



Abordagem em fases utilizando PLIM para o 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, Lucia Valéria Ramos de Arruda, Leandro Magatão
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 nova abordagem de solução para o planejamento das atividades em uma rede dutoviária real localizada no Brasil. O problema tratado é complexo e o modelo proposto é parte (entrada) de uma estratégia de decomposição baseada na integração de diferentes módulos, compostos por modelos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) e heurísticas. Os principais módulos desenvolvidos são os de: Planejamento, Alocação e Sequenciamento, e Temporização. Nesta abordagem, o planejamento é responsável por determinar os volumes totais que são transportados na rede dentro de um horizonte de 30 dias e as rotas desse transporte. Este trabalho é uma evolução do modelo introduzido por [Schnirmann et al., 2016] sendo o modelo de planejamento, agora proposto, dividido em três fases, visando o melhor controle de características operacionais da rede, como: reversão dos dutos, interfaces entre produtos adjacentes, operação pulmão, manutenção de tanques e degradações. Soluções são obtidas para cenários reais em tempos computacionais reduzidos (segundos).

PALAVRAS CHAVE. Planejamento de transporte dutoviário. PLIM. Rede de dutos.

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

ABSTRACT

This work proposes a new solution approach for the planning activities in a real-world pipeline network located in Brazil. The related problem is complex and the proposed model is part (input) of a solution strategy based on the integration of distinct modules composed of Mixed Integer Linear Programming (MILP) and heuristic procedures. The main developed modules are the: Planning, Assignment and Sequencing, and Timing blocks. In this work, the Planning Model is responsible for determining total volumes that are transported in a 30-day horizon in the network and the required routes (paths) for this transport. This work extends the model introduced by [Schnirmann et al., 2016] with a division of the planning model in three stages to better control the influence of each network's operational characteristic, for instance: pipeline reverse flow procedures, contaminations between adjacent products, surge tank operations, tank maintenances and degradations. Solutions are obtained in a reduced computational time (seconds) for real scenarios.

KEYWORDS. Transport Scheduling. MILP. Pipeline Network.

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



1. Introdução

Uma indústria que vem crescendo aliada a otimização dos seus processos operacionais é a indústria petrolífera. A eficiência no setor gera inúmeros ganhos nos âmbitos financeiro e ambiental [Ivanov, 2010]. Nos últimos anos, diversos trabalhos utilizando técnicas de otimização para o *scheduling* eficiente da logística do transporte de derivados do petróleo vêm sendo publicados. Porém, o gerenciamento da cadeia de suprimentos petrolífera em todos os seus níveis, de forma integrada, deve ser melhor explorado. O fluxo de produtos em cadeias de suprimentos é influenciado por decisões tomadas nos níveis estratégico, tático e operacional [Reklaitis, 1992]. Além disso, devem-se utilizar os modelos de tomada de decisão baseados em programação linear e modelos de transporte, que tornam mais evidentes os custos e as interdependências entre as etapas.

Este trabalho propõe uma abordagem hierarquizada para obter soluções na etapa de planejamento tático influenciando diretamente no planejamento operacional (*scheduling*) de uma cadeia de suprimentos petrolífera, de maneira integrada. A integração dos diferentes níveis de planejamento é aplicada a uma rede de dutos, que opera no transporte de derivados leves de petróleo. Na maioria das trabalhos presentes na literatura, ou planejamento tático ou apenas o *scheduling* de complexos dutoviários é explorado. Recentemente, um número considerável de publicações sobre planejamento operacional (*scheduling*) de dutos têm sido apresentadas. Os trabalhos são conduzidos conforme a topologia dos dutos, podendo ser um duto unidirecional (ex: [Relvas et al., 2013]), um duto bidirecional (ex: [Magatão et al., 2011]), um duto com múltiplas sangrias (ex: [Cafaro e Cerdá, 2004]), ou rede de dutos (ex: [Magatão et al., 2015]).

Especificamente, no presente trabalho, é considerada uma rede de dutos complexa em relação à literatura correlata (n origens \times m destinos). Assim a carga computacional envolvida é um problema relevante dentro de um cenário que exige respostas rápidas de programação. Além da integração dos diferentes níveis de planejamento, esse trabalho propõe uma evolução comparada ao trabalho publicado no ano anterior [Schnirmann et al., 2016]. O modelo de planejamento é dividido em fases, buscando o melhor controle de diferentes objetivos.

Devido a tamanha complexidade, a abordagem de decomposição ilustrada na Figura 1 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-se os tempos de início e fim de bombeio dos volumes.

O presente trabalho retrata uma evolução do bloco do Modelo de planejamento. A Figura 1a apresenta a estrutura de solução proposta considerando um único modelo de planejamento [Schnirmann et al., 2016]. A Figura 1b apresenta a estratégia de solução utilizando o planejamento em diferentes fases, proposta nesse trabalho. Espera-se através da abordagem de solução proposta, obter um melhor controle dos termos da função objetivo, atuando melhor nas prioridades de minimização e, com isso, quer-se obter resultados aderentes ao desejo dos operadores da rede.

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 de cada uma das fases do planejamento, com suas respectivas funções objetivo e restrições adicionadas em cada fase. Na seção 4 são discutidos os resultados 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, N11, N12 e N13), que recebem ou enviam produtos. Os órgãos são interligados através de 30 dutos, cada um

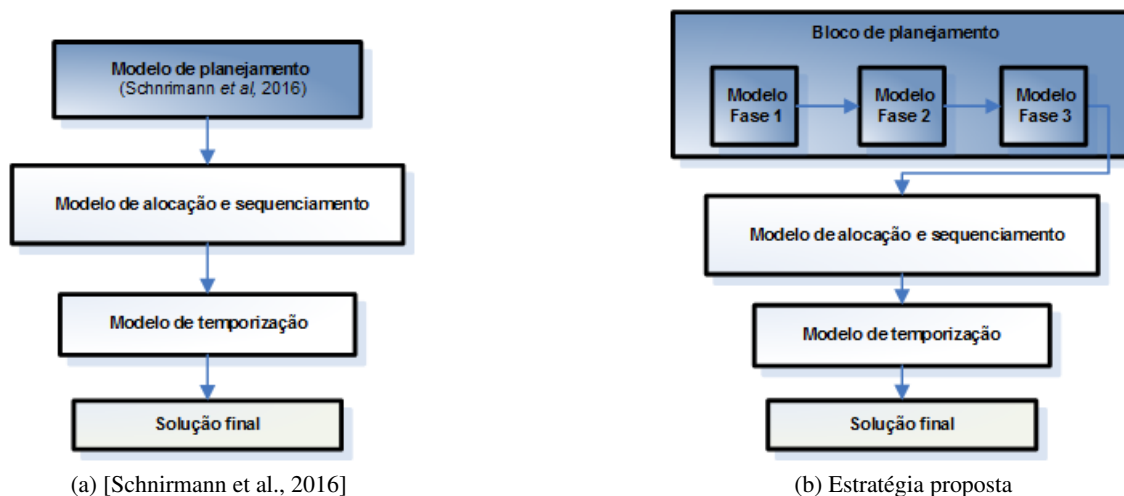


Figura 1: Ilustração das etapas principais da estratégia de decomposição proposta.

com seu volume particular e podendo ser unidirecionais ou bidirecionais. Mais de 35 derivados claros de petróleo e etanol podem trafegar nesta rede.

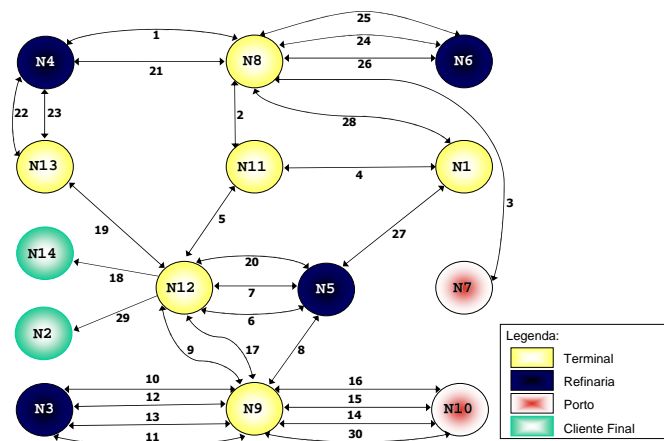


Figura 2: Ilustração da rede de dutos.

Fonte: Adaptado de [Magatão et al., 2015]

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 planejamento/*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 [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.
- *Manutenção de tanques*: Um tanque que armazena um determinado produto pode entrar em manutenção, ocasionando diminuição na capacidade total agregada de estocagem do produto no órgão [Polli et al., 2017].
- *Manutenção de dutos*: Os dutos podem entrar em manutenção, ocasionando paradas.
- *Degradação*: Utiliza-se um produto com especificações mais restritivas como outro menos restritivo. Degrada-se o produto (no presente contexto, um produto mais nobre) em outro para atendimento da demanda e para que a especificação do produto final seja atendida.
- *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 2, 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].

3. Bloco 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 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.

3.1. Modelo PLIM de planejamento [Schnirmann et al., 2016]

O modelo de planejamento tal como apresentado em Figura 1a, passou a considerar um número maior de restrições operacionais, entretanto muitos fatores surgiram na função objetivo, tornando difícil o controle da influência de cada variável no modelo de otimização. Dentre as restrições, são considerados:

- Cálculo da quantidade enviada da área n para n' do produto p pela rota r ($Q_{n,n',p,r,per}$) em cada período de tempo per , considerando volumes degradados;



- Cálculo do volume degradado na origem ($Q_{n,p',p,per}^{degrada}$) para suprir a demanda de outro produto no destino;
- Cálculo do balanço de massa em todas as áreas (origem e destino da rota) para cada período de tempo;
- Restrições que limitam movimentações indesejadas:
 - existindo envio de uma origem para um destino, não deve haver envio desse destino para essa origem independente da rota;
 - não uso de rotas distintas ligando o mesmo par origem/destino para o transporte do mesmo produto;
 - duas diferentes rotas r e r' não podem utilizar o mesmo duto em ambas direções para transportar o mesmo produto p .
- Estabelecer uma quantidade mínima de movimentação;
- Cálculo de possibilidade de interfaces proibidas nos dutos ($nIF_{d,p,p'}$);
- Limitação da utilização dos dutos ($vUtil_d$);
- Cálculo de violações em diferentes limites de inventário ($vCap_{n,p,per}$, $vZero_{n,p,per}$, $vEst_{n,p,per}^{min}$, $vEst_{n,p,per}^{max}$, $vMeta_{n,p,per}^{min}$, $vMeta_{n,p,per}^{max}$);
- Cálculo de estoque intermediário ($TanquesInter$).

A equação da função objetivo do modelo apresentado em [Schnirmann et al., 2016] contém 10 fatores na função objetivo, cada qual com um peso associado a prioridade de minimização, e pode ser consultada no referido trabalho.

3.2. Planejamento em Fases

Uma nova abordagem é proposta separando o modelo de planejamento em três fases (Figura 3). Fez-se essa decomposição levando-se em conta prioridades operacionais de otimização e grandezas das variáveis. Objetiva-se buscar um controle maior das características operacionais no modelo de planejamento e, conseqüentemente, das diretrizes do *scheduling* como um todo.

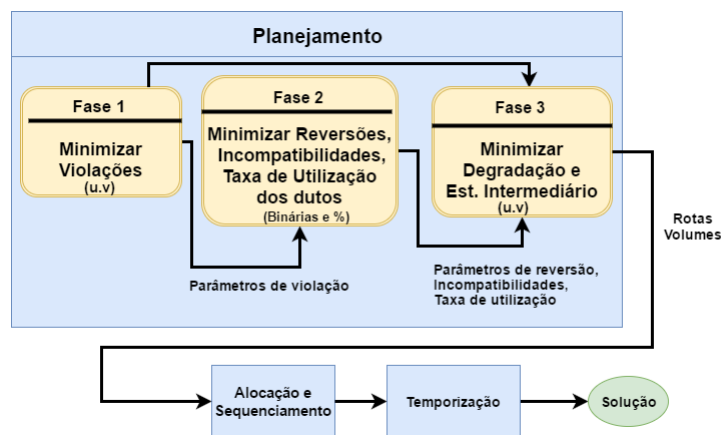


Figura 3: Decomposição hierárquica com Planejamento em 3 fases

A decomposição do problema em três fases é executada de forma sequencial, deste modo, as variáveis da solução de cada fase preliminar tornam-se parâmetros de entrada para as fases subsequentes. Na primeira fase minimizam-se as violações de estoque. Subseqüentemente, na segunda, minimizam-se interfaces proibidas, reversões e taxas de utilização dos dutos. Finalmente, na terceira, minimizam-se quantidades de estoque intermediário e degradações de produtos.



3.2.1. Formulação Matemática do Planejamento em 3 Fases

A formulação matemática do modelo de planejamento apresentada em [Magatão et al., 2012] e aprimorada em [Schnirmann et al., 2016] se manteve. Será apresentado a seguir as principais mudanças em relação ao trabalho anterior, considerando a divisão em fases. De modo complementar, consulta aos trabalhos acima citados pode ser realizada.

3.2.2. Fase 1

Na Fase 1 são minimizadas as violações de estoque, dessa maneira tem-se a função objetivo na Equação 1. A dimensão de Z , nesse caso, é em unidades volumétricas (uv) e os pesos são considerados de tal forma que: $P1 \ggg P2 \ggg P3$.

$$\begin{aligned}
 \text{minimizar } F1 = & \\
 & \underbrace{P1 \cdot \left[\sum_{(n,p,per) \in NoProdPer} (vZero_{n,p,per} + vCap_{n,p,per}) \right]}_{\text{Fator 1}} \\
 & + P2 \cdot \underbrace{\left[\sum_{(n,p,per) \in NoProdPer} (vEst_{n,p,per}^{min} + vEst_{n,p,per}^{max}) \right]}_{\text{Fator 2}} \\
 & + P3 \cdot \underbrace{\left[\sum_{(n,p,per) \in NoProdPer} (vMeta_{n,p,per}^{min} + vMeta_{n,p,per}^{max}) \right]}_{\text{Fator 3}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Essa função objetivo está sujeita a todas as restrições consideradas na abordagem de [Schnirmann et al., 2016]. Entretanto, as demais variáveis que eram inicialmente minimizadas na função objetivo em fase única (e.g. Número de dutos revertidos, quantidade de degradação) não são minimizadas nesse momento. Assim, a Fase 1 concentra-se somente nas violações de estoque.

3.2.3. Fase 2

Na Fase 2 são minimizadas reversões, incompatibilidades (interfaces proibidas) e a taxa de utilização dos dutos.

Apresentam-se nas Tabelas 1 e 2 os novos parâmetros e variáveis incorporados na Fase 2 do modelo de planejamento em 3 fases.

Tabela 1: Parâmetros da Fase 2 do modelo de Planejamento em 3 fases

Parâmetro	Domínio	Descrição
$vECap_{n,p,per}$	\mathbb{R}_+	Violação de capacidade na Fase 1 por área, produto e período (u.v)
$vEZero_{n,p,per}$	\mathbb{R}_+	Violação de estoque zero na Fase 1 por área, produto e período (u.v)
$vEMin_{n,p,per}$	\mathbb{R}_+	Violação de Estoque mínimo na Fase 1 por área, produto e período (u.v)
$vEMax_{n,p,per}$	\mathbb{R}_+	Violação de Estoque máximo na Fase 1 por área, produto e período (u.v)
$\theta1, \theta2, \dots, \theta5$	\mathbb{R}_+	Fatores de ponderação da função objetivo

Tabela 2: Variáveis da Fase 2 do modelo de Planejamento em 3 fases

Variável	Conjunto	Descrição
$rlxEst_{n,p,per}^{Min}$	$NoProdPer$	Variável de relaxação do estoque mínimo por área, produto e período determinado na Fase 1 e imposto na Fase 2 (u.v)
$rlxEst_{n,p,per}^{Max}$	$NoProdPer$	Variável de relaxação do estoque máximo por área, produto e período determinado na Fase 1 e imposto na Fase 2 (u.v)
$numPRO$	\mathbb{Z}_+	Número total das ocorrências de possibilidades de interfaces (unidades)
$numREV$	\mathbb{Z}_+	Número total das ocorrências de pares de rotas que utilizam o mesmo duto em sentidos opostos (unidades)



Por questões de segurança e factibilidade do modelo, as variáveis de violação de estoques mínimos e máximos na Fase 1 são relaxadas ($rlxEst_{n,p,per}^{Min}$ e $rlxEst_{n,p,per}^{Max}$) na Fase 2 e constam na função objetivo. No caso de alguma ocorrência dessas violações a função assume um valor muito alto e diferencia-se das outras influências, dessa maneira o peso θ_5 é muito elevado e sinaliza a ocorrência de tais violações. Assim, $\theta_5 \gg (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$. As outras ordens de grandeza e prioridade dão-se por: $\theta_1 = \theta_2 \gg \theta_3$ e $\theta_3 \gg \theta_4$. Na função de minimização formulada na Equação 2, os principais fatores de $F2$ não tem uma grandeza dimensional, visto que minimiza variáveis binárias e porcentagens.

$$\begin{aligned}
 \text{minimizar } F2 = & \\
 & \underbrace{\theta_1 \cdot \sum_{(r,r',d) \in Reversao} rev_{r,r',d}}_{\text{Fator 1}} + \underbrace{\theta_2 \cdot \sum_{d \in D} vUtil_d}_{\text{Fator 2}} + \underbrace{\theta_3 \cdot \sum_{d \in D} txUtil_d^{Des}}_{\text{Fator 3}} \\
 & + \underbrace{\theta_4 \cdot \sum_{(d,p,p') \in Interface} nIF_{d,p,p'}}_{\text{Fator 4}} + \underbrace{\theta_5 \cdot \sum_{(n,p,per) \in NoProdPer} (rlxEst_{n,p,per}^{Min} + rlxEst_{n,p,per}^{Max})}_{\text{Fator 5}}
 \end{aligned} \quad (2)$$

Resumem-se na Tabela 3 as transições de variáveis da Fase 1 para parâmetros e variáveis na Fase 2. Na Fase 1 todas as violações de estocagem são variáveis, já na Fase 2 $vEst_{n,p,per}^{Zero}$ e $vCap_{n,p,per}^{Max}$ tornam-se parâmetros impostos, enquanto as violações $vEst_{n,p,per}^{min}$ e $vEst_{n,p,per}^{max}$ tornam-se parâmetros com variáveis de relaxação minimizadas na função objetivo e, finalmente, $vMeta_{n,p,per}^{min}$ e $vMeta_{n,p,per}^{max}$ continuam variáveis, porém não são minimizadas na função objetivo.

Tabela 3: Transição das variáveis da Fase 1 para Fase 2

Fase 1		Fase 2		
Variável		Parâmetro	Estado	Variável
$vEst_{n,p,per}^{Zero}$	$vCap_{n,p,per}^{Max}$	✓	Imposto	X
$vEst_{n,p,per}^{min}$	$vEst_{n,p,per}^{max}$	✓	Relaxação	$rlxEst_{n,p,per}^{Min}$
$vMeta_{n,p,per}^{min}$	$vMeta_{n,p,per}^{max}$	X	Livre	✓

Detalham-se as mudanças nas restrições do modelo original para a Fase 2 da abordagem em 3 fases.

$$numODP'_{n,n',p} \leq 1 \quad \forall (n, n', p) \in ODP \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 inventario_{n,p,per} = & inventario_{n,p,per-1} - vEst_{n,p,per-1}^{Zero} + Prod_{n,p,per} - Dem_{n,p,per} \\
 & + vEst_{n,p,per}^{Zero} + (qChega_{n,p,per} - qSai_{n,p,per}) \\
 & + (qGeradaDeg_{n,p,per} - qUtilizadaDeg_{n,p,per}) \quad \forall (n, p, per) \in NoProdPer \mid per \neq 0
 \end{aligned} \quad (4)$$

$$inventario_{n,p,per} - vCap_{n,p,per} \leq CAP_{n,p,per} \quad (5)$$

$$inventario_{n,p,per} + vEst_{n,p,per}^{Min} + rlxEst_{n,p,per}^{Min} \geq Estoque_{n,p,per}^{min} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 inventario_{n,p,per} - vEst_{n,p,per}^{Max} - rlxEst_{n,p,per}^{Max} & \leq Estoque_{n,p,per}^{max} \\
 & \forall (n, p, per) \in NoProdPer
 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\sum_{(d,p,p') \in Interface} nIF_{d,p,p'} = numPRO \quad (8)$$

$$\sum_{(r,r',d) \in Reversao} rev_{r,r',d} = numREV \quad (9)$$



A variável $numODP$ deixa de ser minimizada na função objetivo e $numODP'_{n,n',p}$ passa a ser imposta como ≤ 1 (Inequação 3). Na Equação 4 formula-se o inventário considerando a violação de estoque zero como um parâmetro. Na Inequação 5 a violação de capacidade é imposta como parâmetro $vCap_{n,p,per}^{Max}$, dado vindo da Fase 1. Da mesma forma, nas Inequação 6 e 7 impõe-se como parâmetros as violações de estoque mínimo e máximo ($vEst_{n,p,per}^{Min}$ e $vEst_{n,p,per}^{Max}$), entretanto, essas violações são relaxadas por $rlxEst_{n,p,per}^{Min}$ e $rlxEst_{n,p,per}^{Max}$ para factibilizar a solução. Agrupam-se variáveis de número de incompatibilidades e reversões (Equações 8 e 9) que serão utilizadas como parâmetros de entrada para a fase subsequente.

As expressões 4 a 7 substituem as expressões de cálculo da violação de inventário dos limites de capacidade e estoque mínimo e máximo da abordagem em fase única. Já as expressões 8 e 9 foram adicionadas na formulação da Fase 2.

3.2.4. Fase 3

Na Fase 3 minimizam-se as quantidades de estocagem intermediária/operação pulmão e degradações. Para isso detêm-se dos dados de saída das Fases 1 e 2. Os dados provenientes da Fase 1 alimentam a Fase 3 da mesma maneira que ocorreu na Fase 2, assim as restrições em relação às violações são as mesmas. Já as variáveis de reversões, interfaces proibidas e taxas de utilização da Fase 2 alimentam a Fase 3. A função objetivo é formulada na Equação 10. Nessa fase a ordem de grandeza de $F3$ é em unidades volumétricas (u.v), porém, similarmente à Fase 2, pesos elevadíssimos ponderam as violações de estoques máximo e mínimo e, adicionalmente, são incorporadas variáveis de relaxação referentes à saída da Fase 2 ($violaPROIBIDA$ e $violaREV$). A tendência e objetivo são que esses fatores relativos a relaxações de fases anteriores não sejam utilizados, atuando na segurança e factibilidade da solução, bem como na sinalização da necessidade de tais operações. Assim, as ordens de grandeza dos pesos são: $(\omega3, \omega4, \omega5) \gg (\omega1 \ll \omega2)$.

Apresentam-se na Tabela 4 e 5 os novos parâmetros e variáveis incorporados na Fase 3 do modelo de Planejamento em 3 fases.

Tabela 4: Parâmetros da Fase 3 do modelo de Planejamento em 3 fases

Parâmetro	Domínio	Descrição
$vCap_{n,p,per}$	\mathbb{R}_+	Violação de capacidade na Fase 1 por área, produto e período (uv)
$vZero_{n,p,per}$	\mathbb{R}_+	Violação de estoque zero na Fase 1 por área, produto e período (uv)
$vMin_{n,p,per}$	\mathbb{R}_+	Violação de Estoque mínimo na Fase 1 por área, produto e período (uv)
$vMax_{n,p,per}$	\mathbb{R}_+	Violação de Estoque máximo na Fase 1 por área, produto e período (uv)
$numPRO$	\mathbb{Z}_+	Número total das ocorrências de possibilidades de interfaces proveniente da Fase 2 (un)
$numREV$	\mathbb{Z}_+	Número total de rotas que utilizam o mesmo duto em sentidos opostos proveniente da Fase 2 (un)
$Util_d$	$[0; H]$	Taxa de utilização dos dutos proveniente da Fase 2 (h)
$\omega1, \omega2, \dots, \omega5$	\mathbb{R}_+	Fatores de ponderação da função objetivo

Tabela 5: Variáveis da Fase 3 do modelo de Planejamento em 3 fases

Variável	Conjunto	Descrição
$rlxEstMin_{n,p,per}$	$NoProdPer$	Variável de relaxação do estoque mínimo por área, produto e período determinado na Fase 1 e imposto na Fase 2 (uv)
$rlxEstMax_{n,p,per}$	$NoProdPer$	Variável de relaxação do estoque máximo por área, produto e período determinado na Fase 1 e imposto na Fase 2 (uv)
$violaREV$	\mathbb{Z}_+	Variável de relaxação do número de pares de rotas que utilizam mesmo duto em sentidos opostos determinando na Fase 2 e imposto na Fase 3 (un)
$violaPROIBIDA$	\mathbb{Z}_+	Variável de relaxação do número de possibilidades de interfaces proibidas determinado na Fase 2 e imposto na Fase 3 (un).
$rlxUtil_d$	$Dutos$	Variável de relaxação da utilização por duto determinada na Fase 2 e imposta na Fase 3 (h)
$txUtilDuto_d$	$Dutos$	Utilização dos dutos na Fase 3 (h)



$$\begin{aligned}
 \text{minimizar } F3 = & \\
 & \underbrace{\sum_{(n,n',p,r,per) \in PNNP} \left(Q_{n,n',p,r,per} \cdot t_r \right)}_{\text{Fator 1}} + \omega 1 \cdot \underbrace{\sum_{(n,p,per) \in NoProdPer} qEstInter_{n,p,per}}_{\text{Fator 2}} \\
 & + \omega 2 \cdot \underbrace{\sum_{(n,p,p',pri,per) \in ParesDegradacaoPer} \left(Q_{n,p,p',pri,per}^{degrada} \right) \cdot pri^2}_{\text{Fator 3}} \\
 & + \omega 3 \cdot \underbrace{\sum_{(n,p,per) \in NoProdPer} (relaxEstMin_{n,p,per} + relaxEstMax_{n,p,per})}_{\text{Fator 4}} \\
 & + \omega 4 \cdot \underbrace{(violaPROIBIDA + violaREV)}_{\text{Fator 5}} + \omega 5 \cdot \underbrace{\sum_{d \in Dutos} relaxUtil_d}_{\text{Fator 6}}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Ilustram-se na Tabela 6 as transições das variáveis da Fase 2 que passam a ser parâmetros na Fase 3, entretanto variáveis de relaxação foram incorporadas ao modelo.

Tabela 6: Transição das variáveis da Fase 2 para Fase 3

Fase 2		Fase 3	
Variável	Parâmetro	Estado	Variável
<i>numPRO</i>	✓	Relaxação	<i>violaPROIBIDA</i>
<i>numREV</i>	✓	Relaxação	<i>violaREV</i>
<i>txUtil_d</i>	✓	Relaxação	<i>relaxUtil_d</i>

Detalham-se as mudanças nas restrições para a Fase 3. Para interfaces proibidas e reversões considerou-se o número total planejado na Fase 2 e acrescentaram-se variáveis de relaxação (Equações 11 e 12). Na Equação 11, *numPRO* é parâmetro de entrada proveniente da Fase 2 com o número total de interfaces proibidas e *violaPROIBIDA* é a variável de relaxação. Já na Equação 12, *numREV* é dado com número total de reversões da Fase 2 e entra como parâmetro na Fase 3. Determinam-se as taxas de utilização dos dutos *txUtilDuto_d* com e sem manutenção proveniente da Fase 2 *Util_d* e considera-se a variável de relaxação *relaxUtil_d*. Na Fase 3, as inequações 13 e 14 substituem as inequações para cálculo de taxa de utilização de dutos. Por fim, as expressões 11 e 12 foram adicionadas na formulação dessa fase.

$$\sum_{(d,p,p') \in Interface} binInterface_{d,p,p'} - violaPROIBIDA \leq numPRO \tag{11}$$

$$\sum_{(r,r',d) \in Reversao} binRev_{r,r',d} - violaREV \leq numREV \tag{12}$$

$$txUtilDuto_d = Util_d + relaxUtil_d \quad \forall (d,p) \in DutoSemManutencao \tag{13}$$

$$txUtilDuto_d = Util_d + relaxUtil_d \quad \forall (d,p) \in DutoManutencao \tag{14}$$



4. Resultados e Discussão

Nessa seção são apresentados os principais resultados do modelo de planejamento proposto, comparado ao modelo apresentado em [Schnirmann et al., 2016]. As análises foram realizadas em oito cenários reais de 30 dias com informações de demanda, estoque-duto e campanhas de produção distintas. As soluções foram executadas no *software ILOG CPLEX STUDIO v. 12.6* em tempos computacionais totais (para as três fases) variando de 4 a 12 segundos. O número total de variáveis para cada fase é na faixa de 10000, sendo 1200 binárias, 150 inteiras e 9650 contínuas.

Ilustram-se na Tabela 7 os resultados de ambas abordagens apresentadas para o Cenário C1. Na referida tabela, aponta-se na execução em 3 fases uma redução na quantidade total movimentada de 80890uv, mantendo-se as mesmas violações físicas e de estoques min/max da abordagem em 1 fase. A taxa média de utilização dos dutos (controlada na Fase 2) reduziu de 38,6% para 31,88% refletindo na diminuição da quantidade total movimentada. Destaca-se a diminuição na quantidade de reversões planejadas de 6 para 3. Entretanto, o número de possibilidades de interfaces proibidas aumentou de 2 para 5. Optou-se por maior liberdade nas operações de degradação, objetivando evitar violações de estoques na solução final. Por fim, as quantidades de estocagem intermediária foram reduzidas da abordagem em 1 fase para a nova abordagem proposta.

Tabela 7: Comparação das quantidades planejadas para o cenário C1 entre as abordagens em 1 fase e 3 fases

Resultado	1 Fase	3 Fases
Volume Movimentado (u.v)	2622540	2519500
Violações Físicas (u.v)	0	0
Violação Estoque Min/Max (u.v)	32163	32163
Violação Meta Min/Max (u.v)	331700	804480
Reversões (unidades)	6	3
Interfaces Proibidas (unidades)	2	5
Utilização Média (%)	38,6	31,88
Estoque Intermediário Total (u.v)	637230	556340
Degradação Total (u.v)	9671	63818

Para os demais cenários, ilustram-se através de gráficos os resultados da abordagem de planejamento em ambas abordagens estudadas. A Figura 4a compara as quantidades totais planejadas. Apesar da redução na quantidade global planejada na abordagem em 3 Fases, a demanda é igualmente atendida. Na Figura 4b são apresentadas as taxas médias de utilização planejadas dos 30 dutos para ambas abordagens de Planejamento.

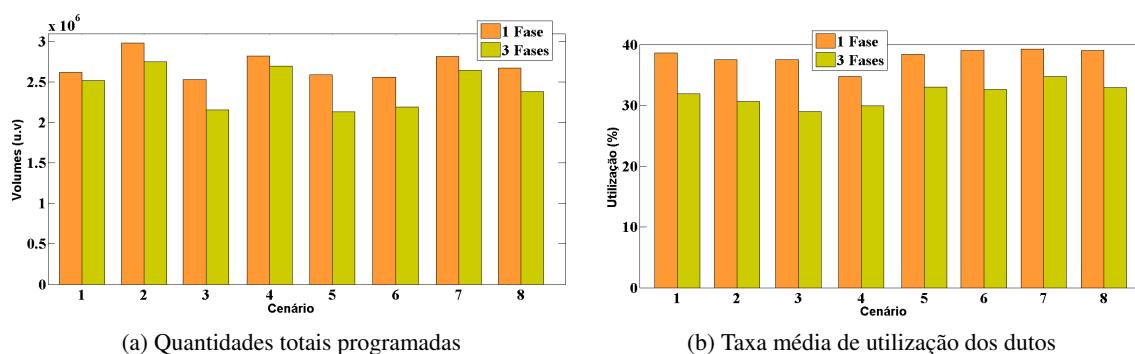


Figura 4: Volumes movimentados por cenário para ambas as abordagens: 1 Fase e 3 Fases

Exibem-se na Figura 5a a quantidade mínima de operações de reversões que ocorrerão durante o *scheduling*. Reduziu-se consideravelmente esse número na abordagem em 3 Fases (de 30%



a 60%). Com a alta prioridade de minimização do número de reversões e a redistribuição dos volumes por menos dutos, diminuindo a taxa média de utilização, elevou-se o número de possibilidades de interfaces proibidas na abordagem em 3 Fases (Figura 5b).

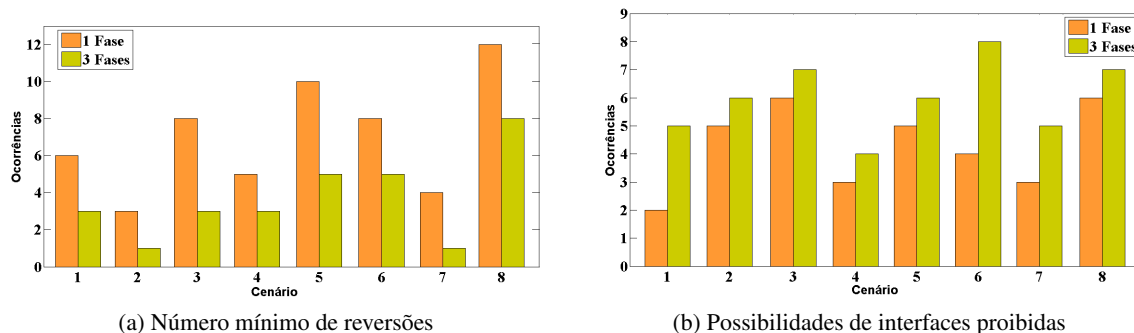


Figura 5: Números de operações indesejadas por cenário para ambas as abordagens: 1 Fase e 3 Fases

Apresentam-se na Figura 6a a comparação das quantidades totais planejadas para degradação entre ambas abordagens. Ocorreram, no geral, pequenos aumentos na abordagem em 3 Fases, entretanto, para o Cenário 4, em que uma quantidade muito elevada era degradada houve diminuição. A Figura 6b apresenta as quantidades totais de estocagem intermediária para ambas as abordagens. Observa-se a diminuição considerável dessa operação na abordagem em 3 Fases.

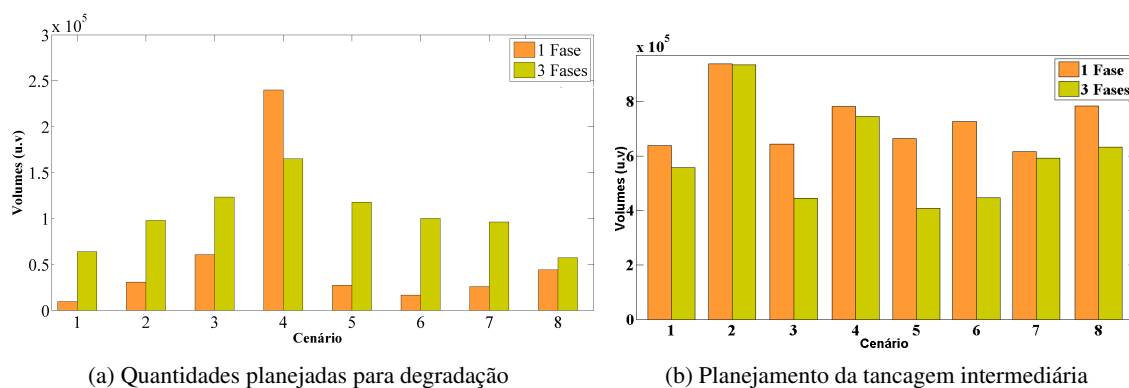


Figura 6: Degradações e tancagem intermediária por cenário para ambas as abordagens: 1 Fase e 3 Fases

5. Conclusão

Uma abordagem de solução em fases para o planejamento otimizado da rede de transporte de derivados leves de petróleo (Figura 2) foi o objeto de estudo do presente artigo. A hierarquização em 3 modelos possibilitou avaliações nos pesos referentes a prioridades operacionais de forma mais sensível, levando a menos operações de reversão, por exemplo. Em poucos segundos determinam-se os volumes totais, assim como os degradados, que serão movimentados durante o horizonte de programação e suas rotas de transporte, com o referido aumento no controle nas operações propostas em [Schnirmann et al., 2016]. Essas informações são de suma importância para a tomada de decisões da rede. 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.

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.



Referências

- Boschetto, S. N., Magatão, L., Brondani, W., Neves-Jr, F., Arruda, L. V. R., Barbosa-Póvoa, A. P. F. D., e Relvas, S. (2010). An operational scheduling model to product distribution through a pipeline network. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49:5661–5682.
- Cafaro, D. C. e Cerdá, J. (2004). Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete milp formulation. *Computers & Chemical Engineering*, 28:2053–2068.
- 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, L., Arruda, L., e Neves-Jr, F. (2011). A combined clp-milp approach for scheduling commodities in a pipeline. *Journal of Scheduling*, 14:57–87.
- 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., Magatão, L., Magatão, S. N. B., Neves-Jr, F., e Arruda, L. V. R. (2017). Collaborative approach based on heuristic algorithm and milp model to assignment and sequencing of oil derivative batches in pipeline networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56: 2492–2514.
- Rejowski, R. e Pinto, J. M. (2003). Scheduling of a multiproduct pipeline system. *Computers & Chemical Engineering*, 27:1229–1246.
- Reklaitis, G. (1992). Overview of scheduling and planning of batchprocess operations. In *Proceedings of the NATO*, p. 660–675. Proceedings of the NATO.
- Relvas, S., Boschetto, S. N., Barbosa-Póvoa, A. P. F. D., e Neves-Jr, F. (2013). Integrated scheduling and inventory management of an oil product distribution system. *Omega*, 41:955–968.
- Relvas, S., Matos, H. A., Barbosa-Póvoa, A. P. F. D., Fialho, J., e Pinheiro, A. S. (2006). Pipeline scheduling and inventory management of a multiproduct distribution oil system. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47:7841–7855.
- Schnirmann, G., Magatão, S. N. B., Magatão, L., Neves-Jr, F., e Arruda, L. V. R. (2016). Modelo plim de planejamento em uma rede dutoviária real de distribuição de derivados leves de petróleo. *Anais do XLVIII SBPO*.
- You, F. e Grossmann, I. E. (2008). Mixed-integer nonlinear programming models and algorithms for large-scale supply chain design with stochastic inventory management. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47:7802–7817.