

Modelo PLIM de Planejamento em uma Rede Dutoviária Real de Distribuição de Derivados Leves de Petróleo

Guilherme Schnirmann, Suelen Neves Boschetto Magatão, Lucas Bueno, Willian Hitoshi Tsunoda Meira, Flávio Neves Junior, Leandro Magatão, Lucia Valéria Ramos de Arruda
CPGEI/UTFPR - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Avenida Sete de Setembro, 3165
Curitiba-PR - CEP 80.230-910

gschnirmann@gmail.com, suelenbos@gmail.com,
lucasbuenolb@gmail.com, williammeira@gmail.com,
neves@utfpr.edu.br, magatao@utfpr.edu.br, lvrarruda@utfpr.edu.br

RESUMO

Apresenta-se neste artigo uma abordagem de solução para o módulo de Planejamento do *scheduling* operacional otimizado de uma rede real para transporte de derivados leves de petróleo. O problema tratado é complexo, portanto o modelo proposto é parte de uma estratégia de decomposição baseada na integração de diferentes módulos, compostos por modelos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) e heurísticas. Essa integração é capaz de resolver o problema proposto, considerando as características particulares da rede. De maneira sucinta, dentre os blocos (módulos) desenvolvidos, estão os de: (i) Planejamento, (ii) Alocação e Sequenciamento; e (iii) Temporização. Soluções são obtidas em tempo computacional reduzido (segundos) para cenários reais da rede em estudo. Este trabalho é uma evolução do modelo introduzido por [Magatão et al., 2012] e objetiva detalhar o modelo de Planejamento que é responsável pela determinação dos volumes totais que serão movimentados na rede e as rotas que serão utilizadas no transporte.

PALAVRAS CHAVE. Planejamento de transporte dutoviário. Programação Linear Inteira Mista. Rede de dutos.

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

ABSTRACT

A solution approach for the Planning module of the optimized scheduling of a real-world pipeline network to transport light oil derivatives is presented in this article. The related problem is complex, thus the proposed model is part of a decomposition strategy based on the integration of distinct modules composed of Mixed Integer Linear Programming (MILP) and heuristics. This integration is able to solve the aforementioned problem, considering all the particular network characteristics. Briefly, among the developed modules are the: (i) Planning, (ii) Assignment and Sequencing and (iii) Timing blocks. Solutions are obtained in a reduced computational time (seconds) for real scenarios. This work is an improvement of the model introduced by [Magatão et al., 2012] and it details the Planning Model which is responsible for determining total volumes that will be transported in the network and the routes that will be required for this transport.

KEYWORDS. Transport Scheduling. Mixed Integer Linear Programming. Pipeline Network.

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

1. Introdução

A integração de uma ferramenta para gerenciar o sistema produtivo operacional na indústria eleva significativamente a eficiência e a performance do processo. Particularmente, a redução do tempo de estocagem e a melhoria no nível do serviço podem influenciar mais do que 60% dessa performance [Ivanov, 2010]. Dessa maneira, o investimento na substituição das práticas tradicionais (manuais) por técnicas automáticas integradas à cadeia de suprimentos vem crescendo muito. O fluxo de produtos em cadeias de suprimentos é influenciado por decisões tomadas nos níveis estratégico, tático e operacional [Reklaitis, 1992]. A programação e a execução de tarefas são os problemas chaves dentro do gerenciamento das cadeias de suprimentos. Estes problemas são extremamente desafiadores devido à alta complexidade para combinar decisões discretas e comportamentos contínuos de variáveis do processo, além da necessidade de integrar operações de produção e transporte [Magatão et al., 2015]. O planejamento e o *scheduling* da produção fazem parte do processo de tomada de decisões determinando quatro informações chaves: o quê, quando, aonde e como [Reklaitis, 2000]. O objetivo desse gerenciamento é encontrar as melhores respostas para essas informações. A Figura 1 ilustra os níveis do processo de Produção Petrolífera. [Stebel et al., 2012] apresentam um modelo de planejamento que atua como uma ligação do nível tático para o operacional. A utilização de dutos para o transporte de derivados do petróleo, por exemplo, é

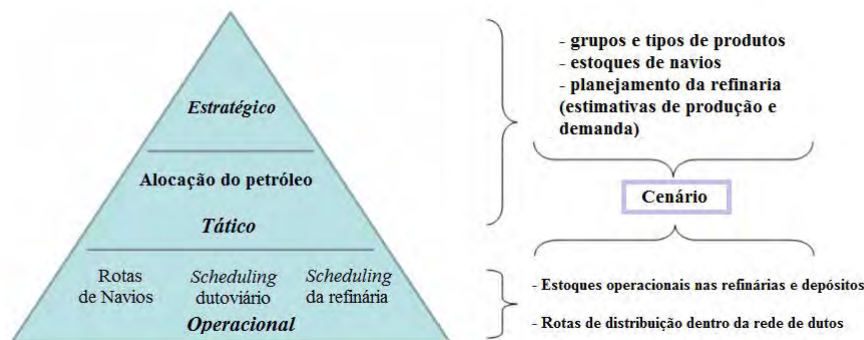


Figura 1: Estrutura dos níveis de gerenciamento da cadeia de suprimentos petrolífera. Adaptado de [Stebel et al., 2012]

o meio com menor custo comparando-se com transportes rodoviários e marítimos, apresentando maior viabilidade e eficácia quanto a esses meios, levando-se em conta, principalmente, não sofrer com mudanças climáticas. O modal dutoviário tende a ser uma ótima opção logística para distribuição da produção e atendimento das demandas de maneira eficiente, reduzindo, significativamente, os custos operacionais. Assim, o interesse da indústria petrolífera pelas áreas de planejamento e programação da produção vem crescendo muito, motivando a pesquisa e desenvolvimento de ferramentas de auxílio à tomada de decisões [Herrán et al., 2011].

Recentemente, na literatura, um número considerável de publicações sobre planejamento operacional (*scheduling*) de dutos têm sido apresentadas. Especificamente, no presente trabalho, é considerada uma rede de dutos complexa em relação à literatura correlata (n origens \times m destinos, conforme Figura 2). Assim a carga computacional envolvida é um problema relevante dentro de um cenário que exige respostas rápidas de programação. Devido a tamanha complexidade, a abordagem de decomposição ilustrada na Figura 3 é efetuada. Esta decomposição é baseada em decisões de planejamento tático além dos três elementos chaves do *scheduling* [Reklaitis, 1992]: alocação de recursos, sequenciamento de atividades e temporização do uso dos recursos pelas atividades. De modo sucinto, o modelo de planejamento determina os volumes totais que serão transferidos, já o de alocação e sequenciamento divide esses volumes em partes menores, chamadas de bateladas, e decide-se a ordem em que as bateladas devem ser bombeadas e, finalmente, na temporização decide-

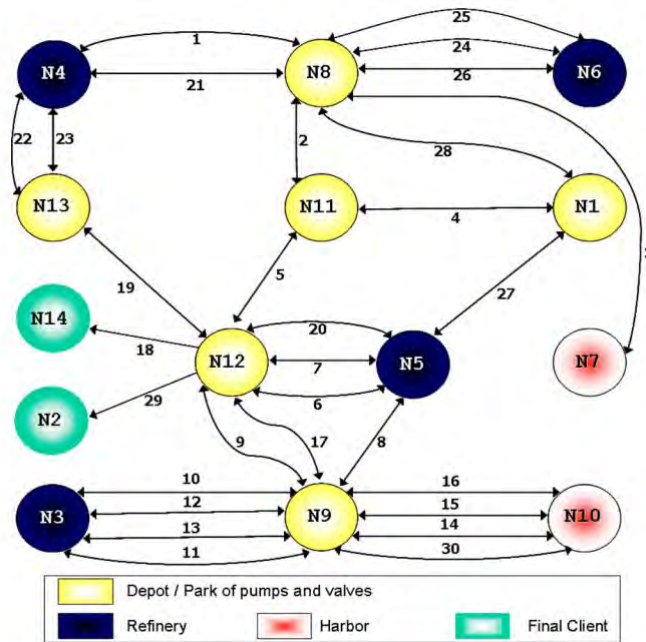


Figura 2: Ilustração da rede de dutos. Fonte: [Magatão et al., 2015]

se os tempos de início e fim de bombeio dos volumes. O presente trabalho retrata uma evolução

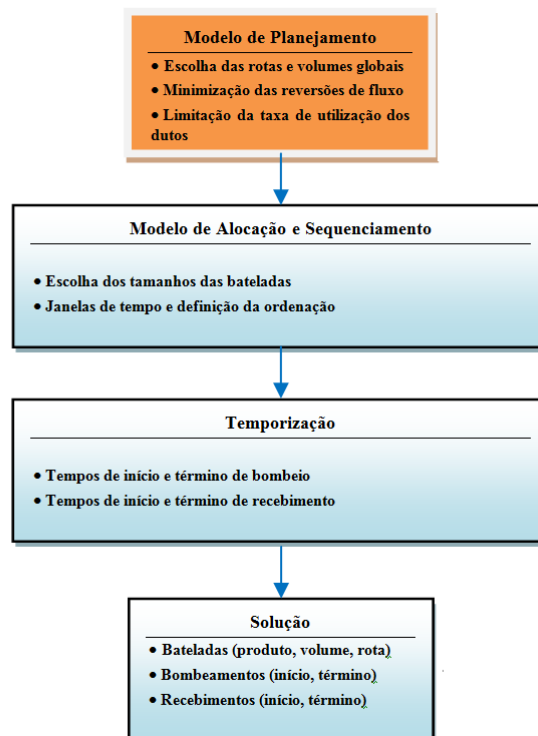


Figura 3: Ilustração das etapas principais da estratégia de decomposição proposta.

do bloco do Modelo de Planejamento, bloco destacado em laranja na Figura 3, apresentado por [Magatão et al., 2012], por meio do tratamento de novas restrições/considerações, como por exem-

plu restrições de degradação, interfaces entre produtos, tancagem intermediária, considerações de movimentações e tratamento multiperíodo, elementos que são detalhados nas seções 2 e 3. Esse bloco determina os volumes totais de cada produto que serão movimentados e as rotas por quais serão transportados. Com base no descrito acima, objetiva-se propor um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) desenvolvido para a tomada de decisões das informações do Planejamento para a rede da Figura 2, da maneira que proporcione respostas em tempos computacionais aceitáveis (na ordem de segundos) e que possam ser integradas com os demais blocos da decomposição efetuada.

O restante do artigo é organizado da seguinte maneira: a seção 2 descreve as principais características do problema de *scheduling* da rede de dutos apresentada. Subsequentemente, a seção 3 contextualiza e mostra o equacionamento da função objetivo do modelo de planejamento e as novas restrições tratadas neste artigo. Na seção 4 são apresentados e discutidos os resultados do modelo da seção 3 e, por fim, é feita a conclusão do presente trabalho.

2. Descrição do Problema

A rede da Figura 2 apresenta, de fato, um caso real de uma rede de dutos brasileira, que envolve 14 áreas (nós). Os nós representam quatro refinarias (nós N3, N4, N5 e N6), dois terminais portuários (N7 e N10), dois clientes finais (N2 e N14) e cinco terminais (N1, N8, N9, N12 e N13), que recebem ou enviam produtos. Em particular, o nó N11 não possui tanques para armazenamento de produtos, representando um entroncamento de válvulas e bombas. Os órgãos são interligados através de 30 dutos, cada um com seu volume particular e podendo ser unidirecionais ou bidirecionais. Mais de 35 derivados claros de petróleo e etanol podem trafegar nesta rede.

2.1. Características e Restrições Operacionais

Uma série de características e restrições operacionais influenciam diretamente a operação da rede de dutos em estudo. A seguir elencam-se elementos a serem observados na resolução do problema de *scheduling* dutoviário em análise.

- *Atendimento da demanda e escoamento da produção*: Cada órgão possui estimativas de produção (no caso das refinarias e terminais portuários - importação de produtos) e demandas (demais nós) a serem atendidas para cada produto em intervalos específicos.
- *Reversão em dutos*: Alguns dutos são bidirecionais, permitindo a operação de reversão em dutos. Uma batelada adicional (batelada auxiliar) é gerada para deslocar o produto presente até a extremidade para, então, revertê-lo [Magatão et al., 2015].
- *Operação pulmão/estocagem intermediária*: Operação que ocorre com armazenamento intermediário. Um produto é enviado de um nó A para um nó C passando por um nó B, sendo armazenado parcialmente e temporariamente em B, podendo-se ocorrer mudança de vazão ou não no bombeamento de B para C [Magatão et al., 2015].
- *Horossazonalidade*: Nos intervalos em que o consumo de energia (e o custo de bombeamento) é muito elevado (e.g. 17h30min até 20h30min) limita-se a taxa de utilização dos dutos, priorizando as maiores necessidades [Magatão et al., 2004]
- *Tancagem agregada*: O estoque é considerado de maneira agregada por área e produto. Portanto, em cada nó os inventários são os somatórios dos produtos nos tanques. Assim, determinam-se os limites operacionais de estocagem, como ilustrado na Figura 4.
- *Manutenção de tanques*: Um tanque que armazena um determinado produto pode entrar em manutenção total, isto é, permanecer indisponível durante todo o horizonte de *scheduling*, ocasionando diminuição na capacidade total de estocagem do produto no órgão. Alternativamente, o tanque também pode permanecer em manutenção parcial, isto é, permanecer indisponibilizado durante um intervalo de tempo dentro do horizonte de *scheduling*. Desta forma, ocorre diminuição da capacidade total de estocagem do produto durante o intervalo de manutenção do tanque no cenário.

- *Manutenção de dutos*: Os dutos podem entrar em manutenção total, isto é, quando ele não está disponível durante todo o horizonte de *scheduling*, ou parcialmente, onde há períodos em que são programadas manutenções durante parte do horizonte de *scheduling*, ocasionando paradas.
- *Degradação*: Utiliza-se um produto com especificações mais restritivas (teoricamente um produto mais nobre) como outro menos restritivo. Degrada-se o produto mais nobre em outro menos para atendimento da demanda e escoamento da produção [Polli, 2014].
- *Programação de atividades*: Atendimento dos requisitos de entrega, a busca de manter os estoques de refinarias e terminais dentro de limites operacionais e o gerenciamento da utilização dos dutos da rede são premissas que devem ser consideradas.
- *Rotas de fluxo*: Dentro da rede existem centenas de rotas previamente cadastradas. Cada rota é uma sequência de nós intercalados por dutos, determinando um caminho desde a origem até o destino do produto. Um exemplo de rota pode ser observado na Figura 1, onde a origem de transferência é a área N6 e a de destino N14, fluindo pelos dutos 26, 2,5 e 18, formando a rota: {N6-26-N8-2-N11-5-N12-18-N14}.
- *Conservação de massa*: Em cada órgão, a quantidade de produto que chega, somada à quantidade estocada e produzida no órgão deve ser igual àquela que sai do órgão, adicionada à quantidade que é consumida e estocada ao final do período analisado.
- *Utilização dos trechos de dutos*: Os trechos de duto devem operar completamente cheios e transportam diferentes produtos ao longo do horizonte de programação.
- *Interfaces de bombeio*: Nos trechos de dutos onde ocorre transporte de diferentes produtos em série, gera-se uma interface entre os produtos. Existem pares que não são recomendáveis, tipicamente pela degradação do produto mais nobre. Assim é necessário interpor-se entre eles um terceiro produto, compatível com ambos, chamado de selo [Magatão et al., 2004].

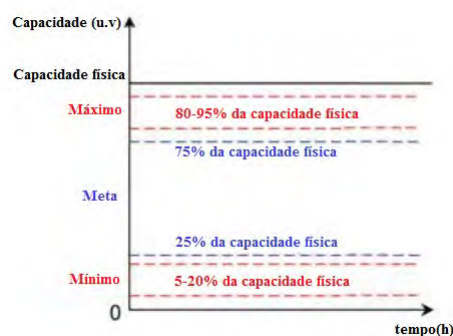


Figura 4: Limites agregados de tancagem. Fonte: [Magatão et al., 2012]

3. Modelo PLIM de Planejamento

Os dados de produção e demanda mensais para cada produto são estabelecidos pela companhia. Entretanto, as rotas a serem utilizadas e os volumes a serem movimentados entre os nós na rede são definidos pelo bloco de planejamento. Neste trabalho, diferentemente do trabalho de [Magatão et al., 2012] utiliza-se da separação do horizonte de planejamento total avaliado, tipicamente 30 dias, em períodos de tempo (intervalos de tempo) contidos no horizonte total. Definem-se estes períodos por pontos onde ocorrem alguma variação nos perfis do inventário, caracterizando chegadas de navio, manutenções ou paradas de dutos, por exemplo. Esses pontos, considerados críticos, são determinados por um algoritmo de pré-processamento que avalia essas ocorrências e informa como parâmetros os períodos ao modelo de planejamento.

3.1. Parâmetros e Conjuntos Esparsos

Após apresentadas, de forma simplificada, as considerações a serem levadas em conta pelo modelo de planejamento, os principais parâmetros que precisam ser considerados como entrada do modelo podem ser definidos como:

- Lista de rotas/dutos/áreas/produtos/períodos;
- Taxas de produção e demanda por produto, área e período;
- Inventário inicial por produto e área;
- Limites de capacidade, inventários mínimo, máximo, metas (desejáveis) por produto, área e período;
- Tempos de deslocamentos por rota;
- Horizonte de tempo;
- Porcentagem máxima de utilização dos dutos durante o horizonte;
- Fator de utilização a ser subtraído quando há reversão de sentido no duto.

Na Tabela 1 são apresentados os principais conjuntos utilizados no desenvolvimento do modelo. Alguns conjuntos são gerados de forma esparsa (e.g, *NoProd*, *NoProdPer*, *PNN*, *PNNPer*, *ParesDegradacaoPer*, *Interfaces*, *ODP*, *RRD*), isto é, apresentam somente índices viáveis à combinação de elementos presentes no conjunto. Parâmetros gerais são listados na Tabela 2 e variáveis necessárias no entendimento do modelo são explicados ao longo do texto. De modo complementar, consulta a [Magatão et al., 2012] pode ser realizada.

Tabela 1: Conjuntos

$p \in \textit{Produtos}$	p é um produto do conjunto <i>Produtos</i>
$n \in \textit{Nos}$	n é uma área do conjunto <i>Nos</i>
$d \in \textit{Dutos}$	d é um duto do conjunto <i>Dutos</i>
$per \in \textit{Periodos}$	per é um período do conjunto <i>Periodos</i>
$\{n, p\} \in \textit{NoProd}$	Conjunto que relaciona áreas e produtos
$\{n, p, per\} \in \textit{NoProdPer}$	Conjunto que relaciona áreas, produtos e períodos
$\{n, n', p, r\} \in \textit{PNN}$	Conjunto que relaciona origem, destino, produto e rota
$\{n, n', p, r, per\} \in \textit{PNNPer}$	Conjunto que relaciona origem, destino, produto, rota e período
$\{n, p, p', r, per\} \in \textit{ParesDegradacaoPer}$	Conjunto que relaciona origem, pares de produtos possíveis de degradação, rota e período
$\{d, p, p'\} \in \textit{Interfaces}$	Conjunto que relaciona dutos e possíveis interfaces entre produtos
$\{n, n', p\} \in \textit{ODP}$	Conjunto que relaciona origens, destinos e produtos
$\{r, d\} \in \textit{RD}$	Conjunto que relaciona rotas e dutos associados
$\{r, r', d\} \in \textit{RRD}$	Conjunto para identificar diferentes rotas que compartilham o mesmo duto

Tabela 2: Parâmetros gerais do modelo PLIM

M	Valor com ordem de grandeza elevada utilizado em formulações <i>Big-M</i> (e.g, $M = 10^6$)
U	Limite superior utilizado em formulações <i>Big-M</i> (e.g, $U = 10^4$)
L	Limite inferior utilizado em formulações <i>Big-M</i> (e.g, $L = -U = -10^4$)
ϵ	Constante de valor pequeno para evitar igualdades em formulações <i>Big-M</i> (e.g, $\epsilon = 10^{-4}$)
H	Horizonte de planejamento (h)
$Vol_{n,p,per}^{disp}$	Quantidade disponível do produto p na área n e no período per (u.v) durante o horizonte H
$lots_p^{min}$	Quantidade mínima a ser enviada do produto p (u.v)

3.2. Função Objetivo

A equação 1 é a função objetivo do modelo. Os fatores $\{M, M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8\}$ são pesos da função. Assim, define-se que: $M \gg M1 \gg M2 \gg M3 \gg M4 \gg M5 \gg M6 \gg M7 \gg M8$, pois se tratam das cargas de penalização das violações na função objetivo. Por exemplo, a carga de uma violação de capacidade física ($vCap_{n,p}^{max}$) penaliza muito mais o valor da função objetivo do que uma violação de estoque meta máximo ($vMeta_{n,p}^{max}$). Os fatores 7, 8, 9 e 10 destacados em cinza são os fatores acrescentados e tratados no presente artigo, além da modificação no Fator 1 que agora é avaliado por período.

$$\begin{aligned}
 \text{minimizar } z = & \underbrace{\sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \sum_{per \in \text{Periodos}} (Q_{n,n',p,r,per} * t_r)}_{\text{Fator1}} + \\
 & \underbrace{M * \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} (vCap_{n,p}^{max} + vEst_{n,p}^{zero})}_{\text{Fator2}} + \underbrace{M1 * \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} (vEst_{n,p}^{min} + vEst_{n,p}^{max})}_{\text{Fator3}} + \\
 & \underbrace{M2 * \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} (vMeta_{n,p}^{min} + vMeta_{n,p}^{max})}_{\text{Fator4}} + \underbrace{M3 * \sum_{r \in R} \sum_{r' \in R} \sum_{d \in D} rev_{r,r',d}}_{\text{Fator5}} + \underbrace{M4 * \sum_{d \in D} vUtil_d}_{\text{Fator6}} + \\
 & \underbrace{M5 * \sum_{r \in R} \sum_{r' \in R} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} TanquesInter_{r,r',n,p}}_{\text{Fator7}} + \underbrace{M6 * \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} \sum_{p \in P} numODP_{n,n',p}}_{\text{Fator8}} + \\
 & \underbrace{M7 * \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} nIF_{d,p,p'}}_{\text{Fator9}} + \underbrace{M8 * \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{per \in \text{Periodos}} Q_{n,p,p',per}^{degrada}}_{\text{Fator10}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

As características operacionais são convertidas em conjuntos de restrições para buscar a otimalidade do modelo PLIM proposto que consiste em:

- Fator 1: Otimizar a quantidade enviada $Q_{n,n',p,r,per}$ dos produtos p que saem dos nós de origem n aos destinos n' através da rota r mais rápida (parâmetro t_r multiplicando $Q_{n,n',p,r,per}$) em cada período de tempo per considerado dentro do horizonte de análise;
- Fator 2: Minimizar (evitar) as violações de capacidade físicas dos produtos p nas áreas n ;
- Fator 3: Minimizar as violações de capacidades mínimas e máximas operacionais dos produtos p nas áreas n ;
- Fator 4: Buscar atingir perfis de inventário dentro dos limites metas;
- Fator 5: Minimizar o número de dutos d em que operações de reversão, expressas em $rev_{r,r',d}$ ocorrem;
- Fator 6: Minimizar violações $vUtil_d$ das taxas de utilizações dos dutos d ;
- Fator 7: Minimizar o número de ocorrências de estocagem intermediária $TanquesInter_{r,r',n,p}$;
- Fator 8: Evitar o transporte de produtos que têm a mesma origem e mesmo destino por rotas diferentes $numODP_{n,n',p}$;
- Fator 9: Evitar o número de interfaces proibidas $nIF_{d,p,p'}$ em cada duto d entre os pares p e p' ;
- Fator 10: Minimizar a quantidade degradada $Q_{n,p,p',per}^{degrada}$ do produto p para o produto p' em cada área n e em cada período per .

3.3. Restrições

As características físicas e operacionais descritas acima, bem como as variáveis da função objetivo (equação 1) são modeladas por meio de diversas restrições. Nesse trabalho, comparando-se ao trabalho de [Magatão et al., 2012], foram adicionadas restrições de degradação, interfaces entre produtos, estocagem intermediária e novas considerações de movimentações.

3.3.1. Restrições Iniciais

A equação 2 estabelece que a quantidade enviada da área n para n' do produto p pela rota r ($Q_{n,n',p,r,per}$) deve ser menor que a quantidade disponível deste produto na área de envio, somada à quantidade recebida ($Q_{n',n,p,r,per}$) e à quantidade degradada em n ($Q_{n,p',p,per}^{degrada}$).

$$\sum_{n' \in N} \sum_{r \in R} Q_{n,n',p,r,per} \leq Vol_{n,p,per}^{disp} + \sum_{n' \in N} \sum_{r \in R} Q_{n',n,p,r,per} + \sum_{p' \in P} Q_{n,p',p,per}^{degrada} \quad (2)$$

$$\forall \{n, p, per\} \in NoProdPer$$

Áreas que não possuem capacidade têm o inventário obrigatoriamente 0 em todos os períodos, assim como a quantidade recebida no órgão. No período inicial as quantidades movimentadas e degradadas devem ser igual a 0.

3.3.2. Restrições de degradação

As Restrições 3 e 4 estabelecem as quantidades gerada e utilizada na degradação respectivamente.

$$qGeradaDeg_{n,p,per} = \sum_{\{px,p,per\} \in ParesDegracaoPer} Q_{n,px,p,per}^{degrada} \quad (3)$$

$$\forall \{n, p, per\} \in NoProdPer$$

$$qUtilizadaDeg_{n,p,per} = \sum_{\{o,p,px,per\} \in ParesDegracaoPer} Q_{n,p,px,per}^{degrada} \quad (4)$$

$$\forall \{n, p, per\} \in NoProdPer$$

3.4. Restrições de movimentações

As Restrições 5 e 6 são para a minimização de movimentações do mesmo produto da mesma origem para o mesmo destino por rotas diferentes.

$$numODP'_{n,n',p} = \sum_{\{n,n',p,r\} \in PNN} bin_{n,n',p,r} \quad \forall \{n, n', p\} \in ODP \quad (5)$$

$$numODP'_{n,n',p} - numODP_{n,n',p} \leq 1 \quad \forall \{n, n', p\} \in ODP \quad (6)$$

Na Restrição 5 $numODP'_{n,n',p}$ é uma variável auxiliar que recebe a quantidade de envios que ocorrem dos mesmos n para n' por diferentes r . A variável $bin_{n,n',p,r}$ é igual a 1 quando ocorre um envio e 0 caso contrário. A Restrição 6 estabelece que esse número de envios seja 1, porém com uma variável de relaxação $numODP_{n,n',p}$ que é minimizada na função objetivo. ODP é o conjunto esparso que contém o cruzamento de origens (n), destinos (n') com produtos (p). E PNN é o conjunto esparso que relaciona origens (n), destinos (n'), produtos (p) e a rota de transporte (r).

A Restrição 7 estabelece o valor da quantidade movimentada na área sendo 0 se a binária $bin_{n,n',p,r} = 0$. Já na Restrição 8, caso haja movimentação na área ($bin_{n,n',p,r} = 1$) o valor movimentado tem que ser maior que uma quantidade mínima $lots_p^{min}$.

$$Q_{n,n',p,r,per} \leq M * bin_{n,n',p,r,per} \quad \forall \{n, n', p, r, per\} \in PNNPer \quad (7)$$

$$Q_{n,n',p,r,per} \geq lots_p^{min} * bin_{n,n',p,r,per} \quad \forall \{n, n', p, r, per\} \in PNNPer \quad (8)$$

Existindo envio de uma origem para um destino (n para n' de um produto p), não deve haver envio desse destino para essa origem independente da rota (Restrição 9).

$$Q_{n,n',p,r,per} \leq M * (1 - bin_{n',n,p,r',per}) \quad (9)$$

$$\forall \{n, n', p, r, per\} \in PNNPer, \{n, n', p, r', per\} \in PNNPer$$

A quantidade a ser enviada deve ser menor que o volume inicialmente disponível mais a quantidade degradada menos o volume degradado na própria área (Restrição 10).

$$\sum_{\{n,n',p,r,per\} \in PNNPer} Q_{n,n',p,r,per} \leq Vol_{n,p,per}^{disp} + \sum_{\{n',n,p,r',per\} \in PNNPer} Q_{n',n,p,r',per} + \sum_{\{n,p,per\} \in NoProdPer} qGeradaDeg_{n,p,per} - \sum_{\{n,p,per\} \in NoProdPer} qUtilizadaDeg_{n,p,per} \quad \forall \{n,p\} \in NoProd \quad (10)$$

A Restrição 11 determina que duas diferentes rotas r e r' não podem utilizar o mesmo duto em ambas direções para transportar o mesmo produto p . As áreas de origem (n, n') e as de destino (m, m') podem ser diferentes.

$$\forall n, n', m, m' \in N, p, p' \in P, \{r, r', d\} \in RRD, per \in Periodos \quad bin_{n,n',p,r,per} + bin_{m,m',p',r',per} \leq 1 \quad (11)$$

3.4.1. Restrições de estoque intermediário

Para estabelecer as quantidades de estoque intermediário, primeiramente, nas Restrições 12 e 13 definem-se as quantidades que saem e as que chegam na área. A partir dessas quantidades define-se a binária $binEI_{n,p,per}$ (Restrições 14 e 15). A variável $binEI_{n,p,per}$ indica se há estoque intermediário no determinado período per . Caso haja ($binEI = 1$), o valor de $qEstIntPer$ é igual a $qSai$. Já se ($binEI = 0$), $qEstIntPer$ é igual a $qChega$.

$$qChega_{n,p,per} = \sum_{\{n,n',p,r,per\} \in PNNPer} Q_{n',n,p,r,per} \quad \forall \{n,p,per\} \in NoProdPer/per = 0 \quad (12)$$

$$qSai_{n,p,per} = \sum_{\{n',n,p,r,per\} \in PNNPer} Q_{n',n,p,r,per} \quad \forall \{n,p,per\} \in NoProdPer/per = 0 \quad (13)$$

$$qChega_{n,p,per} - qSai_{n,p,per} \geq L * (1 - binEI_{n,p,per}) \quad (14)$$

$$qChega_{n,p,per} - qSai_{n,p,per} \leq (U + \epsilon) * binEI_{n,p,per} + \epsilon \quad (15)$$

Nas Restrições 16, 17, 18 e 19 são estabelecidos os estoques intermediários.

$$qEstIntPer_{n,p,per} - qSai_{n,p,per} \leq U * (1 - binEI_{n,p,per}) \quad \forall \{n,p,per\} \in NoProdPer \quad (16)$$

$$qEstIntPer_{n,p,per} - qSai_{n,p,per} \geq L * (1 - binEI_{n,p,per}) \quad \forall \{n,p,per\} \in NoProdPer \quad (17)$$

$$qEstIntPer_{n,p,per} - qChega_{n,p,per} \leq U * (binEI_{n,p,per}) \quad \forall \{n,p,per\} \in NoProdPer \quad (18)$$

$$qEstIntPer_{n,p,per} - qChega_{n,p,per} \geq L * (binEI_{n,p,per}) \quad \forall \{n,p,per\} \in NoProdPer \quad (19)$$

A Restrição 20 estabelece que os órgãos de extremidade da rede (e.g, N2, N14) não façam a operação de estoque intermediário, ou operação pulmão. Nota-se que se a binária que indica se há transporte de n' para n'' for igual a 1, a quantidade (no caso será de estoque intermediário) é igual a 0.

$$\forall n' \in OrgaosFronteira, \{n,n',p,r,per\} \in PNNPer, \{n',n'',p,r',per\} \in PNNPer \quad Q_{n,n',p,r,per} \leq M * (1 - bin_{n',n'',p,r',per}) \quad (20)$$

3.5. Restrições de Interfaces

Para as restrições de interface, verifica-se os produtos p e p' pertencem a grupos diferentes e se utilizam o mesmo duto. Em caso afirmativo, há interface entre os produtos (Restrição 21). A Restrição 22 contabiliza o número de ocorrências de interfaces em nIF , variável minimizada na função objetivo.

$$\begin{aligned} bin_{n,n',p,r,per} + bin_{nx,nx',p',r',per} &\leq 1 + binIF_{dt,p,p',per} \quad \forall \{dt, p, p'\} \in Interface, \\ \{n, n', p, r, per\} &\in PNNPer, \{r, dt\} \in RD, \\ \{nx, nx', p', r', per\} &\in PNNPer, \{r', dt\} \in RD \end{aligned} \quad (21)$$

$$nIF_{d,p,p'} = \sum_{per \in Periodos} binIF_{d,p,p',per} \quad \forall \{d, p, p'\} \in Interface \quad (22)$$

4. Resultados e Discussão

Nessa seção são apresentadas as soluções do modelo de planejamento do *scheduling* dutoviário de uma rede real de transporte de derivados leves de petróleo. Análises qualitativas e quantitativas são realizadas em quatro cenários reais de 30 dias com informações de demanda, estoque-duto e campanhas de produção diferentes.

4.1. Modelo PLIM: Resultados Computacionais

Para a realização dos experimentos utilizou-se o *software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.5*, executando em um computador com processador *Intel i7* de 8 núcleos, 2.93 GHz de *clock*, 4GB de memória *RAM* e sistema operacional *Windows 7 - 64Bits*. Os resultados computacionais para o modelo de planejamento são apresentados na Tabela 3. Soluções ótimas foram obtidas (*gaps* de integralidade iguais a zero - o modelo convergiu à otimalidade) em tempos abaixo de 31 segundos, nos cenários analisados.

Tabela 3: Resultados Computacionais do modelo de planejamento

	Cenários			
	C1	C2	C3	C4
Solução	Ótima	Ótima	Ótima	Ótima
Tempo (s)	15,31	19,66	30,76	16,07
Fnc. Objetivo	30, 8.10 ⁹	34, 32.10 ⁹	11, 3.10 ⁹	30, 8.10 ⁹
Gap (%)	0	0	0	0
Iterações	99541	120285	238364	104211
Variáveis	7114	8761	12503	7258
Var. Binárias	2344	1876	1516	1202
Restrições	14073	13678	18911	13973

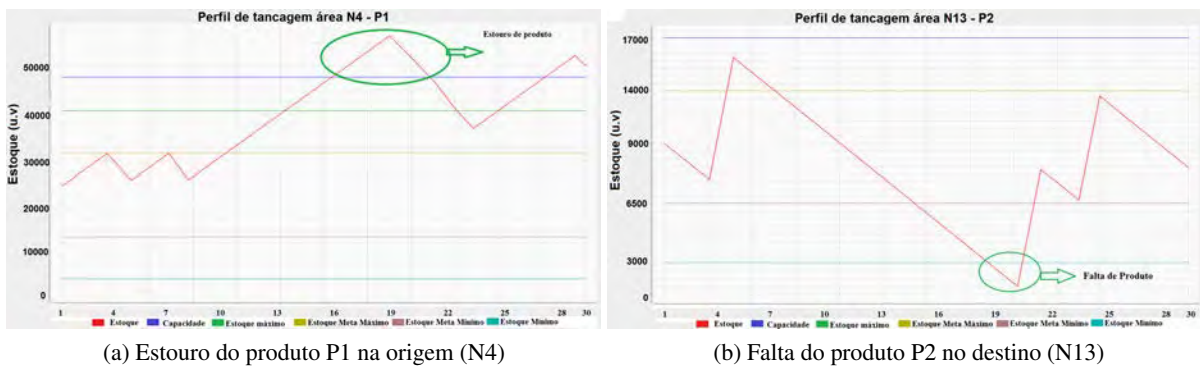
4.2. Modelo PLIM: Planejamento Obtido

A Tabela 4 apresenta os volumes totais a serem movimentados, degradados, as violações das faixas limites de estoque, os números de reversões, interfaces proibidas e pares origem-destino que utilizam mais de uma rota para transporte do mesmo produto. Os resultados indicam que em nenhum cenário ocorreram violações de faixas de capacidade física. Já as violações de Estoques Metas, mesmo com valores consideráveis, não têm impacto significativo, uma vez que são limites desejáveis e a flutuação acima e/ou abaixo destas faixas é normal. Violações de estoques mínimos/máximos são menos desejáveis, mas possuem valores considerados baixos em relação ao montante total. Nos cenários C2 e C3 a quantidade de degradação é relativamente mais significativa. Essa programação ocorre devido a demandas maiores de certos produtos e a quantidade insuficiente de produto no cenário para supri-las. A Figura 5 ilustra um caso que a operação de degradação é utilizada. Na Figura 5a observa-se um período de tendência de estouro de capacidade do produto P1, enquanto que na Figura 5b a falta do produto P2. Ambos gráficos são referentes ao

cenário 1, entretanto observa-se a ocorrência de estouro quando não é tratada a degradação. Há a possibilidade de degradação do produto em excesso na origem N4 no produto faltante no destino N13. A Figura 6 ilustra o resultado com o tratamento de degradações, ressalta-se que não ocorrem as violações anteriores.

Tabela 4: Resultados quantitativos do modelo de planejamento

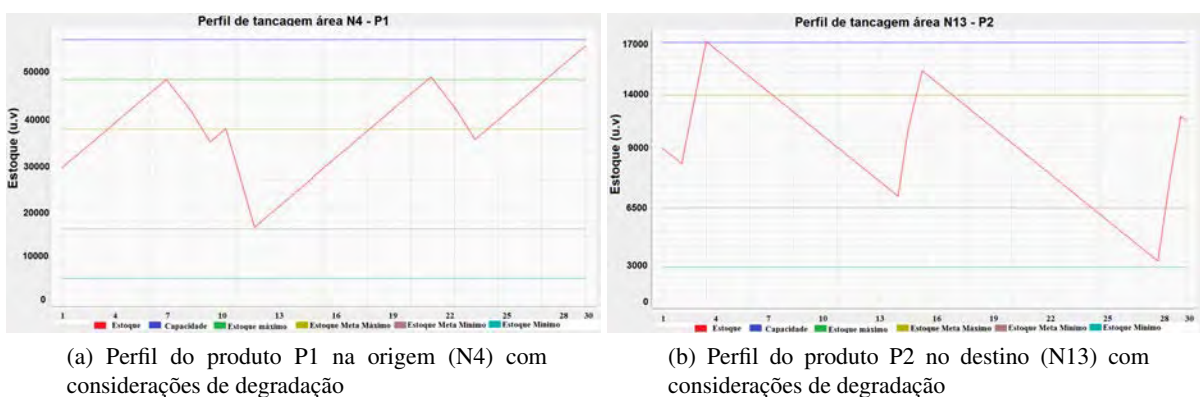
	Cenários			
	C1	C2	C3	C4
Volume Movimentado (10^3 u.v)	2278	2132	1913	2475
Volume Degradado (10^3 u.v)	62,4	160,5	169,2	74,8
Violações de Capacidade (10^3 u.v)	0	0	0	0
Violações de Estoque Zero (10^3 u.v)	0	0	0	0
Violações de Estoque Mínimo (10^3 u.v)	5,42	61,97	14,62	7,52
Violações de Estoque Máximo (10^3 u.v)	12,68	31,45	18,37	10,68
Violações de Estoque Meta Mínimo (10^3 u.v)	94,35	228,55	111,54	95,08
Violações de Estoque Meta Máximo (10^3 u.v)	89,42	58,59	123,03	94,56
Reversões	4	0	1	8
Interfaces Proibidas	2	0	0	1
<i>numODP</i>	0	1	2	0



(a) Estouro do produto P1 na origem (N4)

(b) Falta do produto P2 no destino (N13)

Figura 5: Estoques sem considerações de degradação.



(a) Perfil do produto P1 na origem (N4) com considerações de degradação

(b) Perfil do produto P2 no destino (N13) com considerações de degradação

Figura 6: Estoques com as considerações de degradação.

Agradecimentos

A PETROBRAS/CENPES (termo de cooperação 0050.0066666.11.9) e aos projetos de produtividade do CNPq 304037/2010-9, 311877/2009-5 e 305405/2012-8.

Conclusão

A abordagem de solução para o planejamento operacional (*scheduling*) otimizado da rede de transporte de derivados leves de petróleo (Figura 2) foi o objeto de estudo do presente artigo. Este trabalho apresentou o modelo para uma etapa da estratégia de decomposição adotada (Figura 3), o modelo de planejamento. A partir do modelo desenvolvido é possível em poucos segundos determinar os volumes totais, assim como os degradados, que serão movimentados durante o horizonte de programação e suas rotas de transporte. Essas informações são de suma importância para a tomada de decisões operacionais da rede. Novos fatores foram tratados nesta abordagem comparado ao modelo apresentado por [Magatão et al., 2012], tais quais tratamento de interfaces entre produtos, número de áreas com movimentações do mesmo produto da mesma origem para o mesmo destino por rotas diferentes, degradações de produtos e tancagem intermediária. Fatores que representam de maneira mais fiel as operações do dia-a-dia na rede dutoviária em estudo. Como trabalho futuro, sugere-se o estudo de um método para determinação dos pesos da função objetivo que são determinados de forma empírica baseado na importância relativa dos fatores e na experiência de especialistas do sistema.

Referências

- Herrán, A., Defersha, F. M., Chen, M., e de la Cruz, J. M. (2011). An integrated multi-period planning of the production and transportation of multiple petroleum products in a single pipeline system. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2:19–44.
- Ivanov, D. (2010). An optimal-control based integrated model of supply chain scheduling. *Graduate School of Management, St. Petersburg State University*.
- Magatão, L., Arruda, L., e Neves-Jr, F. (2004). A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline. *Computers & Chemical Engineering*, 28:171–185.
- Magatão, S. N. B., Magatão, L., Neves-Jr, F., e Arruda, L. V. R. (2015). Novel MILP decomposition approach for scheduling product distribution through a pipeline network. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54:5077–5095.
- Magatão, S. N. B., Magatão, L., Polli, H. L., Neves-Jr., F., de Arruda, L. V. R., Relvas, S., e Barbosa-Póvoa, A. P. F. D. (2012). Planning and sequencing product distribution in a real-world pipeline network: An MILP decomposition approach. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51: 4591–4609.
- Polli, H. L. (2014). Otimização do transporte de derivados claros de petróleo em rede de dutos utilizando programação linear inteira mista. Master's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.
- Reklaitis, G. (1992). Overview of scheduling and planning of batchprocess operations. In *Proceedings of the NATO*, p. 660–675. Proceedings of the NATO.
- Reklaitis, G. (2000). Overview of planning and scheduling technologies. *Latin America Applied Research*.
- Stebel, S. L., Magatão, S. N., e Neves, F. (2012). Mixed integer linear programming formulation for aiding planning activities in a complex pipeline network. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51:11417–11433.