

**Análise de investimentos na cadeia de suprimentos downstream da indústria petrolífera:
proposta de um modelo de programação linear inteira mista**

Luiza Fiorencio

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio
Rua Marquês São Vicente, 225, Gávea Rio de Janeiro - RJ, 22451-041
luiza.fiorencio@labnexo.com

Paula Nunes

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio
paula.nunes@labnexo.com

Fabrcio Oliveira

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio
fabricio.oliveira@labnexo.com

Silvio Hamacher

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio
hamacher@puc-rio.br

RESUMO

A indústria de petróleo brasileira ganhou novo dinamismo com a descoberta de grandes reservas petrolíferas em águas profundas. Entre 2011-2015 são previstos inúmeros investimentos na cadeia produtiva de petróleo para suportar a dimensão desta nova operação. Diante deste contexto, o apoio à tomada de decisões de investimento na cadeia logística downstream da indústria de petróleo ganha importância e o uso de um instrumento de análise que comporte sua complexidade passa a ser fundamental. Dessa forma, este artigo propõe um modelo de programação linear inteira mista (PLIM) desenvolvido para permitir a avaliação de alternativas de investimento na rede logística, sejam elas em expansão das capacidades de transporte, de movimentação ou de estocagem. Estas funcionalidades do modelo foram avaliadas em um estudo de caso que avalia sinergias nos projetos de ampliação da capacidade de movimentação em um terminal marítimo e de transporte do duto que liga este a uma base de distribuição.

PALAVRAS CHAVE. Otimização, Projeto da Cadeia de Suprimentos, Petróleo.

P&G, L&T

ABSTRACT

The Brazilian oil industry has gained new momentum with the discovery of large oil reserves in deep waters. Between 2011 and 2015 numerous investments in the oil production chain are expected in order to support the scale of this operation. Given this context, investment decisions in the oil industry downstream supply chain gain importance and the use of an analytic tool that encompasses its complexity becomes crucial. Thus, this paper proposes a mixed linear programming model (MILP) developed to allow evaluation of different investment alternatives in the logistics network, whether they approach expanding the capacity of transport, handling or storage. Some features of the model were evaluated through a case study that evaluates the synergies in two projects: the first one to expand the berthing capacity of vessels in a marine terminal and the second to increase the transport capacity of the pipeline linking it to a distribution center.

KEYWORDS. Optimization. Supply chain design, Oil.

1. Introdução

A indústria de petróleo no Brasil começou a se desenvolver na década de 50 com a criação da estatal Petrobras. Desde então esta indústria passou por diversas mudanças e começou a ter um novo dinamismo com a abertura do mercado de exploração e produção, através da Lei nº 9.478, no final da década de 90. A recente descoberta de grandes reservas petrolíferas em águas ultra profundas disparou uma corrida por novas tecnologias e infraestrutura que suportem a dimensão desta nova operação. No horizonte 2011-2015 somente a Petrobras possui uma carteira de investimentos de 224,7 bilhões de dólares na sua cadeia produtiva (IBP, 2011).

Do ponto de vista econômico, a indústria petrolífera se caracteriza pela elevada intensidade de capital, ou seja, exige um grande empenho financeiro durante um longo período de tempo para colocar em marcha sua cadeia produtiva e obter retorno financeiro. Além disso, seus investimentos em infraestrutura possuem baixa liquidez, uma vez que não podem ser utilizados para outros fins.

No Brasil, a indústria do petróleo permanece com uma estrutura verticalizada, sendo uma mesma empresa responsável pela exploração, produção e refino de petróleo, comercialização e distribuição de derivados. Tal característica é justificada pelas significativas economias de escala, principalmente nas atividades de refino e transporte, e pelo fato de ser uma atividade que envolve muitas incertezas (geológicas, políticas, tecnológicas) e por consequências muitos riscos (Braga, 2004).

Ademais, segundo Tavares (2005), as significativas economias de escala associadas à interdependência das operações na indústria de petróleo fazem com que as empresas estudem e planejem seus investimentos considerando o negócio petrolífero como um todo. Isto obriga a levar em consideração uma cadeia de suprimentos que pode possuir centenas de nós, entre plataformas de petróleo, portos, refinarias, bases de distribuição, e milhares de ligações entre eles.

Diante deste contexto, o apoio à tomada de decisões de investimento na cadeia logística da indústria de petróleo e derivados ganha particular importância e o uso de uma ferramenta que comporte sua complexidade passa a ser fundamental.

A indústria de petróleo tem investido considerável esforço no desenvolvimento de sistemas de apoio a decisão usando programação matemática aplicada à diversos níveis de planejamento da exploração e produção, suprimento de petróleo, refino e distribuição de derivados.

Modelos de exploração e produção de petróleo contemplam decisões, tais como a escolha da reservas a serem desenvolvidas e quais campos devem ser explorado, além de decisões operacionais relacionadas à instalação de plataformas e definição de capacidades de produção. Iyer et al. (1998) propuseram modelo baseado em programação linear inteira-mista (PLIM) multi-período para o planejamento e programação de investimentos em infraestrutura e operação de campos de petróleo *offshore*. Van den Heever et al. (2000) exibem a formulação de um modelo PLIM capaz de lidar com complexas regras econômicas, como impostos, tarifas e royalty, no planejamento da infraestrutura de campos *offshore*, apresentado substanciais melhoras no valor presente líquido dos projetos avaliados.

Modelos matemáticos associados ao suprimento de petróleo em geral consideram o transporte de petróleo por petroleiros e dutos do campo até um terminal ou refinaria, além do armazenamento em tanques que em muitos casos inclui o problema de mistura (*blending*) de petróleos. Más e Pinto (2003) desenvolveram um modelo PLIM para o problema de *scheduling* de petróleo num complexo de distribuição composto por portos, tanques e dutos. Mouret et. al (2011) mostram a aplicação de Decomposição Lagrangeana para a solução do problema de programação do recebimento de suprimento de petróleo coordenado com o planejamento do abastecimento de refinarias.

Os modelos de programação matemática voltados para o processo de refino apoiam decisões de planejamento e programação da produção e têm como objetivo apoiar a tomada de decisão sobre a carga para a alimentação de cada unidade de processo, composições de *blending* e modo operacional da refinaria. Moro, Zanin e Pinto (1998) formularam um modelo não-linear

(PNL) para o planejamento da produção em uma refinaria. O modelo é aplicado ao caso particular da produção de diesel com o objetivo de maximizar o lucro da refinaria garantindo as especificações do derivado. Pinto, Joly e Moro (2000) desenvolveram um modelo não linear (NL) capaz de representar uma refinaria geral e de implementar processos não lineares bem como relações de *blending*. Moro (2003) avalia o uso de modelos matemáticos na resolução de problemas de otimização e de planejamento do refino do petróleo. O autor destaca a importância do uso da programação matemática, notadamente inteira e não linear, para a resolução deste tipo de problema.

O modelo apresentado por Gothe-Lundgren et al. (2002) decide sobre o modo operacional de cada unidade ao longo do tempo, de forma a atender a demanda ao menor custo levando em conta a capacidade de armazenamento disponível na refinaria. Outros exemplos podem ser encontrados em Pinto e Moro (2000), Li et al. (2004) e Neiro e Pinto (2005).

A programação matemática aplicada a problemas de distribuição de derivados otimiza o transporte de produtos finais até os centros de demanda, podendo considerar armazenagem e *blending* de derivados nos tanques. Sear (1993) apresentou um modelo de programação linear (PL) para resolver o problema de transporte de derivados das refinarias até as zonas de consumo passando por terminais intermediários incluindo também a alternativa de importação de derivados para suprir a demanda. Rejowski e Pinto (2004) formularam um modelo de programação linear mista (PLIM) para resolver um problema mais particular da distribuição de derivados: o *scheduling* do transporte de derivados da refinaria para vários tanques via duto. Jia e Ierapetritou (2003) propuseram um modelo de programação linear mista (PLIM) para o *blending* de gasolina e *scheduling* dos pedidos que devem deixar a refinaria. Neiro e Pinto (2004) apresentam um modelo de programação não linear mista para o planejamento operacional do estoque, refino e transporte. Um estudo de caso destes autores considera duas redes de dutos, quatro refinarias e cinco terminais, demonstrando a aplicabilidade do modelo.

O foco principal dos artigos anteriormente mencionados é voltado para a análise segmentada da cadeia de suprimentos de petróleo com adequado nível de precisão. Apesar de tais trabalhos considerarem questões referentes ao suprimento, estoque, refino e distribuição, poucos são os que tratam da cadeia de forma integrada, considerando-a desde os produtores até as bases primárias e secundárias. Além disso, no que se refere a consideração de investimentos em oleodutos, bases de distribuição e terminais marítimos, pode-se observar que tais aspectos são modelados de forma simplificada nos trabalhos citados. É possível observar, portanto, que existe uma lacuna no que se refere a otimização da operação logística da indústria de petróleo e derivados de forma mais abrangente, especialmente se considerada a dependência inerente entre a continuidade do processo de refino e a capacidade de distribuição da cadeia.

Com o intuito de preencher tal lacuna, este artigo propõe um modelo matemático baseado em PLIM para a otimização da distribuição de petróleo e derivados, o qual considera questões de ordem tática (fluxo de produtos, níveis de estoque, níveis de produção, entre outros) de forma a avaliar decisões de cunho estratégico (i.e., investimentos em infraestrutura logística).

Este artigo se encontra organizado da seguinte forma: a seção 2 descreve o problema a ser tratado, seguida pela formulação matemática do modelo na seção 3. Em seguida é apresentado um estudo de caso na seção 4 e finalmente o artigo se encerra com as conclusões dos autores na seção 5.

2. Descrição do Problema

O downstream da indústria petrolífera consiste na cadeia de transporte, distribuição e comercialização de derivados de petróleo, a partir da refinaria ou de portos internacionais de importação até os pontos de consumo. Ela é composta por: bases de distribuição, terminais aquaviários, terminais terrestres, pontos de consumo e dutos.

O planejamento desta cadeia abrange questões que permeiam tanto o nível estratégico quanto o nível tático. São tratadas as questões estratégicas relativas à cadeia de suprimentos, ou seja, o projeto de rede. Este visa determinar a localização e as capacidades de movimentação e de

armazenagem das bases de distribuição e dos terminais. Os modais de ligação destes elos até os pontos de consumo, principalmente dutoviário e ferroviário, também devem ser estudados para que haja capacidade suficiente de escoamento dos produtos. Posteriormente, no âmbito tático do planejamento, são tomadas decisões que minimizem os custos desta cadeia tal como ela foi projetada. Surge então a questão de alocação de fluxos, ou seja, que refinaria atende a que ponto de consumo, através de que modais e passando por quais elos intermediários. Da mesma forma, deve-se avaliar a necessidade de importar e a oportunidade de exportar derivados.

Posto isto, o modelo proposto visa auxiliar o planejamento estratégico de investimentos na cadeia downstream de petróleo através da realização de estudos que avaliam diversas alternativas de investimento na infraestrutura logística, sejam elas de transporte ou de armazenagem.

Para apoiar a tomada de decisão de investimento na infraestrutura logística, o modelo deve refletir a realidade desta indústria, incorporando suas regras de negócio. Por essa razão, a modelagem matemática considera certas especificidades da cadeia logística da indústria de petróleo. Dentre elas pode-se citar a possibilidade de um arco ser invertível (origem passar a ser destino e vice-versa), o impacto da viscosidade e da mistura dos produtos transportados em um duto no cálculo da sua vazão, curvas de sobreestadia que penalizam o fluxo de produtos através dos terminais, limites de importação e exportação de petróleo e derivados. Conforme é exposto na introdução, poucos trabalhos focam no projeto da cadeia logística de petróleo e derivados e por isso não detalham suficientemente sua rede de distribuição.

A formulação matemática do modelo é apresentada na próxima seção.

3. Modelo Matemático

A descrição do modelo matemático inicia-se com a apresentação das entidades (conjuntos e subconjuntos) e variáveis do modelo na Tabela 1. Faz-se necessário esclarecer certas entidades: a entidade “Frente” corresponde aos portos internacionais de comercialização de petróleo e derivados; “Fonte” corresponde às plataformas nacionais e internacionais de exploração e produção de petróleo; a entidade “Arco projeto” representa projeto de investimento em ampliação ou implantação de ligações de transporte, “Local projeto” corresponde a um projeto de investimento em um local, seja em tancagem, capacidade de bombeio, capacidade de atracação de navios (somente em terminais) ou em eficiência operacional.

Em seguida, a Tabela 2 descreve os parâmetros do modelo (dados de entrada).

Entidades		Variáveis Inteiras	
Conjunto de locais	$i, j, l, l_1, l_2 \in \mathcal{L}$	Decisão de realizar o investimento no local projeto l no período t	w_l^t
Conjunto de modais de transporte	$m \in \mathcal{M}$	Decisão de realizar o investimento no arco projeto a no período t	y_a^t
Conjunto de produtos	$p, p_1, p_2 \in \mathcal{P}$	Decisão de realizar o investimento em armazenagem para o grupo de produtos g no local projeto l no período t	$b_{l,g}^t$
Conjunto de faixas de sobreestadia	$s \in \mathcal{S}$	Variáveis Contínuas	
Conjunto de períodos	$t \in \mathcal{T}$	Volume exportado do produto p para o local l no período t	$e_{l,p}^t$
Conjunto de grupo de produtos	$g = \{p_1, \dots, p_k\} \in \mathcal{P}^k \in \mathcal{G}$	Fluxo de produto p movimentado na faixa de sobreestadia s no local l no período t	$f_{s,l}^t$
Conjunto de arcos	$a = \{(i, j, g, m) \in \mathcal{L} \times \mathcal{L} \times \mathcal{G} \times \mathcal{M}\} \in \mathcal{A}$	Fluxo de produto p na faixa de sobreestadia s no local projeto l no período t	$f k_{s,l}^t$
Subconjunto de arcos invertíveis	$A_I \subseteq \mathcal{A}$	Volume de produto p fornecido ao local l no período t	$h_{l,p}^t$
Subconjunto de arcos projeto	$A_K \subseteq \mathcal{A}$	Volume importado do produto p do local l no período t	$i_{l,p}^t$
Subconjunto de bases	$L_B \subseteq \mathcal{L}$	Volume ofertado do produto p no local l no período t	$o_{l,p}^t$
Subconjunto de frentes	$L_E \subseteq \mathcal{L}$	Estoque do produto p no local l no período t	$v_{l,p}^t$
Subconjunto de fontes	$L_F \subseteq \mathcal{L}$	Fluxo direto do produto p no arco a no período t	$\bar{x}_{a,p}^t$
Subconjuntos de refinarias	$L_R \subseteq \mathcal{L}$	Fluxo inverso do produto p no arco a no período t	$\bar{x}_{a,p}^t$
Subconjunto de terminais	$L_S \subseteq \mathcal{L}$	Volume movimentado no local l do produto p pertencente ao grupo de produtos g no período t	$z_{l,g,p}^t$
Subconjunto de locais projeto	$L_K \subseteq \mathcal{L}$	Volume movimentado no local projeto l do produto p pertencente ao grupo de produtos g no período t	$z k_{l,g,p}^t$
Subconjunto de modais marítimos	$M_M \subseteq \mathcal{M}$		
Subconjunto de petróleos	$P_P \subseteq \mathcal{P}$		
Subconjuntos de derivados	$P_D \subseteq \mathcal{P}$		

Tabela 1 - Entidades e variáveis do modelo.

Parâmetros			
Investimento previsto no local projeto l em tancagem ou giro do grupo de produtos g no período t	$B^t_{l,g}$	Limite de movimentação na faixa de sobreestadia s no local projeto l no período t	$FSK^t_{s,l}$
Custo unitário de frete direto no arco a no período t	\overline{CF}^t_a	Fator de viscosidade do produto p no arco a	$FV_{a,p}$
Custo unitário de frete inverso no arco a no período t	\overline{CF}^t_a	Giro no local l para o grupo de produtos g no período t	$GR^t_{l,g}$
Custo de imobilização do grupo de produtos g	CI_g	Giro no local projeto l para o grupo de produtos g no período t	$GRK^t_{l,g}$
Custo de investimento no arco a no período t	CKA^t_a	Limite de exportação do produto p para o local l no período t	$LE^t_{l,p}$
Custo de investimento no local l no período t	CKL^t_l	Limite de importação do produto p do local l no período t	$LI^t_{l,p}$
Custo de operação do local l no período t	CO^t_l	Limite de oferta do produto p no local l no período t	$OI^t_{l,p}$
Custo de operação do local projeto l no período t	COK^t_l	Preço de atendimento à demanda pelo produto p no local l no período t	$PD^t_{l,p}$
Custo de sobreestadia na faixa de sobreestadia s no local l no período t	$CS^t_{s,l}$	Preço de exportação do produto p no local l no período t	$PE^t_{l,p}$
Custo de sobreestadia na faixa de sobreestadia s no local projeto l no período t	$CSK^t_{s,l}$	Preço de importação do produto p no local l no período t	$PI^t_{l,p}$
Demanda no local l pelo produto p no período t	$D^t_{l,p}$	Capacidade do arco atual a	Q_a
Demanda mínima no local l pelo produto p no período t	$DMIN^t_{l,p}$	Capacidade do arco projeto a	QK_a
Demanda máxima no local l pelo produto p no período t	$DMAX^t_{l,p}$	Tancagem para armazenagem do grupo de produtos g no local l	$R_{l,g}$
Fator de desconto para valor presente no período t	FD_t	Tancagem para armazenagem do grupo de produtos g no local projeto l	$RK_{l,g}$
Fator de inversão do arco a	FI_a	Estoque inicial do produto p no local l	$V^0_{l,p}$
Fator de mistura do produto p_1 com o produto p_2 no arco a	$FM^a_{p_1,p_2}$	Investimento previsto no local projeto l no período t	W^t_l
Limite de movimentação na faixa de sobreestadia s no local l no período t	$FS^t_{s,l}$	Investimento previsto no arco projeto a no período t	Y^t_a

Tabela 2 - Parâmetros do modelo.

A função objetivo do modelo adiciona todos os custos do sistema tal como listados anteriormente. Estes custos resultam da multiplicação das variáveis de quantidade pelos parâmetros de custo, garantindo a linearidade das equações. Ademais, os valores correspondentes a cada ano do horizonte de estudo são trazidos a valor presente através do fator de desconto.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar} \quad \sum_t FD_t \\
 & \times \left(\sum_a CKA^t_a y^t_a + \sum_l CKL^t_l w^t_l \right) \quad (1.1) \quad \text{Custo de investimento} \\
 & + \sum_{a,p} \overline{CF}^t_a \tilde{x}^t_{a,p} + \sum_{a,p} \overline{CF}^t_a \tilde{x}^t_{a,p} \quad (1.2) \quad \text{Custo de frete} \\
 & + \sum_{l,g,p \in g} CI_g v^t_{l,p} \quad (1.3) \quad \text{Custo de imobilização} \\
 & + \sum_{l,g,p} CO^t_l z^t_{l,g,p} + \sum_{l,g,p} COK^t_l z^t_{l,g,p} \quad (1.4) \quad \text{Custo de operação} \\
 & + \sum_{s,l} CS^t_{s,l} f^t_{s,l} + \sum_{s,l} CSK^t_{s,l} f^t_{k_{s,l}} \quad (1.5) \quad \text{Custo de sobreestadia} \\
 & - \sum_{l,p} PD^t_{l,p} h^t_{l,p} \quad (1.6) \quad \text{Receita comercial interna} \\
 & + \left(\sum_{l,p} PI^t_{l,p} i^t_{l,p} - \sum_{l,p} PE^t_{l,p} e^t_{l,p} \right) \quad (1.7) \quad \text{Lucro comercial externo}
 \end{aligned}$$

A equação (2) é a equação de balanço, que garante a conservação de fluxo de um determinado produto p em um local l e em um período t . O valor inicial da variável de estoque $v^0_{l,p}$ é igual ao parâmetro $V^0_{l,p}$.

$$\sum_{a|(j=l \wedge p \in g)} \bar{x}_{a,p}^t + \sum_{a|(i=l \wedge p \in g)} \bar{x}_{a,p}^t + o_{l,p}^t + v_{l,p}^{t-1} = \sum_{a|(i=l \wedge p \in g)} \bar{x}_{a,p}^t + \sum_{a|(j=l \wedge p \in g)} \bar{x}_{a,p}^t + h_{l,p}^t + D_{l,p}^t + v_{l,p}^t \quad (2)$$

$$\forall l \in L_B \cup L_R \cup L_S, \forall p \in \mathcal{P}, \forall t \in \mathcal{T}$$

A inequação (3) garante que o fluxo de um produto a cada período saindo de uma local do tipo “Fonte” é inferior ou igual à variável de oferta interna.

$$\sum_{a|(j=l \wedge p \in g)} \bar{x}_{a,p}^t + \sum_{a|(i=l \wedge p \in g)} \bar{x}_{a,p}^t \leq o_{l,p}^t \quad \forall l \in L_F, \forall p \in \mathcal{P}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (3)$$

A inequação (4) é responsável por limitar a variável de oferta de um produto, $o_{l,p}^t$, em cada local e a cada período. Já as inequações (5) e (6) garantem que a demanda em cada base será atendida dentro do seu intervalo de valor máximo e mínimo.

$$o_{l,p}^t \leq OI_{l,p}^t \quad \forall l \in L_F \cup L_R, \forall p \in \mathcal{P}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (4)$$

$$h_{l,p}^t \leq DMAX_{l,p}^t \quad \forall l \in L_B, \forall p \in \mathcal{P}_D, \forall t \in \mathcal{T} \quad (5)$$

$$h_{l,p}^t \geq DMIN_{l,p}^t \quad \forall l \in L_B, \forall p \in \mathcal{P}_D, \forall t \in \mathcal{T} \quad (6)$$

A inequação (7) garante que haja no máximo um investimento em cada local ao longo do horizonte de tempo. A inequação (8) garante que haja no máximo um investimento em armazenagem para um determinado grupo de produtos em um local ao longo do horizonte de tempo. A inequação (9) faz com que haja no máximo um investimento em um arco ao longo do horizonte de tempo.

$$\sum_t (w_l^t + W_l^t) \leq 1 \quad \forall l \in L_K \quad (7)$$

$$\sum_t (b_{l,g}^t + B_{l,g}^t) \leq 1 \quad \forall l \in L_K, \forall g \in \mathcal{G} \quad (8)$$

$$\sum_t (y_a^t + Y_a^t) \leq 1 \quad \forall a \in A_K \quad (9)$$

A equação (10) associa o investimento em armazenagem para um grupo de produto com o investimento em local, a cada período. Esta restrição só se aplica aos casos em que há investimento em giro e em tancagem cadastrados no local projeto.

$$w_l^t = b_{l,g}^t \quad \forall l \in L_K, \forall g \in \mathcal{G}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (10)$$

A inequação (11) restringe o fluxo de produtos em cada arco do sistema a cada período. Conforme dito anteriormente, a capacidade do arco depende do fator de viscosidade do produto e do fator de inversão do arco, no caso de o fluxo ser inverso. Por isso os valores de fluxos são corrigidos nesta equação segundo estes fatores.

$$\sum_p FV_{a,p} \left(\bar{x}_{a,p}^t + \frac{\bar{x}_{a,p}^t}{FI_a} \right) \leq Q_a \left[1 - \left(\sum_{t' \leq t} y_a^{t'} + \sum_{t' \leq t} Y_a^{t'} \right) \right] + QK_a \left(\sum_{t' \leq t} y_a^{t'} + \sum_{t' \leq t} Y_a^{t'} \right) \quad (11)$$

$$\forall a \in \mathcal{A}, \forall t \in \mathcal{T}$$

A inequação (12) restringe o estoque de produtos em cada local a cada período de acordo com a tancagem. O uso de uma variável de investimento com a dimensão grupo de produto, além das dimensões local e período, se faz necessário pois o investimento em tancagem e em giro pode

ser feito para um determinado grupo, g_1 , e não para outro grupo, g_2 . Ademais, é preciso lembrar que um mesmo produto pode pertencer a mais de um grupo de produtos.

$$\sum_{p|p \in g} v_{l,p}^t \leq R_{l,g} \left[1 - \left(\sum_{t' \leq t} b_{l,g}^{t'} + \sum_{t' \leq t} B_{l,g}^{t'} \right) \right] + RK_{l,g} \left(\sum_{t' \leq t} b_{l,g}^{t'} + \sum_{t' \leq t} B_{l,g}^{t'} \right) \quad (12)$$

$$\forall l \in L_B \cup L_S, \forall g \in \mathcal{G}, \forall t \in \mathcal{T}$$

As inequações (13), (14) e (15) restringem a movimentação de produtos em cada local a cada período de acordo com a tancagem multiplicada pelo giro anual. A equação (15) é responsável por associar os fluxos de um determinado produto nos arcos com origem ou destino no local l às variáveis de movimentação, $z_{l,g,p}^t$ ou $zk_{l,g,p}^t$.

$$\sum_{p|p \in g} z_{l,g,p}^t \leq GR_{l,g}^t R_{l,g} \left[1 - \left(\sum_{t' \leq t} b_{l,g}^{t'} + \sum_{t' \leq t} B_{l,g}^{t'} \right) \right] \quad (13)$$

$$\forall l \in L_B \cup L_S, \forall g \in \mathcal{G}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_{p|p \in g} zk_{l,g,p}^t \leq GRK_{l,g}^t RK_{l,g} \left(\sum_{t' \leq t} b_{l,g}^{t'} + \sum_{t' \leq t} B_{l,g}^{t'} \right) \quad (14)$$

$$\forall l \in L_K, \forall g \in \mathcal{G}, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_{g|p \in g} (z_{l_1,g,p}^t + zk_{l_2,g,p}^t) = \sum_{a|j=l_1} (\tilde{x}_{a,p}^t + \hat{x}_{a,p}^t) + \sum_{a|i=l_1} (\tilde{x}_{a,p}^t + \hat{x}_{a,p}^t) \quad (15)$$

$$\forall l_1 \in L_B \cup L_S, \forall l_2 \in L_K, \forall p \in \mathcal{P}, \forall t \in \mathcal{T}$$

A equação (16) e a inequação (17) restringem a exportação de produtos para cada frente, a cada período. Já a equação (18) e a inequação (19) restringem a importação de produtos de cada frente, a cada período.

$$\sum_{a|i=l} \tilde{x}_{a,p}^t + \sum_{a|j=l} \hat{x}_{a,p}^t = e_{l,p}^t \quad \forall l \in L_E, \forall p \in \mathcal{P}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (16)$$

$$e_{l,p}^t \leq LE_{l,p}^t \quad \forall l \in L_E, \forall p \in \mathcal{P}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (17)$$

$$\sum_{a|j=l} \tilde{x}_{a,p}^t + \sum_{a|i=l} \hat{x}_{a,p}^t = i_{l,p}^t \quad \forall l \in L_E, \forall p \in \mathcal{P}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (18)$$

$$i_{l,p}^t \leq LI_{l,p}^t \quad \forall l \in L_E, \forall p \in \mathcal{P}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (19)$$

As inequações (20), (21) e a equação (22) restringem a movimentação de produtos em cada faixa de sobreestadia, em cada terminal, a cada período.

$$f_{s,l}^t \leq FS_{s,l}^t \left[1 - \left(\sum_{t' \leq t} w_l^{t'} + \sum_{t' \leq t} W_l^{t'} \right) \right] \quad (20)$$

$$\forall s \in \mathcal{S}, \forall l \in L_S, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$fk_{s,l}^t \leq FSK_{s,l}^t \left(\sum_{t' \leq t} w_l^{t'} + \sum_{t' \leq t} W_l^{t'} \right) \quad (21)$$

$$\forall s \in \mathcal{S}, \forall l \in L_K, \forall t \in \mathcal{T}$$

$$\sum_s f_{s,l_1}^t + \sum_s fk_{s,l_2}^t = \sum_{a|(i=l_1 \wedge m \in M_M), p} (\tilde{x}_{a,p}^t + \hat{x}_{a,p}^t) + \sum_{a|(j=l_1 \wedge m \in M_M), p} (\tilde{x}_{a,p}^t + \hat{x}_{a,p}^t) \quad (22)$$

$$\forall l_1 \in L_S, \forall l_2 \in L_K, \forall t \in \mathcal{T}$$

As inequações (23) e (24) associam o fluxo de dois produtos que precisam ser misturados para ser transportados em um duto. Isto significa que o produto p_1 só pode ser transportado no

arco a , no período t , em uma quantidade inferior ou igual ao do fluxo do produto p_2 dividido pelo fator de mistura dos dois produtos neste arco.

$$\tilde{x}_{a,p_1}^t \leq \sum_{p_2} \frac{\tilde{x}_{a,p_2}^t}{FM_{p_1,p_2}^a} \quad \forall a \in \mathcal{A}, \forall p_1 \in \mathcal{P}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (23)$$

$$\tilde{x}_{a,p_1}^t \leq \sum_{p_2} \frac{\tilde{x}_{a,p_2}^t}{FM_{p_1,p_2}^a} \quad \forall a \in A_I, \forall p_1 \in \mathcal{P}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (24)$$

A inequação (25) garante que o investimento no arco a_2 só pode ocorrer uma vez que o investimento no arco a_1 tenha sido realizado, ou seja, faz o sequenciamento dos investimentos. Esta restrição só se aplica aos arcos projetos que possuem um parâmetro de sequenciamento cadastrado. Esta equação visa representar a dependência do investimento em aumento da capacidade de transporte em trechos de um mesmo duto.

$$\sum_{(t'|t' \leq t)} y_{a_1}^{t'} \geq y_{a_2}^t \quad \forall a_1, a_2 \in A_K, \forall t \in \mathcal{T} \quad (25)$$

4. Estudo de Caso

Este estudo de caso pretende demonstrar a utilidade do modelo na avaliação da interdependência de diferentes investimentos na infraestrutura logística, mais especificamente nas sinergias de investimento no aumento da capacidade de movimentação de um terminal marítimo e de um duto. A ampliação da capacidade de movimentação no terminal que será avaliada corresponde ao aumento do número de berços de atracação, o que permite o recebimento de um maior número de embarcações, a redução da fila de espera e, por conseguinte, do custo de sobreestadia no terminal.

É importante ressaltar que o estudo foi realizado com dados reais, porém, por questões de confidencialidade, os valores aqui apresentados foram modificados.

Para realizar este estudo, serão construídos cenários nos quais há cadastrado um local projeto associado ao terminal, cujo custo de investimento difere em cada um dos cenários. Este local projeto possui maiores limites de sobreestadia, $FSK_{s,1}^t$, a menores custos unitários, $CSK_{s,1}^t$, traduzindo assim a situação descrita no parágrafo anterior. Ademais, em cada um dos cenários haverá ou não a possibilidade de também se investir na ampliação do duto. Dessa forma será possível obter duas curvas de sensibilidade do VPL ao valor do investimento no terminal e assim avaliar o impacto da ampliação do duto naquela do terminal.

O sistema que será alvo deste estudo compreende uma refinaria, uma base de distribuição, um terminal marítimo e um duto que liga estes dois últimos elos, porém toda a rede logística de distribuição de petróleo e derivados é considerada. O horizonte de planejamento é de dezoito anos (2013 a 2030) e a discretização anual. A demanda da base por diesel é apenas parcialmente atendida pela refinaria local. Por consequência é necessário trazer este produto de outras regiões do país através dos diversos modais. O terminal marítimo atua, então, como elo intermediário para parte do abastecimento de derivados da base, principalmente de diesel.

Os produtos trazidos pelo modal marítimo até o terminal são transportados para a base através do duto, que pode operar tanto no sentido base-terminal (sentido direto), quanto no sentido terminal-base (sentido inverso). Ao operar no sentido inverso, existe uma queda na capacidade de transporte, sendo esta corrigida por um fator de inversão.

Para avaliar a viabilidade do investimento no terminal serão criados cenários com diferentes valores de custo de investimento no terminal para duas situações: com e sem a possibilidade de investir em aumento da capacidade do duto. Nos cenários em que haverá a possibilidade de investir no duto, este apresentará sempre o mesmo custo de investimento.

A análise deste estudo de caso se inicia com a interpretação dos resultados do cenário base, que corresponde à situação em que nenhum investimento em aumento de capacidade é realizado, tanto no terminal, quanto no duto. Neste cenário observa-se que o duto opera integralmente no sentido inverso (Terminal-Base) e no limite de sua capacidade. Isto significa que, caso haja investimento na ampliação da capacidade de movimentação, qualquer quantidade adicional de derivados trazida até o terminal não poderá ser transportada para a base pelo duto e sim pelo modal rodoviário, significativamente mais caro. Por consequência, os ganhos advindos da ampliação do terminal são menores quando não é possível utilizar o duto, reduzindo a atratividade deste investimento.

A análise do estudo de caso prossegue com a apresentação dos resultados dos cenários com investimento.

Nos cenários em que se varia o custo de investimento no terminal sem a possibilidade de se investir na ampliação do duto, observa-se que até o valor de aproximadamente \$80 milhões, o investimento no terminal é viável e ocorre no primeiro ano do horizonte de estudo, 2013. A partir de um custo de investimento de aproximadamente \$100 milhões, a ampliação do terminal não traz mais retornos nos primeiros anos e por isso ela ocorre somente em 2028. Finalmente, o valor limite para que o investimento seja financeiramente viável é de aproximadamente \$115 milhões.

Nos cenários em que se varia o custo de investimento no terminal com a possibilidade de da ampliação do duto, observa-se que o período de investimento no terminal é postergado ano a ano, à medida que seu custo de investimento cresce – até um custo de cerca de \$145 milhões o investimento ocorre em 2013, a \$150 milhões ele ocorre em 2015, a \$2,35 bilhões ele ocorre em 2030. Também se nota que o investimento no aumento de capacidade do duto ocorre sempre em 2015 e independe do investimento no terminal ocorrer ou não. Finalmente, é importante ressaltar que o investimento no terminal é viável até um custo limite de aproximadamente \$2,37 bilhões, ou seja, 20,6 vezes o valor do investimento no terminal na situação em que não se pode investir no duto. Isto significa que a rentabilidade do investimento no terminal é significativamente aumentada havendo a opção de também se investir na ampliação do duto.

A movimentação em três cenários com diferentes configurações de investimento é apresentada no Gráfico 1. No cenário com investimento no terminal em 2013 e sem ampliação do duto, há um aumento do fluxo no terminal, em relação ao cenário base, nos dois primeiros anos do horizonte de estudo, porém nos anos subsequentes o fluxo permanece inalterado. Já no cenário com investimento no terminal em 2013 e ampliação do duto, a movimentação no terminal aumenta significativamente a partir de 2015, mostrando que o aumento desta passa a ser financeiramente atrativo apenas com a ampliação da capacidade de transporte do duto.

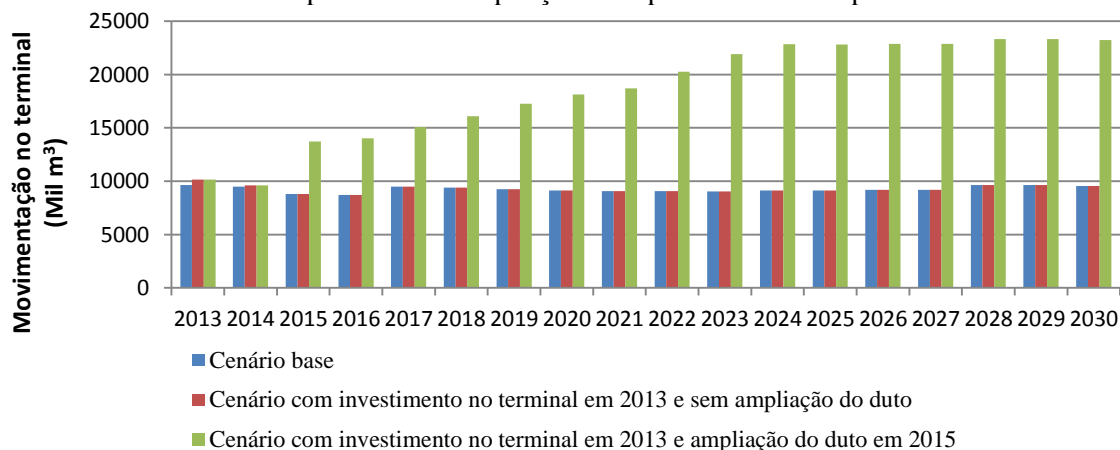


Gráfico 1 - Movimentação no terminal

No cenário sem aumento da capacidade do duto, apesar de a movimentação no terminal não crescer significativamente com sua ampliação, o custo médio de sobreestadia por m³ movimentado cai, como se pode verificar no Gráfico 2, justificando o investimento no terminal.

Já no cenário com aumento da capacidade do duto, o custo médio de sobreestadia por m^3 cai, no entanto é maior do que este custo nos cenários sem o investimento no duto. Tal fato se justifica pelo aumento na movimentação no terminal, exigindo o uso de mais faixas de sobreestadia. Pode-se concluir assim que, neste cenário, o investimento no terminal é motivado pelo tanto pelo aumento da movimentação nele quanto pela queda do custo médio de sobreestadia por m^3 , ao contrário do cenários anterior em que o investimento no terminal é motivado apenas pela queda do custo médio de sobreestadia por m^3 , uma vez que não há aumento relevante da movimentação.

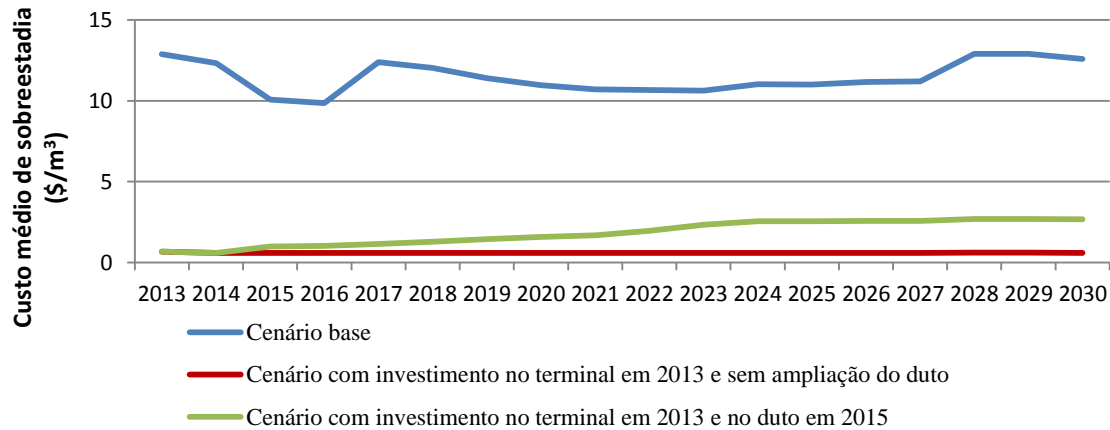


Gráfico 2 - Custo médio de sobreestadia (\$ por m^3).

O gráfico de sensibilidade do VPL ao custo de investimento no terminal é apresentado abaixo. Nota-se que a inclinação das curvas diminui sempre que o ano em que ocorre o investimento no terminal avança. Isto se explica pelo fato de que quanto mais tarde ocorre o investimento no terminal menores serão os ganhos com este.

Finalmente, observa-se que a curva de VPL não atinge o valor zero no cenário com ampliação do duto pois mesmo não ocorrendo o investimento no terminal, o investimento no duto é realizado e acarreta é um VPL de \$144 milhões para o sistema.

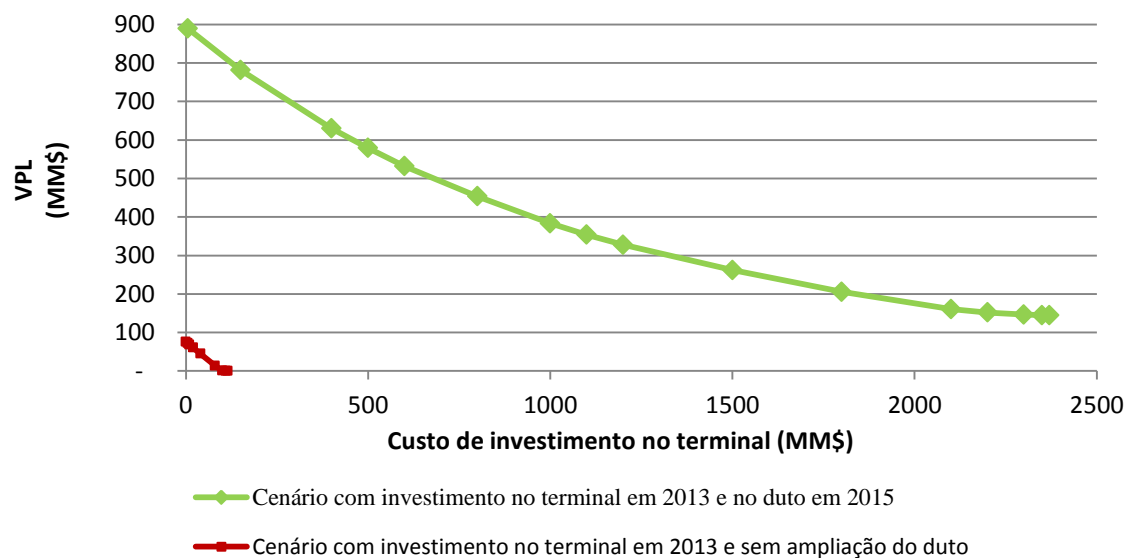


Gráfico 3- Gráfico de sensibilidade do VPL ao custo de investimento dos cenários com a possibilidade de investir no duto.

A partir deste estudo conclui-se que há importantes sinergias na ampliação do terminal e do duto. O ganho em VPL aumenta significativamente ao combinar ambos os investimentos.

5. Conclusões

Neste artigo foi apresentado um modelo de programação matemática para o planejamento estratégico da cadeia logística de petróleo e derivados. Também foi apresentado um estudo de caso de aplicação deste modelo, mostrando as sinergias na ampliação do terminal e do duto. Todavia, o modelo pode ser utilizado em outras análises, como a de dois projetos concorrentes em um mesmo arco ou local e a de projetos de aumento de tancagem ou de aumento de giro.

Uma possível extensão do modelo consiste na incorporação de limites de investimentos realizados anualmente e da incerteza em parâmetros do modelo, como por exemplo a variação da demanda de derivados.

Referências

- Braga, V.** (2004), A logística como um diferencial na indústria de petróleo: o caso do *downstream* brasileiro. BNDES.
- Göthe-Lundgren, M., T. Lundgren, J. e A. Persson, J.** (2002), An optimization model for refinery production scheduling. *International Journal of Production Economics*, v.78, n.3, p.255-270.
- IBP. **Instituto Brasileiro do Petróleo.** Disponível em <http://www.ibp.org.br/>. Acessado em Dezembro de 2011.
- Iyer, R., Grossmann, I., Vasantharajan, S. e Cullick, A.** (1998), Optimal planning and scheduling of offshore oil field infrastructure investment and operations. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v.37, p.1380–1397.
- Jia, Z. e Ierapetritou, M.** (2003), Mixed-Integer Linear Programming Model for Gasoline Blending and Distribution Scheduling. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v.42, n.4, p.825-835.
- Li, W., Hui, C., Li, P. e Li, A.** (2004), Refinery planning under uncertainty. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v.43, n.21, p.6742-6755.
- Más, R. e Pinto, J.** (2003), A Mixed-Integer Optimization Strategy for Oil Supply in Distribution Complexes. *Optimization and Engineering*, v.4, n.1, p.23-64.
- Moro, L. F. L.** (2003), Process Technology in the Petroleum Refining Industry – current situation and future trends – Computers and Chemical Engineering, v. 27, n.8-15, p. 1303-1305.
- Moro, L., Zanin, A. e Pinto, J.** (1998), A planning model for refinery diesel production. *Computers and Chemical Engineering*, v.22, p.1039-1042.
- Mouret, S., Grossmann, I. E., Pestiaux, P.** (2011), A new Lagrangian decomposition approach applied to the integration of refinery planning and crude-oil scheduling. *Computers and Chemical Engineering*, v.35, p.2750-2766.
- Neiro, S. e Pinto, J.** (2004), A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains. *Computers and Chemical Engineering*, v.28, n.6-7, p.871-896.
- Neiro, S. e Pinto, J.** (2005), Multiperiod Optimization for Production Planning of Petroleum Refineries. *Chemical Engineering Communications*, v.192, n.1, p.62-88.
- Pinto, J. e Moro, L.** (2000), A planning model for petroleum refineries. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol.17 n.4-7 São Paulo.
- Pinto, J., Joly, M. e Moro, L.** (2000), Planning and scheduling models for refinery operations. *Computers and Chemical Engineering*, v.24, n.9-10, p.2259-2276.
- Rejowski, R. e Pinto, J.** (2004), Efficient MILP formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling. *Computers and Chemical Engineering*, v.28, n.8, p.1511-1528.
- Sear, T.** (1993), Logistics planning in the downstream oil industry. *Journal of the Operational Research Society*, v.44, n.1, p.9-17.
- Tavares, M.E.E.** (2005), Análise do refino no brasil: estado e perspectivas - uma análise “cross-section”. (D.Sc.). Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

Van Den Heever, S., Grossmann, I., Vasantharajan, S. e Edwards, K. (2000), Integrating complex economic objectives with the design and planning of offshore oilfield infrastructures. *Computers and Chemical Engineering*, v.24, n.2-7, p.1049-1055.