MODELO DE OTIMIZAÇÃO ESTOCÁSTICA PARA DIMENSIONAMENTO DA FROTA DE PETROLEIROS

Iuri Martins Santos
Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio
Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea, Rio de Janeiro
iuri.santos@tecgraf.puc-rio.br

Silvio Hamacher
Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio
Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea, Rio de Janeiro
hamacher@puc-rio.br

Diego Moah
Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio
Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea, Rio de Janeiro
moah6@aluno.puc-rio.br

RESUMO

O dimensionamento adequado da frota de navios é de extrema importância na redução dos custos logísticos do setor de Óleo & Gás e no abastecimento energético do mercado nacional. Em função disso propõe-se um modelo de dimensionamento da frota de navios petroleiros *TCP* (*Time Charter Party*) e *VCP* (*Voyage Charter Party*) que capte as incertezas de oferta e demanda de produtos no horizonte de médio prazo, além das incertezas do mercado *spot* de navios *VCP*, aplicado para *industrial shipping*. O modelo matemático propõe uma abordagem com otimização estocástica em dois estágios para tratar a incerteza. O primeiro estágio refere-se a decisão do tamanho da frota *TCP* e o segundo estágio diz respeito as decisões do número de viagens e de volume transportado. No final do artigo, uma análise do modelo estocástico e dos resultados, assim como recomendações para trabalhos futuros, são discutidas.

PALAVRAS CHAVE. Transporte Marítimo. Dimensionamento da Frota. Otimização Estocástica.

Tópicos: PO na Área de Petróleo & Gás, Modelos Probabilísticos, Programação Matemática, Logística e Transportes.

ABSTRACT

Proper fleet sizing and mix of the ships is extremely important in logistical costs reduction of the Oil & Gas and to ensure country’s energy supply. So, we propose a model of fleet sizing and mix the TCP’s (Time Charter Party’s) tankers and VCP’s (Voyage Charter Party’s) tankers that captures the uncertainties in supply and demand of products in the medium term and the uncertainties of the spot market of VCP’s ships, applied to the industrial shipping. The mathematical model proposes a stochastic optimization in two stages approach to deal with the uncertainty. The first stage decision regards the size of the TCP’s fleet and the second stage regards travels number and volume carried decisions. At the end of this work, an analysis of the model and its results is performed, as well as recommendations for future researches, are discussed.

KEYWORDS. Maritime Transport. Fleet Dimension. Stochastic Optimization.

Topics: OR in Oil & Gas, Probabilistic Models, Mathematical Programming, Logistics and Transport.

1. Introdução

O petróleo e o gás são os principais combustíveis no mundo, responsáveis por cerca de 56,6% da energia primária global em 2013 [BP 2014]. Para o transporte destes produtos, o modal marítimo agrega baixos custos com alta flexibilidade, sendo o modal bastante utilizado no Brasil e pela empresa estudada, uma multinacional petroleira que opera no Brasil [Wakamatsu 2008]. Esta empresa, que atua na logística do transporte marítimo, necessita fazer diversas decisões estratégicas de diferentes níveis, entre elas o dimensionamento e programação da frota de navios [Christiansen *et al.* 2007]. O dimensionamento de frota (heterogênea) de navios petroleiros na cabotagem, busca determinar a frota de navios ótima para a empresa operar e atender a demanda nacional de derivados, determinando os tipos dos navios na frota, seus portes e a quantidade de navios de cada tipo [Christiansen *et al.,* 2007; Pantuso *et al.,* 2014].

Esta é uma decisão de médio prazo, realizada anualmente pela empresa e com considerável grau de incerteza. Tanto a oferta e demanda de produtos como o preço *spot* dos navios podem sofrer grandes alterações até as suas realizações e as decisões são tomadas meses antes da tomada do conhecimento destes. Em função disso, este trabalho tem como objetivo propor um modelo de otimização estocástica em duas fases para o dimensionamento da frota de navios petroleiros na cabotagem em uma multinacional de petróleo que opera no Brasil. O modelo proposto é uma extensão de um modelo elaborado anteriormente por Vieira *et al.* [2016], aumentando o horizonte de planejamento de 3 meses para 12 meses, inserindo incerteza na demanda e oferta de produtos e no preço do mercado *spot* de navios através da otimização estocástica e acrescentando a possibilidade de utilizar navios do mercado *spot* (*VCP, Voyage Charter Party)* para complementar a frota de navios afretados por tempo (*TCP*, *Time Charter Party*). Para cada incerteza, criou-se três eventos possíveis – pessimista, provável e otimista, gerando uma árvore com vinte e sete cenários possíveis.

O presente artigo está estruturado em uma breve introdução do tema contendo o contexto, motivação e objetivo. A seção dois contém uma breve revisão bibliográfica sobre problemas de dimensionamento de frota no Transporte Marítimo. Na seção três está descrito o modelo matemático utilizado, as premissas e a estimação dos principais parâmetros. A seção quatro contém à análise do modelo e seus resultados. Por fim na seção cinco a conclusão e recomendações de estudos futuros.

2. Revisão da literatura

O dimensionamento da frota de navios começou a ser estudado por Flood [1954] e Dantzig e Fulkerson [1954], ambos autores abordaram problemas com aplicação militar. O primeiro aplicou as teorias de transporte na programação da frota de navios militares com o objetivo de minimizar a distância total esperada das viagens em lastro das embarcações militares utilizando heurísticas. Os últimos autores, por sua vez, propuseram um modelo de programação linear utilizando o algoritmo simplex para minimizar o número de navios-tanque no transporte de óleo combustível para abastecer navios da marinha americana. Tais artigos iniciaram a discussão acadêmica no transporte marítimo, que passou a ter um caráter mais industrial e aplicado ao mercado marítimo e utilizando modelos de programação linear misto-inteira, como Brown *et al.* [1987], que aborda a programação do transporte marítimo de petróleo cru por navios petroleiros. No início do século XXI, os artigos, aproveitando o desenvolvimento de técnicas computacionais, começaram a inserir a incerteza no problema através da simulação e da otimização estocástica ou robusta, como Christiansen e Nygreen [2005] que trata da incerteza nos tempos de viagens na programação de navios e Bakkehaug *et al.* [2014], que utiliza programação estocástica em multi-estágios para tratar a incerteza na renovação estratégica da frota. Com o crescimento dos trabalhos de transporte marítimo aplicados a pesquisa operacional, diversas revisões do estado da arte foram realizadas, entre elas destacam-se Christiansen *et al.* [2007], Bielli *et al.* [2011], Christiansen *et al.* [2013] e Pantuso *et al.* [2014]. Christiansen *et al.* [2007] apresentam o transporte marítimo nos seus conceitos gerais e no âmbito da Pesquisa Operacional, expõem modelos padrões para o dimensionamento de uma frota de navios homogênea e de frotas de navios heterogênea e citam artigos de sucesso sobre o tema, tornando-se uma leitura necessária para qualquer trabalho de otimização no âmbito do transporte marítimo. Bielli *et al.* [2011] fazem uma revisão bibliográfica dos problemas mais relevantes no gerenciamento da frota nos diversos modais de transporte, das tendências dos modelos, de suas características e dos algoritmos computacionais, sendo interessante para comparar os métodos de solução dos problemas no transporte marítimo com os métodos dos outros modais. Estas revisões mostram a tendência dos trabalhos, que começaram com heurísticas com aplicação militar na metade do século XX, passaram a serem aplicados nas indústrias utilizando modelos de programação linear no final do século XX e, no início do século XXI, passaram a considerar a incerteza através de otimização estocástica ou robusta e simulação. As revisões também destacam uma tendência atual dos trabalhos de lidar com o roteamento marítimo com controle de inventário (MIRPs, Maritime Inventory Routing Problems), como Papageorgiou *et al.* [2014].

Recentemente, Vieira *et al.* [2016] propõe um modelo de programação linear misto inteira para a cabotagem de derivados claros nacional voltado para industrias com frota própria e obrigação de atender a demanda de transporte. O modelo proposto pelos autores é uma adaptação de um trabalho publicado por Steffensen [2012]. Os autores realizam análise de sensibilidade para verificar o comportamento do modelo em diferentes cenários e concluem que o modelo resultaria, no período analisado, em economias de milhões de dólares nos custos logísticos. Este modelo se adapta bem ao caso estudado, já que é voltado para o mesmo tipo de empresa e utiliza premissas similares, mesmo possuindo algumas limitações (não lida com incerteza, nível tático ao invés de nível estratégico), e será melhor discutido na seção adiante.

3. Modelo Matemático Proposto

O modelo matemático de programação estocástica em duas fases proposto nesta seção foi baseado no modelo de Vieira *et al.* [2016]. O modelo de Vieira *et al.* [2016] era desenvolvido para uma empresa de *industrial shipping* (que atua com frota própria e necessita atender toda a sua demanda) e tinha como objetivo minimizar os custos logísticos totais da frota de cabotagem brasileira, considerando restrições de calado, oferta, demanda, capacidade e horizonte de planejamento. Entretanto, ao estender o horizonte de planejamento de 3 meses para 1 ano, tornou-se necessário tratar o problema como multi-período com incerteza em seus parâmetros de oferta e demanda nos terminais de origem e destino e o cenário de preços do mercado *VCP*. Como a empresa estudada tem a obrigação de atender à demanda por completo, independente do cenário do mercado, a otimização estocástica, ao invés da robusta, foi escolhida para abordar a incerteza. A seção 3.1 contém as premissas do modelo haja vista sua complexidade e sua dificuldade de resolução, a seção 3.2 contém o modelo proposto e a definição de suas variáveis e restrições. A seção 3.3 contém como tratou-se a estimação dos parâmetros do modelo.

3.1. Premissas

Devido à complexidade do problema foram consideradas algumas premissas. A primeira foi que o modelo proposto não possui roteirização e as viagens são permitidas de um único porto de origem para um único porto de destino, não sendo permitida mais de uma escala em uma mesma viagem (mais de um porto de carga ou mais de um porto de descarga) já que tais considerações iriam aumentar significativamente o porte do modelo. A empresa estudada já estima um fator de eficiência da frota para corrigir uma possível superestimação da frota (na cabotagem realizam-se viagens múltiplas, então a frota, calculada para viagens únicas, tende a ser sobre-estimada). Optou-se por omitir portos com fluxo inexpressivo de derivados que poderiam contaminar os resultados e criar viagens e navios desnecessários. Em consequência, foi necessária a criação de um nó fictício no exterior (Ras Tanura) responsável pela importação de produtos para suprir eventuais necessidades de demanda não atendida e equilibrar o balanço entre a oferta e a demanda de produtos nos terminais. Este nó só poderia ser operado por viagens *VCP* para não influenciar o resultado da frota de navios *TCP*. Apesar de haver incerteza nos diversos parâmetros do modelo e que os valores de muitos parâmetros são variáveis ao longo do horizonte de planejamento, considerou-se apenas a incerteza nos parâmetros de oferta e demanda e no preço *spot*, já que no horizonte de planejamento analisado estes eram os que mais impactavam no resultado. Considerou-se que a discretização escolhida é fiel à real distribuição dos parâmetros e que a estimativa da probabilidade de cada cenário também é fidedigna. Além disso, para diminuir a complexidade do modelo, as velocidades de viagem (com o navio carregado e viajando em lastro) dos diversos tipos de navios foram consideradas constantes, de forma que o tempo de viagem em um determinado arco seja constante para qualquer navio.

3.2. Modelo

Esta subseção contém a formulação simbólica do modelo estocástico de dimensionamento da frota de navios petroleiros para a cabotagem. A Tabela 1 contém os conjuntos dos modelos, a Tabela 2 os parâmetros e Tabela 3 as variáveis.

Código	**Índice**	**Nome**	**Descrição**
V	v	Tipos de navios	Conjunto dos tipos de navios disponíveis.
N	(i,j)	Nós	Conjunto de nós (portos/terminais) de carga e descarga.
P	p	Produtos	Conjunto dos produtos que precisam serem transportados.
S	s	Cenários	Conjunto de cenários possíveis.
M	m	Períodos	Conjunto de meses do horizonte de planejamento.

Tabela 1: Conjuntos do Modelo de Dimensionamento da Frota (Fonte: Os Autores).

Código	**Nome**	**Descrição**	**Unidade**
N_{iv}	Constante	Nós i que podem operar cada um dos tipos v de navios.	{0,1}
A_{ij}	Arco de Movimentação	Define os arcos entre os nós i e j onde possa existir oferta e demanda para um mesmo produto.	{0,1}
O_{ipsm}	Oferta	Oferta do produto p no nó i no cenário s do mês m.	m^3
D_{jpsm}	Demanda	Demanda do produto p no nó j no cenário s do mês m.	m^3
T_{ij}	Tempo	Tempo total de viagem redonda e operação entre nós i e j.	Dias
Num^P	Número de Períodos	Número de meses dentro do horizonte de planejamento: 12.	Inteiros
H	Horizonte de Planejamento de um período	Número de dias dentro de um período (mês) no qual a frota deverá ser dimensionada. Ou seja, 30 dias.	Dias
$C^{OP}{}_{vij}$	Custo Operacional	Somatório dos custos de combustível e despesas portuárias em cada arco (i,j) de movimentação para o navio v.	Dólar
$C^{TCP}{}_{v}$	Custo Fixo *TCP*	Custo diário do contrato de Afretamento por Tempo (*TCP*, *Time Charter Party*) para o navio do tipo v. (*Hire*, ou "aluguel").	Dólar/dias
$C^{VCP}{}_{vs}$	Custo Viagem *VCP*	Custo diário equivalente do contrato de Afretamento por Viagem (*VCP*, *Voyage Charter Party*) para o navio do tipo v no cenário s. (*TCE, Time Chater Equivalent*).	Dólar/dias
CL_{vi}	Calado	Volume máximo que pode ser carregado ou descarregado no navio do tipo v no porto i devido às restrições de calado.	m^3
Pb_s	Probabilidade	Probabilidades de ocorrência do cenário s.	[0,1]

Tabela 2: Parâmetros do Modelo de Dimensionamento da Frota (Fonte: Os Autores).

Código	**Descrição**	**Unidade**
x_{vijsm}	Quantidade de viagens dos navios *TCP* v entre nós i e j no cenário s do período m.	Inteira
y_{vijpsm}	Volume de produto p transportado pelos navios v entre nós i e j no cenário s e período m.	m^3
z_v	Quantidade de navios *TCP* do tipo v.	Inteira
w_{vijsm}	Quantidade de viagens *VCP* de navios do tipo v entre os nós i e j no cenário s do período m.	Inteira

Tabela 3: Variáveis de Decisão do Modelo de Dimensionamento da Frota (Fonte: Os Autores).

A variável z_v é uma decisão de primeiro estágio e é tomada no modelo antes da realização da incerteza e afeta as futuras decisões de segundo estágio. Já as variáveis x_{vijsm}, y_{vijpsm} e w_{vijsm} são variáveis de segundo estágio, que só serão decididas após a realização do cenário s de demanda e oferta de produto nos terminais e de preço do mercado *spot* (*VCP*) para cada um dos meses do horizonte de planejamento. Estas variáveis consideram uma probabilidade de ocorrência igual à probabilidade de realização daquele cenário s em particular. A criação das variáveis x_{vijsm}, y_{vijpsm} e w_{vijsm} está sujeita a existência do arco entre os nós i e j em pelo menos um cenário e que o navio do tipo v esteja apto para operar em ambos os nós, *i.e.*, desde que A_{ij}, N_{iv} e N_{jv} iguais à 1. Além disso, a variável x_{vijsm} só pode ser criada caso T_{ij} (tempo de viagem entre os nós) seja menor ou igual a H (horizonte de um mês), abaixo o modelo:

Função Objetivo:

$$Min \sum_{v \in V} Num^P \cdot H.C_v^{TCP}.z_v + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{v \in V} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} Pb_s \cdot \left[C_{vij}^{OP}.\left(x_{vijsm} + w_{vijsm}\right) + w_{vijsm}.\left(C_{vs}^{VCP}.T_{ij}\right)\right] \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in N_{iv}} x_{vijsm} = \sum_{i \in N_{iv}} x_{vjism} \qquad \forall\, v, j, s, m \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{v \in V} y_{vijpsm} \leq O_{ipsm} \qquad \forall\, i, p, s, m \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{v \in V} y_{vijpsm} = D_{jpsm} \qquad \forall\, j, p, s \quad (4)$$

$$\sum_{p} y_{vijpsm} \leq CL_{vi} \cdot \left(x_{vijsm} + w_{vijsm}\right) \qquad \forall\, v, i, j, s, m \quad (5)$$

$$\sum_{p} y_{vijpsm} \leq CL_{vj} \cdot \left(x_{vijsm} + w_{vijsm}\right) \qquad \forall\, v, i, j, s, m \quad (6)$$

$$\sum_{(i,j) \in N : A_{ij} = 1} T_{ij}/2 \cdot x_{vijsm} \leq H \cdot z_v \qquad \forall\, v, s, m \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} w_{vijsm} \leq 10 \qquad \forall\, v, s, m \quad (8)$$

Onde:

$$x_{vijsm} \geq 0 \text{ e Inteiro} \qquad \forall\, v, i, j, s, m \quad (9)$$

$$y_{vijpsm} \geq 0 \qquad \forall\, v, i, j, p, s, m \quad (10)$$

$$z_v \geq 0 \text{ e inteiro} \qquad \forall\, v \quad (11)$$

$$w_{vijpsm} \geq 0 \text{ e inteiro} \qquad \forall\, v, i, j, p, s, m \quad (12)$$

A função (1) visa minimizar os custos logísticos totais da frota. O primeiro termo desta representa o custo das decisões de primeiro estágio e o segundo termo representa o custo das decisões de segundo estágio. O custo das decisões de primeiro estágio é equivalente ao custo dos contratos de afretamento dos navios *TCP* durante o período do horizonte de planejamento, constantes ao longo do período e, por consequência, tratados como custos fixos. O segundo termo da equação é dividido em duas partes, ambas multiplicadas pela probabilidade de realização do cenário. A primeira parte representa a somatória dos custos operacionais de todas as viagens, composto pelos custos dos combustíveis marítimos e das despesas portuárias. Já a última parte representa os custos das viagens *VCP*, formada por seus custos operacionais e de contrato, calculados em termos de *TCE (Time Charter Equivalent*, custo equivalente do contrato *VCP* em relação ao contrato *TCP*, *i.e.*, custo diário do contrato *VCP* sem considerar custos operacionais). Ao considerar a probabilidade de realização do cenário no segundo termo, consegue-se que a função objetivo minimize o valor esperado de todas as realizações possíveis e encontre uma solução que otimize todos os cenários. A equação (2) garante que todas as viagens de navios *TCP* se iniciem e terminem no mesmo nó *i*, *i.e.*, formem um ciclo completo, evitando que algum navio *TCP* "se perca no modelo". As viagens *VCP* não precisam de tal restrição, já que usam a premissa que sempre existe navios *VCP* disponíveis para eventuais contratos. A inequação (3) restringe o volume carregado de um produto *p* no porto de carga *i* no cenário *s* do período *m* ao volume disponível do produto no porto. A restrição (4) garante que as demandas dos clientes nos portos de descarga num cenário e período sejam integralmente atendidas, já que, como dito anteriormente, a empresa é responsável pelo atendimento destas regiões e não necessita atender a demanda por completo. As inequações (5) e (6) restringem o volume a ser carregado nos portos de origem e descarregado nos portos de destino em função das restrições de calado. A restrição (7) assegura que os dias em operação para todos os navios *TCP* de porte *v* seja menor ou igual ao número de dias disponíveis no horizonte de planejamento de determinado cenário e mês. O parâmetro T_{ij} diz respeito ao tempo total de operação (ida e volta). Entretanto, na cabotagem, os navios *TCP* são, geralmente, roteirizados para realizar diversas viagens de ida apenas ao invés de ida e volta. Por essa razão, optou-se em dividir o parâmetro T_{ij} por dois e assim exigir que o tempo de operação seja no mínimo o tempo da viagem de ida entre os nós, tornando o modelo mais realista. A inequação (8) limita o número de viagens *VCP* de um mesmo tipo navio em um mesmo período e cenário e foi criada porque o modelo proposto não considera custos de deslocamento de rota. Destarte, atua de forma a limitar o número de viagens *VCP* a uma quantidade realista. Por último, as restrições (9), (10), (11) e (12) apresentam o conjunto universo de cada uma das variáveis. O problema foi solucionado através da plataforma de modelagem do *AIMMS*®, software utilizado pela empresa em outros modelos de otimização do transporte marítimo e por isso a disseminação do conteúdo e dos resultados entre os funcionários da empresa tende a ser facilitada. O solver utilizado para otimizar o problema foi o *CPLEX v. 12.6.*

3.3. Estimação dos Parâmetros

A estimação dos parâmetros é uma etapa de suma importância para os resultados dos modelos. Parâmetros mal estimados podem causar viés na solução e acarretar em decisões de planejamento equivocadas. No caso do transporte marítimo, pequenos erros podem resultar em prejuízos significativos para a empresa. A respeito dos valores determinísticos, estes foram obtidos através das bases de dados da empresa foco do estudo, de seus consultores e através de diversas planilhas de cálculo de viagem. Os resultados do modelo foram calculados utilizando as ofertas e demandas de Gasolina, Diesel, Óleo Combustível, Querosene Industrial (*QI*) e Querosene de Aviação (*QAV*) com a possibilidade de afretar navios *Handy 18*, *Handy 30*, *MR*, *Panamax* e *Aframax*. A discretização da incerteza de oferta e demanda foi calculada criando-se três eventos possíveis de oferta (otimista, provável e pessimista), três eventos possíveis de demanda (otimista, provável e pessimista) e outros três eventos do mercado *spot* (navios *VCP*) – otimista, provável e pessimista, que juntos geravam uma árvore com vinte e sete cenários possíveis. A Tabela 4 descreve mais detalhadamente as discretizações de acordo com cenários.

	Limite da Variação	**Cenários**	**Ocorrências**	**Probabilidade**
Dem.	$x <- 5\%$	Pessimista	22	20%
	$-5\% < x < 5\%$	Provável	66	61%
	$x > 5\%$	Otimista	20	19%
Ofert.	$x < -15\%$	Pessimista	52	40%
	$-15\% < x < 15\%$	Provável	69	53%
	$x>15\%$	Otimista	9	7%
Merc. *Spot*	$x<-20\%$	Pessimista	77	26%
	$-20\%<x<40\%$	Provável	170	58%
	$x>40\%$	Otimista	46	16%

Tabela 4: Cenários de demanda nas refinarias, oferta nos terminais e mercado *Spot* de navios *VCP*
(Fonte: Os Autores)

4. Análise e Resultados do Modelo

A solução estocástica, *Recourse Problem* (*RP*), representa o valor esperado da solução gerada pelo modelo estocástico, *i. e.*, o valor de sua função objetivo. O modelo foi rodado em um computador com processador *Intel® Core™ i7-3960X CPU@3.30GHz* com uma memória *RAM* de *64.0 GB*, sendo necessários de 160.009 segundos, equivalente a 44,45 horas, para a obtenção da solução com *GAP* de 9,51%. A solução encontrada do modelo estocástico indicou não só a decisão de primeiro estágio a ser tomada – o número de navios *TCP* a serem afretados para os 12 períodos planejados – como também as decisões de segundo estágio após a realização da incerteza – número de viagens *TCP* e *VCP* e a quantidade de carga a ser transportada. Os resultados da solução do modelo estocástico seguem resumidos adiante. A seguir a Tabela 5, apresentam-se os resultados da variável de primeiro estágio (quantidade de navios *TCP*):

Classe de navios	Quant. de navios *TCP* (Estocástica)	Quant. de navios *TCP* (Determinística)
Handy 18	*2*	*2*
Handy 30	*3*	*1*
MR	*1*	-
Panamax (LR1)	-	-
Aframax (LR2)	-	-

Tabela 5: Estágio – Quantidade de Navios *TCP* (Fonte: Santos, 2015).

Como pode ser visto na Tabela 5, a decisão de primeiro estágio contempla uma frota navios *TCP* composta por 2 navios *Handy 18*, 3 *Handy 30* e 1 *MR*. Uma vez que estes navios são de pequeno porte, possuem maior flexibilidade de atendimento, ainda que tenham menor capacidade. Por isso, foram selecionados para atender distâncias mais curtas e portos com restrições de calado. Já na solução determinística, preferiu-se afretar dois navios *Handy 18* e um navio *Handy 30*. Assim como o modelo estocástico, o modelo determinístico teve preferência por afretar por tempo navios de menor porte ao invés de navios maiores. Os navios grandes só são vantajosos para o transporte de grandes volumes e em grandes distâncias e como a maioria das viagens é realizada em pequenos volumes e sempre buscando as menores distâncias possíveis, os navios pequenos ganham a preferência no afretamento por tempo. A Figura 1 retrata as variações da quantidade de viagens *TCP* totais ao longo dos cenários:

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Cenários	VCP	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	→	→	→	→	→	→	→	→	→	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	Demanda	↑	↑	↑	→	→	→	↓	↓	↓	↑	↑	↑	→	→	→	↓	↓	↓	↑	↑	↑	→	→	→	↓	↓	↓
	Oferta	↑	→	↓	↑	→	↓	↑	→	↓	↑	→	↓	↑	→	↓	↑	→	↓	↑	→	↓	↑	→	↓	↑	→	↓
TCP	Handy 18	102	100	106	104	101	104	104	104	109	105	108	104	104	102	106	105	102	107	103	106	102	103	104	108	101	103	105
	Handy 30	66	64	55	61	56	50	57	62	59	66	60	50	69	57	55	67	61	59	71	68	59	61	61	55	71	59	64
	MR	7	4	1	4	7	4	8	2	4	5	6	6	5	6	3	4	5	5	4	1	4	6	3	4	5	6	3
VCP	Handy 18	19	24	27	22	24	28	24	24	26	20	24	26	25	21	27	24	26	25	21	24	26	24	25	26	27	26	25
	Handy 30	14	18	27	23	23	22	22	28	28	14	15	26	19	28	21	17	20	27	14	16	25	17	21	20	17	22	28
	MR	12	9	9	9	10	16	8	9	13	13	11	11	9	11	16	12	13	14	13	10	10	14	12	15	11	12	14
	Panamax (LR1)	3	4	3	2	3	3	5	2	2	2	3	2	1	0	2	4	2	3	0	4	1	0	2	3	3	2	2
	Aframax (LR2)	4	4	4	5	5	5	5	6	4	4	4	4	5	5	5	5	6	4	4	4	4	5	5	6	5	6	4

Figura 1: 2º Estágio – Viagens *TCP* e *VCP* por tipo de navio e cenário para solução estocástica (Fonte: Santos, 2015).

Analisando a Figura 1, percebe-se que nos cenários otimistas de *VCP* (cenários de baixos preços de frete no mercado *spot* – cenários 1-9), as viagens *TCP* reduzem. Isso ocorre porque, nesses casos, o mercado *VCP* se torna mais vantajoso. Além disso, o número de viagens *TCP* não sofre grandes alterações com as variações de oferta e demanda, já que o modelo selecionou os navios *TCP* para realizarem viagens curtas e/ou entre portos que apresentam restrições operacionais. Desta forma, os navios *TCP* realizam sempre um número próximo de viagens para um mesmo cenário do mercado *spot*. A seguir, Tabelas 6-10, serão expostas e discutidas as quantidades de viagens por nós escolhidas pelo modelo, de acordo com a classe de navio utilizada para os contratos *TCP* e *VCP*.

Navio HANDY 18 (i, j)	**Angra dos Reis**	**Canoas**	**Manaus**	**Paranaguá**	**Rio de Janeiro**	**Salvador**	**São Francisco do Sul**	**São Sebastião**	**Tramandaí**	**Total i**
Angra dos Reis	-	-	-	-	-	0,63	-	3,11	-	3,74
Canoas	-	-	-	0,33	1,22	-	10,85	3,48	-	15,89
Fortaleza	-	-	0,37	-	0,81	-	-	0,07	-	1,26
Guamaré	1,07	-	1,04	1,59	1,22	5,89	0,89	0,52	1,59	13,81
Paranaguá	0,07	0,41	-	-	0,19	0,11	-	4,15	2,26	7,19
Pecém	-	-	0,67	-	0,70	-	-	0,04	-	1,41
Rio de Janeiro	-	-	-	-	-	1,48	-	2,96	-	4,44
Salvador	0,19	0,11	-	0,04	0,74	-	0,15	0,04	-	1,26
Santos	2,22	11,89	-	3,04	1,19	-	2,67	0,52	3,52	25,04
São Francisco do Sul	0,19	1,63	-	-	0,41	0,15	-	3,74	1,52	7,63
São Sebastião	2,67	2,56	-	1,89	2,89	-	1,67	-	1,93	13,59
Tramandaí	0,11	-	-	1,48	0,70	-	3,56	3,04	-	8,89
Total j	6,52	16,59	2,07	8,37	10,07	8,26	19,78	21,67	10,81	104,15

Tabela 6: 2º Estágio – Viagens *TCP* utilizando navios *Handy 18* na solução estocástica
(Fonte: Santos, 2015).

Como se pode perceber com a Tabela 6, os navios *Handy 18* são os únicos que podem atender a todos os portos. Como o porto de Canoas só pode ser atendido por esta classe de navios e possui demandas significativas, o número de viagens com *Handy 18* passando por Canoas foi elevado. Observa-se também que esta classe de navio foi selecionada para atender portos próximos e com volumes baixos. Destarte, para atender o porto de Canoas e escoar sua produção, o modelo prefere portos mais próximos deste, evitando custos altos para a realização de viagens longas. Além disso, observa-se que o porto de Manaus tem a maior parte de sua demanda atendida por Guamaré. Isto ocorre em função de menores distâncias entre esse porto e o porto de Manaus, e pelo fato de os navios *Handy* 18 possuírem a flexibilidade adequada para atender ao porto. As viagens *VCP* utilizando navios *Handy 18* seguiram o mesmo comportamento que as viagens *TCP*, porém em maior proporção de viagens e utilizando o nó fictício de Ras Tanura.

Navio HANDY 30 (i, j)	**Angra dos Reis**	**Manaus**	**Paranaguá**	**Rio de Janeiro**	**Salvador**	**São Francisco do Sul**	**São Sebastião**	**Tramandaí**	**Total i**
Angra dos Reis	-	-	-	-	-	-	0,04	-	0,04
Fortaleza	-	0,19	-	0,41	-	-	0,15	-	0,74
Guamaré	1,41	13,67	0,48	0,37	1,26	0,70	0,44	0,59	18,93
Paranaguá	-	-	-	0,04	0,11	-	0,11	0,30	0,56
Pecem	-	0,11	-	0,56	-	-	0,04	-	0,70
Rio de Janeiro	-	-	-	-	0,07	-	1,04	-	1,11
Salvador	0,19	-	0,22	1,30	-	0,44	0,30	-	2,44
Santos	3,19	-	7,44	2,59	-	4,41	1,15	0,63	19,41
São Francisco do Sul	0,04	-	-	0,15	0,11	-	0,30	1,26	1,85
São Sebastião	2,70	-	1,52	1,96	-	4,48	-	1,00	11,67
Tramandaí	0,19	-	1,04	0,19	-	1,48	0,52	-	3,41
Total j	7,70	13,96	10,70	7,56	1,56	11,52	4,07	3,78	60,85

Tabela 7: 2º Estágio – Viagens *TCP* utilizando navios *Handy 30* na solução estocástica
(Fonte: Santos, 2015).

Navio MR (i, j)	Angra dos Reis	Manaus	Paranaguá	Rio de Janeiro	São Francisco do Sul	São Sebastião	Total i
Guamaré	-	1,19	-	-	-	-	1,19
Rio de Janeiro	-	-	-	-	-	0,07	0,07
Salvador	0,07	-	-	-	-	0,04	0,11
Santos	0,15	-	0,37	0,15	0,48	0,30	1,44
São Sebastião	0,15	-	0,93	0,15	0,37	-	1,59
Tramandaí	-	-	0,11	-	-	-	0,11
Total j	0,37	1,19	1,41	0,30	0,85	0,41	4,52

Tabela 8: 2º Estágio – Viagens *TCP* utilizando navios *MR* na solução estocástica (Fonte: Santos, 2015).

Observando as Tabelas 7 e 8, percebe-se que os navios *Handy 30* e *MR* não atendem ao porto de Canoas, o que já era esperado já que estes não podem operar neste terminal devido às suas restrições de calado. Além disso, os resultados acima mostram que o modelo optou por realizar mais viagens com embarcações de *Handy* 30 do que com *MR*. Isto ocorre porque, geralmente, o *Hire* dos navios *Handy* 30 é mais barato do que o de *MR*, apesar de o custo por tonelada dos navios *MR* ser inferior. Esta diferença na proporção de viagens com navios *Handy 30* e *MR* também foi observada nas viagens *VCP*, como esperado.

Navio Panamax (i, j)	Angra dos Reis	Paranaguá	Rio de Janeiro	São Francisco do Sul	São Sebastião	Total i
Ras Tanura	-	*0,67*	*0,04*	*0,85*	*0,22*	*1,78*
Santos	-	*0,30*	-	-	*0,15*	*0,44*
São Sebastião	*0,07*	-	-	*0,04*	-	*0,11*
Total j	*0,07*	*0,96*	*0,04*	*0,89*	*0,37*	*2,33*

Tabela 9: 2º Estágio – Viagens VCP utilizando navios *Panamax* na solução estocástica (Fonte: Santos, 2015).

O resultado acima (Tabela 9) mostra que as viagens em navios *Panamax* tiveram um número reduzido. Isso ocorre porque, além de os navios *Panamax* não atenderem aos portos de Canoas e Manaus, possuem um TCE mais alto, sendo vantajosos apenas para transportar volumes maiores. Além disso, assim como nos casos anteriores, o maior número de viagens com essa classe de navios ocorre para escoar a produção de *Ras Tanura*. Este comportamento repetiu-se para os navios *Aframax*, de porte maior.

O modelo estocástico gerou um valor esperado da solução estocástica (*RP*, *Recourse Problem*), equivalente ao valor da função objetivo. Tal valor foi estimado em R$ 224.185.015,90 com *GAP* de 9,51% e representa o valor esperado do custo logístico associado a frota *TCP* sugerida pelo modelo. Por outro lado, em função da restrição do número de viagens *VCP*, a frota de navios afretados por tempo pela empresa utilizando a solução determinística para o cenário mais provável foi insuficiente para os outros cenários e o modelo não encontrou nenhuma solução factível para alguns cenários mesmo após mais de 150.000 segundos. Percebe-se que, no caso analisado, a solução determinística implicaria em um risco de que em algum dos cenários a empresa fosse incapaz de atender a oferta e a demanda nos terminais com a frota de navios afretada, ressaltando a importância da otimização sob incerteza. Assim sendo, o Valor Esperado da Solução Determinística (*EEV, Expected result of using Expected Value solution*), é calculado na Equação 13.

$$EEV = \sum_S Custo\ Total_s \cdot Probabilidade_s = \infty \tag{13}$$

Logo, caso a empresa resolva seguir a solução determinística ao invés do método estocástico, ela teria um custo total esperado de valor infinito, já que em alguns cenários ela seria incapaz de atender a demanda dos terminais, o que não acontece com a solução estocástica (RP).

A solução "*Wait and See*" (*WS*) pressupõe que a empresa possui uma "bola de cristal" e um poder de predição perfeita, conseguindo prever logo no primeiro estágio o resultado da incerteza e assim dimensionar o tamanho ótimo da frota de navios *TCP* e *VCP* para aquele cenário. Neste caso, o decisor iria tomar sempre a melhor solução. O valor do custo total esperado é dado pelo indicador WS, cujo cálculo se encontra logo adiante:

$$WS = \sum_S Custo\ Total_s \cdot Probabilidade_s \tag{14}$$

$$WS = 166.512.568 \times 0{,}37\% + \cdots + 247.927.291 \times 1{,}16\% = \$210.899.166{,}92 \tag{15}$$

Isso quer dizer que o melhor resultado esperado "possível" é dado pela média das soluções "*Wait and See*" para cada um dos cenários. Ou seja, caso a empresa pudesse determinar a priori a realização da incerteza, seu custo total esperado por ano seria dado por $210.899.166,92 por ano. Uma vez obtidos o valor esperado da solução estocástica (*RP*, *Recourse Problem*) e o valor esperado do *Wait and See* (WS), podemos estimar o valor esperado da informação perfeita (*EVPI, Expected Value of Perfect Information).* No nosso caso, o indicador do *EVPI* mede o valor máximo que é vantajoso para a empresa pagar pela informação completa e precisa sobre os resultados incertos no futuro. Isto é, até quando é vantajoso pagar para melhorar a estimação dos parâmetros de oferta e demanda nos terminais e das previsões do mercado de fretes *VCP*. O cálculo deste indicador segue demonstrado adiante.

$$EVPI = |WS - RP| = |210.899.166{,}92 - 224.185.015{,}90| = \$13.285.848{,}98 \tag{16}$$

Logo, a empresa poderia pagar até cerca de 13,3 milhões de dólares para melhorar a sua estimativa acerca dos parâmetros incertos. É importante frisar que a solução estocástica encontrada possui um *GAP* de cerca de 9%, logo o valor do *EVPI* real tende a ser um pouco mais baixo que o estimado acima. Além disso, o *EVPI* diz respeito ao valor máximo que se deve pagar por uma informação perfeita e, por isso, o valor a ser pago pela melhoria na informação tende a ser proporcional à qualidade desta, que jamais será perfeita.

A avaliação do valor do modelo é obtida através do indicador do valor da solução estocástica (VSS, *Value of Stochastic Solution*), que mede o benefício obtido ao se considerar a incerteza e ao utilizar o modelo estocástico ao invés do modelo determinístico, comparando o desempenho – em termos de valor esperado – da decisão tomada por meio do valor médio (ou mais provável) com o desempenho daquela decisão tomada por meio da incerteza. O cálculo deste indicador segue logo adiante:

$$VSS = |RP - EEV| = |224.185.015{,}90 - \infty| = \$\,\infty \tag{17}$$

Este valor indica que o modelo estocástico apresenta um ganho em valor esperado nos diversos cenários de infinito valor em relação ao modelo determinístico proposto por Vieira *et al.* [2016]. Tal ganho não pode ser quantificado já que a solução determinística encontrada utilizando o cenário mais provável pode implicar em um modelo inviável para outros cenários. Logo, a solução estocástica tende a evitar enormes prejuízos para a empresa no médio e longo prazo ao evitar que a empresa seja incapaz de atender a demanda dos terminais.

5. Conclusão e Recomendações Futuras

O transporte marítimo desempenha um papel fundamental nas atividades da indústria petrolífera estando intrinsicamente ligado a flutuações e incertezas, sendo o dimensionamento da frota uma das principais decisões estratégicas a serem tomadas pelas indústrias do setor. Por este motivo, este artigo propõe um modelo de otimização estocástica em dois estágios para o dimensionamento da frota de navios petroleiros na cabotagem de uma multinacional que opera no Brasil. O modelo proposto é um aprimoramento de um modelo publicado por Vieira *et al*. [2016]

e foi modelado através da plataforma AIMMS®, com auxílio dos softwares Microsoft Excel® e PrecisionTree® para a estimação de parâmetros. Os resultados obtidos foram promissores e atenderam às restrições do problema. No entanto, devido à complexidade computacional e ao elevado número de variáveis inteiras e restrições, o resultado final não foi ótimo, tendo um *GAP* de 9,51% após quase dois dias de processamento, podendo ainda ser diminuído com mais tempo de processamento ou melhorias no modelo.

O modelo trouxe como resultados a quantidade de navios *TCP*, o porte de cada um dos navios, os produtos e quantidades a serem transportados entre os terminais em cada cenário e período e a quantidade de viagens *TCP* e *VCP* realizadas em cada cenário de cada período. Analisando os resultados obtidos pela solução estocástica do modelo, pode-se perceber que o modelo dimensiona tanto a composição da frota de navios considerando as incertezas e flutuações do mercado através de diferentes cenários de oferta, demanda e preços. Buscando a minimização dos custos totais, o modelo tende a utilizar a capacidade máxima dos navios, ainda que, para isso, haja o transporte de mais de um produto num mesmo navio. Em relação ao porte, para o modelo, o critério de seleção para utilizar navios pequenos é o atendimento às restrições operacionais de cada porto, além da distância e o volume transportado entre dois portos serem relativamente baixos. Para o caso estudado, o modelo indicou uma solução parcial (até 9,51% da ótima) com custo esperado de cerca de $224,2 milhões. A solução melhor possível para todos os cenários (*WS, Wait and See)* teve um custo esperado de aproximadamente $ 210,9 milhões o que permitiu estimar um valor esperado da informação perfeita (*EVPI*) em torno de $ 13,3 milhões. Ao analisar o comparar o modelo proposto com o modelo de Vieira *et al*. [2016], constatou-se que a solução determinística implicava numa frota incapaz de atender a demanda para alguns dos cenários, tendo, portanto, um custo esperado (*EEV*) de valor infinito, o que levou a concluir que o valor da solução estocástica (*SSV*) proposta é infinito, já que sua utilização evita que a empresa seja incapaz de atender a demanda dos seus terminais.

Destaca-se que, em função de algumas das premissas utilizadas, o modelo tende a considerar mais vantajosos, do ponto de vista da flexibilidade, os navios *VCP* que os navios *TCP*. Para resolver tal problema, adicionou-se uma restrição limitando o número de viagens *VCP* realizada. Esta restrição conseguiu diminuir o número de viagens *VCP*, mas a frota de navios *TCP* ainda assim difere da realidade. Uma possível solução para tal problema é adicionar algum custo de deslocamento da rota do navio do mercado *spot* ou alguma penalidade pela adição de um novo petroleiro *VCP* na frota. O modelo de programação linear mista inteira proposto aumentou significativamente o tempo computacional em comparação com o desenvolvido por Vieira *et al.* [2016], mas devido ao grande volume financeiro das operações envolvidas, pode resultar numa economia significativa de capital, já que o anterior não leva em consideração a incerteza. Recomenda-se a adição de heurísticas, algoritmos ou métodos de decomposição, como o método de decomposição de *Benders*, o algoritmo *L-shaped* simples, Multi-cortes e a decomposição *Langrangeana*, aplicando aquele que for mais adequado ao problema.

O modelo pode ser aprimorado também, seguindo a tendência atual da literatura de levar em consideração o estoque e, por consequência, eliminar a necessidade do nó fictício. Sugere-se então adaptação do modelo de dois estágios para um de três estágios, onde as decisões de terceiro estágios se referem às decisões após a certeza do nível de estoque nos terminais em cada período. Outra oportunidade de estudos futuros é a elaboração de um modelo de dimensionamento para a cabotagem que inclua algum tipo de roteirização, o que pode aumentar ainda mais a complexidade do modelo, mas os ganhos são promissores, já que a introdução da roteirização pode permitir viagens de múltiplas escalas, algo bastante comum na cabotagem que nenhum modelo leva em consideração. Ainda existem muitas oportunidades e lacunas a serem preenchidas nos modelos de dimensionamento da frota de navios, espera-se que este trabalho fomente pesquisas futuras na área do transporte marítimo aplicado a Pesquisa Operacional.

6. Referências Bibliográficas

Bakkehaug, R., Eidem, E., S., Fagerholt, K. e Hvattum, L. M. (2014). A stochastic programming formulation for strategic fleet. *Transportation Research Part E*, 34:60-76.

Bielli, M., Bielli, A. e Rossi, R. (2011). Trends in Models and Algorithms for Fleet Management. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 20:4–18.

BP, British Petroleum. (2014). BP Energy Outlook 2035: Country and regional insights – Brazil. http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/energy-outlook/country-and-regional-insights/brazil-insights.html . Acessado: 29-05-2015.

Brown, G. G., Graves, G. W. e Ronen, D. (1987). Scheduling Ocean Transportation of Crude Oil. *Management Science*, 33:335-346.

Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B. e Ronen, D. (2007). Chapter 4: Maritime Ttransportation (eds.). In Operations Research and Management Science, Barnhart, C. e Laporte, G. 14:189-284. Elsevier.

Dantzig, G. B. e Fulkerson, D. R. (1954). Minimizing the Number of Tankers to Meet a Fized Schedule. *Naval Research Logistics Quaterly*, 1:217–222.

Flood, M. M. (1954). Application of transportation theory to scheduling a military tanker fleet. *Journal of the Operations Research Society of America*, 2:150-162.

Pantuso, G., Fagerholt, K. e Hvattum, L. M. (2014). A survey on maritime fleet size and mix problems. *European Journal of Operational Research*, 235:341-349.

Papageorgiou, D. J., Nemhauser, G. L., Sokol, J., Cheon, M-S e Keha, A. B. (2014). MIRPLib – A library of maritime inventory routing problem instances: Survey, core model, and benchmark results. *European Journal of Operational Research*. 235:350–366.

Santos, I. M. (2015). Modelo de Otimização Estocástica para Dimensionamento da Frota de Petroleiros. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Steffensen, M-A. (2012). Maritime fleet size and mix problems: An optimization based modeling approach. Master Thesis in Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology.

Vieira, A. A. S., Hamacher, S. e Santos I. M. (2016). Dimensionamento da frota de navios de derivados claros para cabotagem: proposta de modelo de otimização. *In Anais do XXX ANPET*, p. 761-772, Rio de Janeiro. ANPET.

Wakamatsu, C. (2008). Análise dos Fatores que Influenciam o Frete no Transporte Marítimo de Petroleiros no Mercado Spot. Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial, PUC-Rio.