

OTIMIZAÇÃO ESTOCÁSTICA DA PROGRAMAÇÃO DE MOVIMENTAÇÃO DE PETRÓLEO: APLICAÇÃO REAL AO SISTEMA TERMINAL-DUTO-REFINARIA

Paula Mauricio Nunes

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)
Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea - Rio de Janeiro, RJ – Brasil
paula.nunes@labnexo.com

Rosa Blajberg

Petrobrás
Avenida República do Chile, 65 Centro - Rio de Janeiro, RJ - Brasil
blajberg@petrobras.com.br

Silvio Hamacher

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)
Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea - Rio de Janeiro, RJ – Brasil
hamacher@puc-rio.br

RESUMO

Decisões de cunho operacional tomadas no dia-a-dia das atividades de programação de movimentação de petróleo têm forte impacto sobre o custo total desta cadeia de suprimentos. O desafio das áreas que tomam estas decisões é elaborar uma programação de movimentação factível, com menor custo e alto nível de confiança. Este trabalho apresenta uma formulação matemática baseada em Programação Estocástica Linear Inteira Mista para o problema da movimentação de petróleo de um terminal até uma refinaria. Este modelo permite decidir, antecipadamente, se haverá ou não necessidade da compra adicional de petróleo e/ou da utilização do duto durante o horário de pico, considerando incertezas quanto à chegada de navios no terminal para abastecimento. Neste estudo foram utilizados dados reais do sistema terminal-duto-refinaria: TEFTRAN-OSPAR-REPAR.

PALAVRAS CHAVE. Programação Estocástica, Programação da Produção, Petróleo.

P&G – OR in Oil&Gas, PM – Mathematical Programming, L&T – Logistics & Transport

ABSTRACT

Operational decisions of crude oil scheduling activities taken on a daily basis have a strong impact on the overall supply chain cost. The challenge is to develop a feasible schedule, at lower cost and high level of confidence. This paper presents a stochastic mathematical programming model based on mixed integer linear programming for the crude oil scheduling of a pipeline system connecting a terminal to a refinery. This model can decide in advance whether or not there will need to purchase additional oil and / or use of the pipeline during the peak hours, considering uncertainties regarding the arrival of ships at the terminal for supply. This study used real data for terminal-pipeline-refinery system: TEFTRAN-OSPAR-REPAR.

KEYWORDS. Stochastic Programming, Scheduling, Crude Oil.

P&G – OR in Oil&Gas, PM – Mathematical Programming, L&T – Logistics & Transport

1. Introdução

A indústria do petróleo mundial enfrenta, cada vez mais, novos desafios com a tendência de nacionalização e globalização. Oscilações bruscas nos preços de petróleo e derivados, novos limites para prospecção e exploração de reservas, nova consciência mundial a respeito de preservação do meio ambiente e parcerias entre os grandes players do mercado são alguns dos fatores que contribuem para um ambiente cada vez mais competitivo e dinâmico na indústria de petróleo mundial. Com isso, as empresas são compelidas a aumentar seu desempenho ao longo de toda a cadeia de suprimento, desde a colocação de pedidos e entrega dos produtos finais, até a exploração e produção do petróleo (Tseng et al. 2005).

As decisões de cunho operacional tomadas no dia-a-dia das atividades de programação de movimentação de petróleo têm um forte impacto sobre o custo total da cadeia. O desafio das áreas que tomam estas decisões diárias é elaborar uma programação com menor custo, alto nível de confiança e que seja factível para um determinado horizonte de tempo. Neste contexto, a utilização de programação matemática na programação de refinarias, dutos e terminais da cadeia de petróleo e derivados vem atraindo atenção crescente da indústria de petróleo (Felizari, 2009). Uma revisão bibliográfica sobre o transporte em dutos pode ser encontrada em Souza Filho et al. (2006) e Souza Filho (2007).

Neiro e Pinto (2004) ressaltam que somente subsistemas da cadeia de suprimento de petróleo foram estudados em níveis de detalhe razoáveis. De acordo com Forrest e Oettli (2003), a maioria das empresas da indústria do petróleo ainda opera seu planejamento, projetos de engenharia, operações de upstream, refino, suprimento e transporte como entidades separadas. A razão é a complexidade resultante quando partes da cadeia de suprimento são colocadas dentro do mesmo modelo.

Este trabalho propõe-se a contribuir na solução do problema de programação operacional do abastecimento de petróleo em refinarias de petróleo. Este problema inclui a programação do terminal marítimo, com a chegada dos navios e o estoque nos tanques no terminal marítimo, do duto que liga o terminal à refinaria e dos tanques da refinaria.

Para resolver este problema é proposto um Modelo de Programação Estocástica Linear Inteira Mista que possa realizar, com o menor custo possível, o sequenciamento de atracação de navios em um terminal e a posterior programação de bombeio de petróleo através de um duto, garantindo atendimento à demanda da refinaria mesmo que haja atraso na chegada dos navios ao terminal.

Este problema foi abordado na literatura por alguns autores. A gestão do estoque entre terminais e refinaria considerando descarga dos navios foi abordado por Lee et al (1996) com um modelo de Programação linear inteira mista (PLIM).

Já Magatão et al (2004) formularam um modelo MILP com uma estratégia de decomposição de um problema de larga escala composto por um porto, uma refinaria e um duto onde a vazão do duto era uma variável determinada pelos resultados do modelo.

Rejowski e Pinto (2003) analisaram o problema real de uma refinaria de petróleo conectada a cinco depósitos e ao mercado local através de um único polduto. Utilizando programação linear inteira mista (MILP) eles propõem dois modelos para sequenciamento de produto no duto, respeitando restrições de capacidade e demanda. No primeiro eles consideram que o duto é dividido em trechos do mesmo tamanho e no segundo essa restrição é desconsiderada. Em Rejowski e Pinto (2004) é acrescentado aos modelos anteriores restrições de contaminação de produtos.

Shah (1996) abordou o problema de programação de suprimento de petróleo a uma refinaria partindo da chegada dos navios petroleiros no terminal até a utilização do petróleo pela refinaria. Para isto, foi adotado um modelo matemático de programação baseado na discretização do horizonte de tempo em intervalos de igual duração. Os autores decompõem o problema, em dois: primeiro é determinado como a refinaria será operada e de que forma ela deverá ser suprida pelo duto, depois é determinado como os tanques do

terminal alimentarão o duto (já que a programação do duto é solução da primeira parte do problema), e como descarregar os navios.

Este artigo propõe-se a estender o estado da arte da literatura, tanto ao propor um modelo integrado que considere a programação de todos os elos da cadeia em questão, como ao representar a incerteza da chegada dos navios no terminal marítimo, aspecto que não foi considerado por outros autores.

Na seção 2 é feita uma descrição detalhada do problema a ser abordado. Na seção 3 é apresentada a formulação matemática desenvolvida para solução do problema. Na seção 4 é apresentado o estudo de caso, os dados utilizados e os resultados obtidos. Por último a seção 5 fecha com as conclusões obtidas.

2. Descrição do Problema

A atividade de programação logística dentro de uma empresa de petróleo engloba decisões tais como alocação dos navios petroleiros na cabotagem dos pontos de carga (plataformas de petróleo) aos pontos de descarga (terminais marítimos), tamanhos de lote transportados, programação da descarga destes navios para os tanques dos terminais, e sequenciamento do bombeio dos petróleos que são movimentados dos terminais para as refinarias através de dutos.

Estas decisões são geradas com frequência diária para um horizonte que pode ser de um a quatro dias, ou às vezes de poucas horas. Os grandes desafios ao gerar um plano de programação contemplam a viabilidade física para que ele aconteça e a agilidade requerida para reação e alterações neste plano, quando existem mudanças nas variáveis projetadas.

Este artigo tem como objetivo modelar a programação do duto OSPAR, responsável pelo suprimento de petróleo da Refinaria de Araucária (REPAR) a partir do terminal de São Francisco do Sul (Tefran) considerando incerteza quanto à chegada dos petroleiros nesse terminal. As variáveis de decisão são o tamanho e sequenciamento dos lotes de petróleo a serem bombeados para a refinaria e o sequenciamento da atracação dos navios para descarga no terminal, utilizando como função objetivo a redução do custo do modal dutoviário (custo de energia) e do modal marítimo (custo de estadia dos navios), evitando redução de estoque na refinaria.

Para tal fim foi elaborado um modelo de programação matemática estocástica linear inteira mista. Este tipo de modelo é o mais adequado à modelagem de scheduling por explicitar decisões discretas, tais como atracar ou não navios e bombear ou não um lote no duto do terminal para a refinaria considerando incertezas referentes à disponibilidade do navio para atracação.

Para simplificação da análise são utilizados apenas dois tipos de petróleo (leve e pesado), não são considerados tanques individuais e sim uma capacidade agregada por tipo de petróleo e são desconsiderados os tempos de preparo de um tanque e a contaminação por interface de produtos no duto. No modelo proposto o tamanho do lote é constante, isto é, o duto é discretizado em vários lotes com volume fixo.

Não faz parte do escopo deste modelo a programação de produção da refinaria. Neste trabalho são consideradas incertezas relativas apenas ao momento de chegada dos navios no terminal não sendo consideradas incertezas em outros parâmetros do modelo.

3. Formulação matemática

O modelo desenvolvido para resolver o problema descrito na seção 2 busca minimizar os custos de operação do duto, penalizando o bombeamento no horário de pico, os custos de compra de adicional de petróleo, e os custos associados à utilização do navio além de penalizar caso haja baixa de estoque na refinaria. Ele está sujeito a restrições referente à capacidade de armazenamento tanto da refinaria quanto do terminal. Considera também limitações referentes à operação do duto e dos navios. Além disso, o modelo considera incerteza quanto à disponibilidade do navio para descarga no terminal. Foi considerada como variável de primeiro estágio o bombeamento do duto em horário de pico

e a compra do adicional de petróleo. Para simplificação, o duto é tido como tendo vazão constante com seccionamento em lotes de tamanho fixo. Assim, antes de saber se haverá atraso ou não na chegada do navio, isto é, se haverá realização de incerteza, deve-se decidir se será necessária a utilização do duto em horário de pico e se haverá necessidade de compra extra de petróleo.

Para consideração da incerteza do navio foi considerada como variável de segundo estágio o momento da atracação do navio e sua descarga no terminal, assim como a movimentação através do duto. Foi assumido que, uma vez atracado, o navio deve ser completamente descarregado e a vazão de descarga é conhecida e fixa para cada um dos navios. Vale ressaltar que o duto deve sempre estar completamente preenchido não podendo haver nenhum lote vazio.

O horizonte de tempo para análise é considerado uniformemente discretizado e a demanda da refinaria é conhecida. A seguir temos a formulação do modelo.

Índices

$p = 1, \dots, P$	produtos
$t = 1, \dots, T$	períodos
$l = 1, \dots, L$	lotes de divisão do duto
$n = 1, \dots, N$	navios
$s = 1, \dots, S$	cenários

Parâmetros

$AtrasoNavio_{n,s}$	Atraso na chegada de navio para cada cenários
$CapRef_p$	Capacidade máxima de armazenamento de produto na refinaria
$CapTer_p$	Capacidade máxima de armazenamento de produto no terminal
$ChegadaNavio_n$	Período em que n chega ao terminal
$CustoNavio_n$	Custo por navio e período
$CustoPetroleoAdicional_p$	Custo unitário do adicional do produto.
$Demanda_{p,t}$	Demanda da refinaria por produto e período
$Dias$	Número de dias no horizonte de tempo considerado
$EstIniRef_p$	Estoque de produto existente na refinaria no início do horizonte
$EstSegRef_p$	Estoque de segurança necessário de produto na refinaria
$EstIniTer_p$	Estoque de produto existente no terminal no início do horizonte
$EstSegTer_p$	Estoque de segurança necessário de produto no terminal
$InicioLote_{p,l}$	Parâmetro que indica se o lote contém produto no início do horizonte
$ProbCenario_s$	Probabilidade do cenário ocorrer
$TarifaPicoDuto$	Custo da energia para utilização do duto no horário de pico
$TaxaRedEstRef$	Penalização pela redução de estoque na refinaria
$TempoDescargaNavio_{n,p}$	Número de t's necessários para a descarga de produto por navio
$VazaoNavio_{n,p}$	Vazão de descarga de n para cada produto
$VolLote$	Volume do lote
$VolumeNavio_{n,p}$	Volume de produto disponível em cada navio

Variáveis Contínuas de Primeiro Estágio

$adicionalPetroleo_{p,t}$	Volume adicional de Petróleo necessário na Refinaria
---------------------------	--

Variáveis Binárias de Primeiro Estágio

$usoHPontaDuto$ 1 indica se o duto é utilizado em horário de pico

Variáveis Contínuas Positivas de Segundo Estágio

$estRef_{p,t,s}$ Estoque na refinaria de produto no período t para cada cenário

$estTer_{p,t,s}$ Estoque no terminal de produto no período t para cada cenário

Variáveis Binárias de Segundo Estágio

$atracadoNavio_{n,t,s}$ 1 se o navio estiver atracado no período t para cada cenário

$atracaNavio_{n,t,s}$ 1 se o navio atraca no período t para cada cenário

$compDuto_{p,l,t,s}$ 1 se o lote contém o produto em no período t

$desatracaNavio_{n,t,s}$ 1 se o navio desatraca no período t para cada cenário

$descarregaNavio_{n,t,p,s}$ 1 se o navio estiver descarregando produto no período t para cada cenário

$entradaDuto_{p,t,s}$ 1 se produto sai do terminal para o duto no período t

$saidaDuto_{p,t}$ 1 se produto sai do duto para a refinaria no período t

Restrições

A função objetivo do modelo está apresentada em (1). Ela possui 3 parcelas sendo as duas últimas ponderadas pela probabilidade do cenário. A primeira parcela é referente à taxa paga caso o duto seja utilizado em horário de pico, a segunda é o custo que eu tenho com os navios em cada um dos cenários e a terceira é a penalização caso haja redução do estoque da refinaria em algum dos cenários.

Min Custo =

$$\begin{aligned} & TarifaPicoDuto * usoHPontaDuto + \\ & \sum_{p,t} CustoPetroleoAdicional_p adicionalPetroleo_{p,t} + \\ & \sum_s ProbCenario_s \left[\sum_n CustoNavio_n \left[\begin{aligned} & \left(\sum_t t * desatracaNavio_{n,s,t} \right) \\ & + T(1 - \sum_t desatracaNavio_{n,s,t}) \end{aligned} \right] \right. \\ & \left. + \sum_{p,t} TaxaRedEstRef [estIniRef_p - estRef_{p,t=T,s}] \right] \end{aligned} \quad (1)$$

A equação 2 e 3 garantem que os estoques, da refinaria e do terminal respectivamente, irão respeitar o limite mínimo e máximo de armazenagem.

$$EstSegRef_p \leq estRef_{p,t,s} \leq CapRef_p \quad \forall (t, s) \quad (2)$$

$$EstSegTer_p \leq estTer_{p,t,s} \leq CapTer_p \quad \forall (t, s) \quad (3)$$

A equação 4 e 5 garantem que o estoque da refinaria ao final do período será igual ao que chegou pelo duto menos o que fluxo enviado pelo duto.

$$\begin{aligned} & estRef_{p,t,s} - EstIniRef_p = \\ & saidaDuto_{p,t,s} * VolLote - Demanda_{p,t} + adicionalPetroleo_{p,t} \quad \forall (p, t = 1, s) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & estRef_{p,t,s} - estRef_{p,t-1,s} = \\ & saidaDuto_{p,t,s} * VolLote - Demanda_{p,t} + adicionalPetroleo_{p,t} \quad \forall (p, t > 1, s) \end{aligned} \quad (5)$$

A equação 6 e 7 garantem que o estoque do terminal, ao final do período, será igual ao que foi descarregado pelos navios menos o que saiu pelo duto garantindo o balanço de massa.

$$estTer_{p,t,s} - EstIniTer_p = -entradaDuto_{p,t,s} VolLote + (\sum_n descarregaNavio_{n,t,p,s} VazaoNavio_{n,p}) \quad \forall p, t = 1, s \quad (6)$$

$$estTer_{p,t,s} - estTer_{p,t-1,s} = -entradaDuto_{p,t,s} VolLote + (\sum_n descarregaNavio_{n,t,p,s} VazaoNavio_{n,p}) \quad \forall p, t > 1, s \quad (7)$$

As equação 8 e 9 garantem que haverá apenas um navio atracado de cada vez. A equação 10 diz que apenas navios atracados podem descarregar e a 11 garante que, uma vez atracado, a descarga terá que ser total.

$$\sum_n atracadoNavio_{n,t,s} \leq 1 \quad \forall (t, s) \quad (8)$$

$$\sum_t atracaNavio_{n,t,s} \leq 1 \quad \forall (n, s) \quad (9)$$

$$descarregaNavio_{n,t,s} \leq atracadoNavio_{n,t,s} \quad \forall n, p, t, s \quad (10)$$

$$\sum_t descarregaNavio_{n,p,t,s} = TempoDescargaNavio_{n,p} \sum_t desatracaNavio_{n,t,s} \quad \forall (n, p, s) \quad (11)$$

A equação 12 determina que o navio ficara no cais até deixar o terminal, uma vez que ele já realizou sua atracação já a 13 determina que o navio só pode deixar o terminal depois de ter atracado.

$$atracadoNavio_{n,t,s} = \sum_{t1 < t} (atracaNavio_{n,t1,s} - desatracaNavio_{n,t1-1,s}) \quad \forall n, t, s \quad (12)$$

$$\sum_{t1 < t} atracaNavio_{n,t1,s} \geq \sum_{t1 < t} desatracaNavio_{n,t1,s} \quad \forall (n, s) \quad (13)$$

As equações 14 a 21 garantem o correto funcionamento do fluxo de produtos no duto, garantindo a transferência dos produtos de um lote para o outro, uma análise mais detalhada pode ser obtida em Pereira (2008). A equação 14 garante que o primeiro lote do duto será constituído pelo produto que saiu do terminal.

$$compDuto_{p,l,t,s} \geq entradaDuto_{p,t,s} \quad \forall p, t, l = 1, s \quad (14)$$

As equações 15, 16, 17 e 18 garantem que o produto contido em um lote passará para o lote seguinte quando houver saída de produto do terminal. As equações 15 e 17 são válidas apenas para o primeiro período e as outras são validas para os demais períodos.

$$compDuto_{p,l,t,s} - \sum_{p1} entradaDuto_{p1,t,s} \geq InicioLote_{p,l} - 1 \quad \forall p, l > 1, t = 1, s \quad (15)$$

$$compDuto_{p,l,t,s} - \sum_{p1} entradaDuto_{p1,t,s} \geq compDuto_{p,l-1,t-1,s} - 1 \quad \forall p, l > 1, t > 1, s \quad (16)$$

$$compDuto_{p,l,t,s} + \sum_{p1} entradaDuto_{p1,t,s} \geq InicioLote_{p,l} \quad \forall p, l, t = 1, s \quad (17)$$

$$compDuto_{p,l,t,s} + \sum_{p1} entradaDuto_{p1,t,s} \geq compDuto_{p,l,t-1,s} \quad \forall p, l, t > 1, s \quad (18)$$

As equações 19 e 20 garantem que a refinaria irá receber o produto contido no último lote do duto.

$$saidaDuto_{p,t,s} - \sum_{p1} entradaDuto_{p1,t,s} \geq InicioLote_{p,l=L} - 1 \quad \forall p, l = L, t = 1, s \quad (19)$$

$$saidaDuto_{p,t,s} - \sum_{p1} entradaDuto_{p1,t,s} \geq compDuto_{p,l,t-1,s} - 1 \quad \forall p, l = L, t > 1, s \quad (20)$$

A equação 21 garante que só haverá entrega na refinaria caso haja envio pelo terminal.

$$\sum_p \text{saidaDuto}_{p,t,s} = \sum_p \text{entradaDuto}_{p,t,s} \quad \forall t, s \quad (21)$$

Já a equação 22 garante que existirá um e somente um produto em cada um dos lotes de segmentação do duto e a equação 23 registra se o duto foi usado em horário de pico ou não.

$$\sum_p \text{compDuto}_{(p,l,t)} = 1 \quad \forall l, t \quad (22)$$

$$\sum_{p,tp,s} \text{entradaDuto}_{p,tp,s} \leq \text{Dias} * S * \text{usoHPontaDuto} \quad (23)$$

4. Aplicação Real: Um estudo de caso do sistema TEFTRAN-OSPAR - REPAR

Para comprovar a utilidade e eficácia do modelo foi realizado um estudo considerando o terminal de São Francisco do Sul (Tefran), o oleoduto OSPAR e a refinaria REPAR.

A REPAR é responsável pelo abastecimento do mercado do Paraná e representa 10% da capacidade de refino do Brasil. É responsabilidade da refinaria dosar as quantidades de petróleo leve e pesado consumidos diariamente, de acordo com o perfil de mercado que se queira atender e o esquema de refino existente. A partir deste perfil são determinadas a produção de derivados desejada e a necessidade de matéria-prima para atingir aquela produção. Como o principal produto produzido por ela é o óleo diesel, ela necessita de aproximadamente 30% de petróleo leve, oriundo de importações, em seu processamento diário e 70% de petróleo pesado, recebido da Bacia de Campos.

O terminal aquaviário de São Francisco do sul, localizado em Santa Catarina, foi concebido com o objetivo de atender a demanda da REPAR. O petróleo é transferido do navio para o terminal através de uma monobóia e depois será transferido para a REPAR através de um oleoduto (OSPAR). Os tanques do terminal e da refinaria possuem uma quantidade mínima de petróleo que deve estar sempre presente, chamada de lastro. A figura 1 exemplifica o funcionamento do sistema.

Figura 1: Sistema REPAR – Terminal de São Francisco do Sul



Fonte: Petrobras – Fórum de Petróleo Nacional Set/08

Cabe lembrar que uma variável que pode causar grandes alterações no suprimento de petróleo para a refinaria é a data de chegada dos navios no terminal. Ao longo do ano e em especial em algumas épocas específicas, existe alguma incerteza na atracação dos navios

na monobóia por condições climáticas não adequadas, seja por ondas elevadas, correnteza muito forte ou ventos excessivos.

Segundo Braz (2008), a maior parte dos custos de transporte marítimo da Petrobras são os dos alugueis diários de navios, “hires”, o que faz com que ele seja um direcionador na tomada de decisão quanto a atracação e descarga dos navios, quanto mais rápido o navio descarregar menor será seu custo.

A energia contratada pelas concessionárias de Santa Catarina e Paraná é o fator que limita a capacidade de transferência do OSPAR, podendo causar redução na vazão do oleoduto ou até mesmo descontinuidade do suprimento de petróleo para a refinaria. O custo da energia contratada pode variar de acordo com o horário, pois concorre com a demanda do consumidor final que tem seu pico das 18 às 21 horas (chamado de horosazonalidade) onde a energia fica, em média, 10 vezes mais cara (Blajberg, 2010).

4.1. Definição dos parâmetros

O horizonte de tempo considerado para análise do subsistema TEFTRAN – OSPAR – REPAR é de 30 dias segmentados em intervalos de 3 horas totalizando 240 períodos. Para simplificação são considerados apenas 2 produtos, o petróleo leve e o pesado. O duto será dividido em 11 lotes de 4500 m³, vazão média, e 8 lotes de 6180 m³, vazão alta.

A REPAR possui capacidade de armazenamento de 130 mil m³ para petróleo leve e 195mil m³ para pesados e o volume de segurança mínimo necessário é de 3 vezes a demanda da refinaria, que é de 375 m³/h de leve e 875 m³/h de pesado. O estoque inicial considerado é de 42 mil m³ de leve e 106 mil m³ de pesado.

Já no terminal a capacidade máxima de armazenamento é de 195 mil m³ pesado e 150 mil m³ leve e não há um limite mínimo. O estoque inicial é de 100 mil m³ de pesado apenas.

O custo do navio é de 3 mil reais por hora e são considerados 10 navios com volumes e vazões diferentes. A incerteza relativa à chegada do navio no terminal foi modelado como distribuição normal com média e desvio padrão obtidos a partir de dados históricos, e foram gerados 10 cenários.

A taxa extra cobrada pela utilização do duto em horário de pico é de 150 mil reais.

4.2. Resultados obtidos

O modelo foi implementado utilizando o software Aimms 3.10 e resolvido com o solver CPLEX 12 em um computador i7 4 Quad com processador de 2.8GHz e 12Gb RAM. Foram geradas 106140 variáveis com 95958 inteiras e 185156 restrições. O tempo de solução foi de 6 horas.

Foi prevista a necessidade de compra de petróleo leve em 13 períodos, mas não foi necessária a utilização do duto nos horários de pico. A tabela 1 mostra o momento de atracação dos navios em cada um dos cenários, expresso em horas a partir do início do horizonte de planejamento.

Tabela 1: Instante de Atracação no Terminal

Navio/Cenários	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	78	120	66	0	6	42	78	24	18	0
2	24	48	54	60	0	99	57	0	114	69
3	126	174	126	165	162	186	168	186	132	249
4	360	405	351	330	396	279	345	327	390	363
5	342	396	354	375	402	378	399	375	381	429
6	429	453	462	357	429	447	438	456	519	486
7	558	489	489	519	528	498	495	558	414	528
8	537	603	600	618	516	627	522	549	636	585
9	588	627	624	582	597	618	555	672	663	552
10	705	705	705	705	705	768	705	705	705	705

A vantagem em se utilizar o modelo estocástico pode ser avaliada através de duas medidas conhecidas na literatura, são elas o Valor Perfeito da Informação (EVPI - Expected Value of Perfect Information) e o Valor da Solução Estocástica (VSS - Value of the Stochastic Solution) (Birge e Louveaux, 1997). Nesse estudo de caso, foi obtido um EVPI de 54 mil reais, que representa a diferença entre a solução obtida pelo modelo com previsão perfeita (wait-and-see) e o modelo estocástico. Quanto menor for o EVPI, melhor modelada está a incerteza futura. O valor do VSS obtido foi infinito, o que significa que o modelo determinístico usando a média dos parâmetros estocásticos é inviável para pelo menos um dos cenários futuros possíveis.

Cabe salientar que, atualmente, a solução para o problema analisado contempla apenas alguns dias de programação e não leva em consideração as incertezas. Além disto, as soluções utilizadas são baseadas em heurísticas e na experiência do programador, o que leva a soluções que demandam grande esforço para serem obtidas. Os resultados obtidos não só validaram o modelo proposto como garantiram decisões táticas mais realísticas. Graças à integração de elos do sistema e da incorporação da incerteza relativa à chegada dos navios no terminal marítimo foi possível criar um modelo que permita tomadas de decisões fortemente embasadas.

5. Conclusão

Para garantir a correta programação da movimentação de petróleo em toda sua cadeia de suprimento, com menor custo e alto nível de confiança, é necessária uma boa integração entre as áreas táticas e operacionais. O modelo apresentado neste trabalho representa solução para decisões táticas a respeito da necessidade ou não da compra adicional de petróleo e/ou da utilização do duto durante o horário de pico, considerando incertezas quanto à chegada de navios no terminal para abastecimento, além de decisões operacionais de programação dos dutos, atracação dos navios. A consideração do terminal, do duto e da refinaria como um só sistema e a inclusão da estocasticidade são as principais contribuições deste modelo.

O modelo, baseado em Programação Estocástica Linear Inteira Mista, apresentou bons resultados para cenários reais do sistema terminal-duto-refinaria: TEFTRAN-OSPAR-REPAR. O valor do VSS infinito demonstra que apenas com modelo estocástico é possível tomar decisões táticas hoje que garantam o abastecimento da refinaria, independentemente do cenário que venha a ocorrer no futuro.

Referências

- Birge, J., Louveaux, F.**, Introduction to Stochastic Programming. Springer, New York, 1997.
- Blajberg, R.** Otimização da programação de movimentação de petróleo: Aplicação real ao sistema terminal duto refinaria. Dissertação Mestrado, PUC-Rio, 2010
- Felizari, L. C.**, Programação das operações de transporte de derivados de petróleo em redes de dutos. Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009.
- Forrest, J., Oettli, M.** Rigorous simulation supports accurate refinery decisions. In I. E. Grossmann & C. M. McDonald (Eds.), Proceedings of fourth international conference on foundations of computers-aided process operations (pp. 273-280), Coral Springs, CACH. 2003.
- Lee, H., Pinto, J. M., Grossman, I. E., Park, S.** (1996) Mixed-integer linear programming model for refinery shortterm scheduling of crude oil unloading with inventory management. Industrial and Engineering Chemistry Research, v.35, n.5, p.1630 - 1641.

- Magatao, L., Arruda, L.V.R. e Neves, J.F.** (2004) A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline. *Computers & Chemical Engineering*, v.28, n.1-2, pp.171-185.
- Neiro, S. M. S., Pinto, J. M.,** (2004), A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains. *Computers & Chemical Engineering*, v.28, n.6-7, pp. 871-896.
- Pereira, B. C.,** (2008), Programação de transferência de derivados de petróleo em rede dutoviária: uma análise exata via branch-and-bound". Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia de Produção, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Rejowski JR., R., Pinto, J. M.** (2003), Scheduling of a multiproduct pipeline System. *Computers & Chemical Engineering*, v.27, n.8-9, pp.1229-1246.
- Rejowski JR., R., Pinto, J. M.** (2004), Efficient MILP formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling. *Computers & Chemical Engineering*, v.28, pp.1511-1528.
- Shah, N.** (1996), Mathematical programming techniques for crude oil scheduling. *Computers & Chemical Engineering*, v.20, n.Supplement 2, pp.S1227-S1232.
- Souza Filho, E. M., Alves, V.R.F.M, Ferreira Filho V.J.M,** (2006), "Utilização de técnicas de pesquisa operacional em problemas de distribuição dutoviária: uma revisão". Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO), Goiânia.
- Souza Filho, E. M.,** (2007), Variable Neighborhood Search (VNS) aplicado ao problema de distribuição dutoviária. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia de Produção, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Tseng, Y., Taylor, M. A. P., Yue, W. L.** (2005), The Role of Logistics in Transportation. Proceedings of 6th EASTS Conference, 21–24 September.