text{ProdutoDia} \quad (4)$$

O parâmetro de volume em estoque de um produto deve ser menor ou igual à capacidade disponível para este produto (que é uma variável), mais a relaxação da violação da capacidade (relaxação de estouro), conforme inequação (5):

$$\text{Volume}_{p,d} \leq \text{capacAgregada}_{p,d} + \text{relaxViolaCapacidade}_{p,d} \quad \forall \{p,d\} \in \text{ProdutoDia} \quad (5)$$

Para representar as trocas de produto nos tanques em uma variável binária, utilizou-se uma formulação *Big-M* (Williams, 1999), descrita nas inequações (6), (7), (8) e (9), e na equação (10). A formulação descrita representa uma equivalência, onde a variável binária $\text{binTanqueTrocaProduto}_{t,p,d}$ assumirá valor 1 caso ocorra troca de produto no tanque t no dia d e 0 caso o tanque tenha permanecido alocado ao mesmo produto.

$$\begin{aligned} \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d} - \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d-1} &\geq \\ U \times \text{binTanqueTrocaProduto}_{t,p,d} & \\ \forall \{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia} / d > 0 & \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d} - \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d-1} &\geq \\ L \times \text{binTanqueTrocaProduto}_{t,p,d} & \\ \forall \{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia} / d > 0 & \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d} - \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d-1} &\geq \\ (U + e) \times (1 - \text{binTanqueTrocaProduto1}_{t,p,d}) - e & \\ \forall \{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia} / d > 0 & \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d} - \text{binTanqueProdutoDia}_{t,p,d-1} &\geq \\ (L - e) \times (1 - \text{binTanqueTrocaProduto2}_{t,p,d}) + e & \\ \forall \{t,p,d\} \in \text{TanqueProdutoDia} / d > 0 & \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} binTanqueTrocaProduto_{t,p,d} = \\ binTanqueTrocaProduto1_{t,p,d} + binTanqueTrocaProduto2_{t,p,d} \\ \forall \{t,p,d\} \in TanqueProdutoDia / d > 0 \end{aligned} \quad (10)$$

O número de trocas de produtos em um tanque é o somatório da ocorrência de trocas na variável binária, definida na formulação anterior, conforme estabelece a equação (11) a seguir:

$$\sum_{\{t,p,d\} \in TanqueProdutoDia} (binTanqueTroca_{t,p,d}) = numeroTrocas_t \quad \forall t \in Tanques \quad (11)$$

A inequação (12) a seguir limita o número de trocas em um tanque, mas este limite pode ser relaxado:

$$\begin{aligned} numeroTrocas_t \leq Max_Quant_Trocas + relaxNumTrocas_t \\ \forall t \in Tanques \end{aligned} \quad (12)$$

Para representar por meio de uma variável binária (*binTanqueProduto*) se em qualquer dia um produto estava alocado em um tanque, utilizou-se as formulações *Big-M* (13) e (14) a seguir elencadas:

$$\begin{aligned} \sum_{\{t,p,d\} \in TanqueProdutoDia} (binTanqueProdutoDia_{t,p,d} - 1) \geq L \times (1 - binTanqueProduto_{t,p}) \\ \forall \{t,p\} \in TanqueProdutosAdmissíveis \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \sum_{\{t,p,d\} \in TanqueProdutoDia} (binTanqueProdutoDia_{t,p,d} - 1) \leq (U + e) \times binTanqueProduto_{t,p} - e \\ \forall \{t,p\} \in TanqueProdutosAdmissíveis \end{aligned} \quad (14)$$

Por meio da equação (15), fica estabelecido que o período no qual um produto ficou alocado em um tanque é o somatório da ocorrência de dias em que este produto estava alocado neste tanque.

$$\begin{aligned} \sum_{\{t,p,d\} \in TanqueProdutoDia} (binTanqueProdutoDia_{t,p,d}) = periodoTanqueProduto_{t,p} \\ \forall \{t,p\} \in TanquesProdutosAdmissíveis \end{aligned} \quad (15)$$

A inequação (16) define um período mínimo que um produto deve ficar alocado em um tanque, mas este período pode ser relaxado.

$$\begin{aligned} periodoTanqueProduto_{t,p} + \\ relaxPeriodoTanqueProduto_{t,p} \geq Periodo_Minimo \times binTanqueProduto_{t,p} \\ \forall \{t,p\} \in TanqueProdutosAdmissíveis, \\ \forall \{t,pe\} \in ProdutoInicialTanque / p \neq pe \end{aligned} \quad (16)$$

4. Resultados, experimentos e discussão

O modelo PLIM foi implementado e todos os experimentos executados no *software* IBM ILOG CPLEX Optimization Studio v12.5 em um computador com um processador Intel Core i7-870 (2.93GHz), com 4GB de RAM. Em todos os experimentos realizados, o modelo foi executado até a otimalidade (*gap* de integralidade de 0%).

4.1. Experimentos de desempenho computacional

Para realização dos experimentos iniciais foram utilizados três cenários baseados em dados reais, que representam perfis diversos de operação da malha: o cenário 1 possui 31 dias, 78 tanques e 15 produtos; o cenário 2 possui 31 dias, 79 tanques e 15 produtos; o cenário 3 possui 30 dias, 72 tanques e 15 produtos.

Além das características citadas no último parágrafo, os cenários apresentam variações nas curvas de produção e demanda dos produtos, gerando situações diversas para o modelo de alocação de produtos em tanques. Cada cenário foi executado cinco vezes e os tempos computacionais do modelo registrados para cada nó.

As tabelas 4, 5 e 6 trazem os tempos computacionais, em milissegundos, de cada execução do modelo para cada nó, a média dos tempos das cinco execuções para cada nó e o total da média dos tempos de execução de todos os nós.

A média de execução do Cenário 1 foi de 492ms, para o Cenário 2 foi de 2177ms e para o Cenário 3 de 3635ms. Todos os tempos são considerados aceitáveis para o ambiente de uso no qual o modelo está inserido.

No Cenário 1 o nó que levou mais tempo (na média) para ser resolvido pelo modelo foi o N1 (103ms), no Cenário 2 o nó que levou mais tempo foi o N6 (995ms) e no Cenário 3 o nó que levou mais tempo foi o N4 (1844ms).

Verifica-se que os nós N2, N5, N7 e N8 são os que levam menos tempo para serem resolvidos pelo modelo. Estas variações de tempo para solução de cada nó se dão devido às diferenças entre a quantidade de tanques presentes em cada nó e o perfil de estoque de cada produto em cada nó.

Tabela 4 - Tempos para o Cenário 1

	Tempo 1 (ms)	Tempo 2 (ms)	Tempo 3 (ms)	Tempo 4 (ms)	Tempo 5 (ms)	Média (ms)
N1	106	103	102	101	103	103
N2	41	59	42	40	43	45
N3	77	96	78	76	83	82
N4	58	56	56	57	56	56,6
N5	46	47	47	45	46	46,2
N6	65	61	76	63	64	65,8
N7	50	39	48	39	39	43
N8	48	59	48	50	48	50,6
Total						492,2

Tabela 5 - Tempos para o Cenário 2

	Tempo 1 (ms)	Tempo 2 (ms)	Tempo 3 (ms)	Tempo 4 (ms)	Tempo 5 (ms)	Média (ms)
N1	349	344	335	334	334	339,2
N2	53	54	53	53	53	53,2
N3	208	207	224	208	203	210
N4	181	186	213	209	208	199,4
N5	79	84	79	80	82	80,8
N6	1066	965	1008	996	939	994,8
N7	75	76	75	77	78	76,2
N8	224	222	225	226	221	223,6
Total						2177,2

Tabela 6 - Tempos para o Cenário 3

	Tempo 1 (ms)	Tempo 2 (ms)	Tempo 3 (ms)	Tempo 4 (ms)	Tempo 5 (ms)	Média (ms)
N1	441	424	438	422	440	433
N2	98	94	96	96	98	96,4
N3	573	559	561	572	563	565,6
N4	1844	1835	1849	1835	1855	1843,6
N5	145	141	140	147	149	144,4
N6	360	289	309	266	365	317,8
N7	83	83	83	76	78	80,6
N8	158	153	152	150	157	154
Total						3635,4

4.2. Resultados obtidos

A partir da observação dos resultados iniciais obtidos com as sucessivas execuções, verificou-se que trocas da maneira esperada foram sugeridas pelo modelo. Obteve-se soluções onde: minimizava-se o volume dos estoques; minimizava-se o número de trocas de produtos nos tanques; e, também, as trocas necessárias eram distribuídas entre os tanques disponíveis.

Para ilustrar uma troca de produto em um tanque utiliza-se o exemplo ilustrado nas figuras 4 e 5, onde, na primeira, a curva de estoque do “Produto A” ultrapassa a curva de capacidade em dois pontos e onde, na segunda, o “Produto B” possui um tanque disponível que poderia ser utilizado pelo “Produto A”.

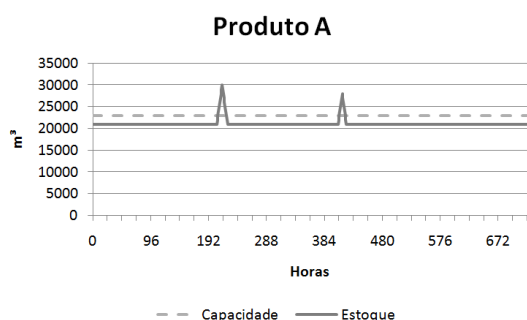


Figura 4 - Produto com estouro da capacidade

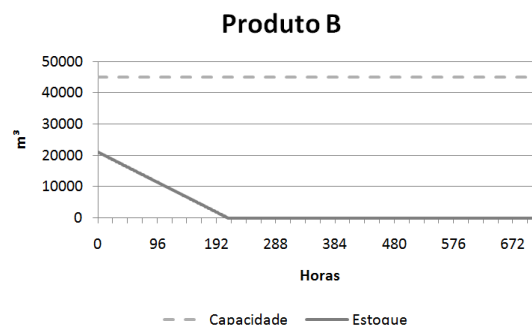


Figura 5 - Produto com tanque disponível

Como o “Produto B” (Figura 5) não precisa de um tanque em momento algum no cenário, o modelo descrito na seção 3 sugere que o “Produto A” (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) seja alocado também neste tanque, operação esta ilustrada nas figuras 6 e 7.

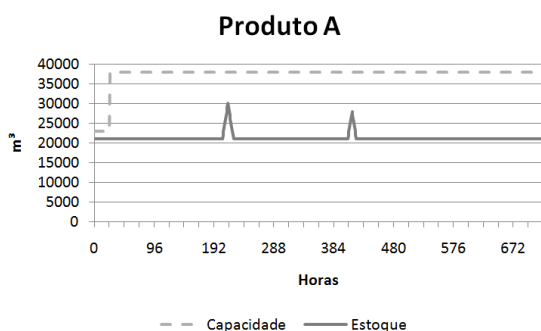


Figura 6 - Produto com estouro corrigido

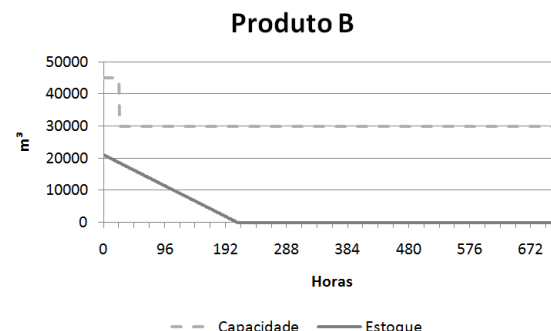


Figura 7 - Produto que "perde" um tanque

5. Conclusões e trabalhos futuros

Este artigo descreveu um modelo em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para alocação de produtos em tanques de uma malha dutoviária da Petrobras, localizada em São Paulo, por onde trafegam derivados pesados (ou escuros) do petróleo.

O modelo proposto é utilizado como parte de uma estratégia de decomposição para resolução do *scheduling* completo da rede em estudo (Figura 1) e, portanto, atua em conjunto com outros mecanismos para prover auxílio às atividades de programação desta malha dutoviária. Este modelo é necessário pois nos nós da malha dutoviária em questão não existem tanques suficientes em todos os períodos para armazenamento dos produtos que nela trafegam. Portanto, devem ocorrer trocas dos produtos armazenados nos tanques em alguns períodos de um horizonte de programação em análise.

O modelo em PLIM foi executado separadamente para cada nó da malha e nos experimentos realizados em três cenários baseados em dados reais obtiveram-se soluções satisfatórias e em um tempo computacional aceitável para o ambiente de uso do mesmo.

Como trabalhos futuros elencam-se: (i) Representação dos períodos em que os tanques estão em manutenção; (ii) Consideração do tempo da real realização de uma troca de produto em um tanque ao longo do horizonte considerado. Esta consideração implica desenvolver uma nova concepção de modelagem baseada em uma abordagem temporal contínua.

Agradecimentos

Ao apoio financeiro da ANP/FINEP (PRH-ANP/FINEP, PRH10/UTFPR), PFRH-PETROBRAS (Acordo 6000.0067933.11.4), CENPES-PETROBRAS (Termo de Cooperação 0050.0066666.11.9) e CNPq (Processos 304037/2010-9, 311877/2009-5, e 305405/2012-8).

Referências

- Alves, V. R. F. M.** Programação de Transferência de Derivados de Petróleo em Rede Dutoviária Usando Algoritmo Genético. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- Boschetto, S.N., Magatão, L., Brondani, W.M., Neves-Jr, F., Arruda, L.V.R., Barbosa-Póvoa, A.P.F.D., Relvas, S.** An Operational Scheduling Model to Product Distribution through a Pipeline Network. *Ind. & Eng. Chem. Res.*, v. 49, 5661-5682, 2010.
- Cafaro, D., Cerdá, J.** Dynamic Scheduling of Multiproduct Pipelines with Multiple Delivery Due Dates. *Computers and Chemical Engineering*, v. 32, p. 728-753, 2008.
- Fabro, J. A., Stebel S. L., Arruda, L. V., Neves-Jr., F. N., Barbósa-Póvoa, A. P.F.D, Relvas, S.** A Mixed Integer Linear Program decomposition solution to the scheduling activities in a real-world pipeline used to transporte heavy oil derivatives. 2013. *European Symposium on Computer Aided Process Engineering*. Lappeenranta: Elsevier B. V.
- Lopes, T.M.T., Ciré, Souza, C.C., Moura, A.V.** A Hybrid Model for a Multiproduct Pipeline Planning and Scheduling Problem. *Constraints*, v. 15, p. 151-189, 2010.
- Magatão, S.N.B., Magatão, L., Polli, H.L., Neves-Jr, F., Arruda, L.V.R., Relvas, S., Barbosa-Póvoa, A.P.F.D.** Planning and Sequencing Product Distribution in a Real-World Pipeline Network: An MILP Decomposition Approach. *Ind. & Eng. Chem. Res.*, v. 51, 4591-4609, 2012.
- Moura, A.V.; Souza, C.C.D.; Cire, A.A.; Lopes, T.M. T.** Heuristics and Constraint Programming Hybridizations for a Real Pipeline Planning and Scheduling Problem. *11th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering*, IEEE, p. 455-462, jul. 2008.
- Polli, H. L., Brondani, W. M., Magatão, L., Neves-Jr., F. N., Arruda, L. V.R.** Sequenciamento de bateladas em uma rede de dutos real com minimização de reversões de fluxo e janelas de tempo dinâmicas. 2013. *Anais do XLV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Natal.
- Rejowski, J.R., Pinto, J.** A Novel Continuous Time Representation for the Scheduling of

Pipeline Systems with Pumping Yield Rate Constraints. *Computers and Chemical Engineering*, v. 32, p. 1042-1066, 2008.

Ribas, P.C. Otimização do *Scheduling* de Movimentações de um Duto com uma Origem e Vários Destinos. *Tese (Doutorado em Eng. de Automação e Sistemas)* — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

Rossato, D., Polli, H. L., Bueno, L., Oliveira, J. P. D., Jr., Neves-Jr., F. N., Stebel, S. L., Ribas P. C. An Approach to Minimum Temperature of Heavy Oil Derivative in Pipeline Network Optimization Using Residence Time. 24-26 de Setembro de 2013. *Anais do Rio Pipeline 2013*.

Valério, F. A., Polli, H. L., Fabro, J. A., Stebel, S. L., Neves-Jr., F., Arruda, Arruda, L.V.R., Ribas P. C. Troca de Tanques para o *Scheduling* das Operações de Transporte de Derivados Escuros de Petróleo. 20 de Setembro de 2012. *Anais do Rio Oil & Gas 2012*.

Williams, P. H. *Model Building in Mathematical Programming* (4ª Edição ed.). 1999. São Paulo - SP: John Wiley & Sons.