

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Danilo Baptista Maroja**

**Dimensionamento de Frota Marítima sob Incerteza em uma  
Empresa Brasileira de Petróleo**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre (opção profissional) pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Rafael Martinelli

Rio de Janeiro  
Agosto de 2019



**Danilo Baptista Maroja**

**Dimensionamento de Frota Marítima sob Incerteza em uma  
Empresa Brasileira de Petróleo**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre (opção profissional) pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

**Prof. Rafael Martinelli**

Presidente e Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. Antônio Márcio Tavares Thomé**

Departamento de Engenharia Industrial – PUC/Rio

**Prof. Gustavo Souto dos Santos Diz**

Petróleo Brasileiro – Rio de Janeiro – Matriz

Rio de Janeiro, 27 de agosto de 2019

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

### **Danilo Baptista Maroja**

Graduou-se em Engenharia de produção pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2006. Iniciou suas atividades na Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras) em maio de 2007, no planejamento de transporte marítimo, onde continua até a presente data.

#### Ficha Catalográfica

Maroja, Danilo Baptista

Dimensionamento de frota marítima sob incerteza em uma empresa brasileira de petróleo / Danilo Baptista Maroja ; orientador: Rafael Martinelli. – 2019.

78 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2019.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Transporte marítimo. 3. Dimensionamento de frota. 4. Otimização estocástica. I. Martinelli, Rafael. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

## **Agradecimentos**

Agradeço à minha esposa, Patricia, por todo o amor, apoio, companheirismo e paciência durante a realização deste trabalho. Pelos sonhos que compartilhamos e por muito mais.

À minha família, pelos valores que recebi, pelo amor, carinho e incentivo. Ao meu irmão Renato, pela prestimosa ajuda.

Ao meu orientador, Rafael Martinelli, pela compreensão, confiança e estímulo na condução deste trabalho.

Ao corpo docente da PUC-Rio pela excelência dos ensinamentos recebidos.

Ao Iuri Santos, com quem aprendi muito e acredito haver ensinado um pouco.

À Petrobras, pela oportunidade e custeio.

Ao meu gerente, Walter Formosinho, pela oportunidade e incentivo.

Aos colegas da equipe de Planejamento de Frota, pelo aprendizado, pelo apoio e amizade ao longo de todos estes anos.

À equipe Planejamento Operacional, pela fundamental ajuda no levantamento de dados.

## Resumo

Maroja, Danilo Baptista; Martinelli, Rafael. **Dimensionamento de Frota Marítima sob Incerteza em uma Empresa Brasileira de Petróleo**. Rio de Janeiro, 2019. 78p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A volatilidade inerente ao mercado de fretes marítimos e as incertezas relacionadas à demanda de transportes prevista contribuem para a complexidade do problema de dimensionamento da frota. Este trabalho aborda o problema da renovação da frota marítima de uma empresa brasileira do setor de óleo e gás, para o transporte, em viagens de cabotagem e longo curso, de derivados de petróleo. Para tal, é apresentado um modelo estocástico de programação inteira-mista de dois estágios para capaz de gerar indicações de contratos de afretamento a serem realizados considerando incertezas nos níveis de mercado de fretes e na previsão de volume movimentado. O modelo é capaz de fornecer composições de frota capazes de atender as especificações do problema, contudo, para os casos analisados, a avaliação das soluções obtidas ao se considerar a incerteza mostrou potencial de ganho pouco significativo em comparação com uma modelagem similar considerando valores esperados dos parâmetros. Este trabalho evidencia uma situação em que é útil a avaliação das soluções *Wait-and-See* (WS) e *Expected Value of Expected Solution* (EEV), menos demandantes computacionalmente, para calcular o potencial ganho da solução do modelo estocástico.

## Palavras-chave

Transporte marítimo; dimensionamento de frota; otimização estocástica

## Abstract

Maroja, Danilo Baptista; Martinelli, Rafael (Advisor). **Maritime Fleet Sizing under Uncertainty in a Brazilian Oil Company**. Rio de Janeiro, 2019. 78p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The inherent volatility in the maritime freight market and the uncertainties related to the expected transport demand contribute to the complexity of the fleet size and mix problem. This work addresses the problem of the maritime fleet renewal of a Brazilian oil and gas company, for the transportation, in cabotage and international voyages, of oil products. To this end, we present a two-stage stochastic mixed-integer programming model capable of giving recommendations of which chartering contracts to be performed, considering uncertainties in freight market levels and in the forecasted volume movement. The model is able to provide fleet compositions capable of meeting the problem specifications, however, in the evaluated cases, little gain potential was observed by comparing the stochastic solutions to solutions considering expected parameter values. This work highlights a situation in which the evaluation of the computationally less demanding Wait-and-See (WS) and Expected Value of Expected Solution (EEV) solutions is useful to calculate the potential gain of the stochastic model solution.

## Keywords

Maritime transportation; fleet size and mix; stochastic optimization

# Sumário

1	Introdução	11
1.1.	Motivação	11
1.2.	Objetivos	12
1.3.	Estrutura do trabalho	13
2	Referencial Teórico	14
2.1.	Mercado de Petróleo e Derivados	14
2.2.	Transporte Marítimo: Principais Conceitos	15
2.2.1.	Agentes do Mercado Marítimo	16
2.2.2.	Gestão Náutica e Gestão Comercial	17
2.2.3.	Classificação de Custos	18
2.2.4.	Tipos de Contratos de Afretamento	18
2.2.5.	Atuação no mercado: <i>liner, tramp e industrial</i>	21
2.2.6.	Navios Tanque	22
2.3.	Estudos de Pesquisa Operacional no Transporte Marítimo	23
2.4.	Otimização Estocástica	27
3	Caso Estudado: Empresa Brasileira de Óleo e Gás	30
3.1.	Descrição da Empresa, da Indústria e do Mercado Consumidor	30
3.2.	Premissas Logísticas	30
3.3.	Dimensionamento Atual	32
3.4.	Questões Levantadas no Dimensionamento Atual	34
4	Descrição do Modelo Proposto	36
4.1.	Detalhamento do Modelo Proposto	36
4.2.	Modelagem Matemática	39
5	Aplicação do Modelo e Análise de Resultados	46
5.1.	Descrição Geral dos Parâmetros dos Casos Analisados	46

5.2. Caso de Produtos Claros	50
5.2.1. Premissas do Caso de Produtos Claros	50
5.2.1.1. Volume movimentado	50
5.2.1.2. Análise dos mercados de TCP e VCP	52
5.2.2. Avaliação das Soluções Apresentadas para o Transporte de Produtos Claros	54
5.2.2.1. Frota TCP e VCP contratada	54
5.2.2.2. Utilização da Frota	56
5.3. Caso de Produtos Escuros	59
5.3.1. Premissas do Caso de Produtos Escuros	59
5.3.1.1. Volume movimentado	59
5.3.1.2. Análise dos mercados de TCP e VCP – Produtos Escuros	61
5.3.2. Avaliação das Soluções Apresentadas para o Transporte de Produtos Escuros	64
5.3.2.1. Frota TCP e VCP contratada	64
5.3.2.2. Utilização da Frota	67
5.4. Comentários Sobre a Otimização	69
5.5. Avaliação do Ganho da Solução Estocástica	70
6 Conclusão	73
6.1. Trabalhos futuros	74
6.2. Implicações práticas	74
7 Referências bibliográficas	75

## Lista de Figuras

Figura 1 – Custos dos Contratos TCP e VCP.	21
Figura 2 – Operações Associadas aos Custos e Tempos das Viagens em Carga e Em Lastro.	42
Figura 3 – Fluxos originais de produtos claros e escuros.	48
Figura 4 – Volume movimentado em cabotagem.	51
Figura 5 – Volume movimentado no longo curso.	52
Figura 6 - Gráfico mercados TCP e TCE – Produtos Claros.	53
Figura 7 – Movimentações de Derivados Escuros: Fluxos Originais.	60
Figura 8 – Movimentações de Derivados Escuros: Alteração Exportação.	60
Figura 9 – Gráfico Mercado TCP – Aframax e Panamax – Escuros.	62
Figura 10 – Gráfico Mercado TCP – Aframax e Panamax – Escuros.	63
Figura 11 – Gráfico Mercado VCP – Produtos Escuros.	63

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classificação dos Navios Quanto ao Porte	23
Tabela 2 - Classificação dos Navios Quanto ao Porte	27
Tabela 3 – Conjuntos do Modelo Proposto	39
Tabela 4 – Parâmetros do Modelo Proposto	40
Tabela 5 – Variáveis de Decisão do Modelo Proposto	41
Tabela 6 – Mercados TCP e VCP no Caso de Produtos Claros	52
Tabela 7 – Frota Inicial TCP no Caso de Produtos Claros	54
Tabela 8 – Decisões de Contratação no Caso de Produtos Claros	55
Tabela 9 – Frota TCP utilizada no Caso de Produtos Claros	55
Tabela 8 – Frota VCP Utilizada em Cada Cenário – Produtos Claros	56
Tabela 11 - Utilização dos navios TCP na Cabotagem e no Longo Curso – Produtos Claros	57
Tabela 12 – Indicadores de Utilização dos navios TCP – Produtos Claros	57
Tabela 11 – Decisões de Contratação no Casos de Produtos Escuros	64
Tabela 12 – Frota TCP Utilizada no Caso de Produtos Escuros	65
Tabela 13 – Frota VCP Utilizada em Cada Cenário – Produtos Escuros	65
Tabela 14 – Navios TCP Utilizados na Cabotagem e no Longo Curso – Produtos Escuros	67
Tabela 15 – Indicadores de Utilização dos navios TCP – Produtos Escuros	68
Tabela 16 – RP, WS e EEV para os casos analisados	71

# 1 Introdução

O transporte marítimo de petróleo e derivados, por meio de navios-tanques, é componente fundamental na cadeia de suprimentos da indústria do petróleo, integrando fornecedores e clientes localizados em regiões geográficas distintas. A utilização dos navios-tanques neste transporte permite ganhos de escala em função do volume movimentado quando comparado com outros modais.

Em 2016, foram transportados, por via marítima, cerca de 1.990 milhões de toneladas de petróleo e 1.233 milhões de toneladas de derivados e gás natural, sendo que 29% da tonelagem da frota de navios mundial é composta por navios-tanque (UNCTAD, 2018).

Uma empresa do ramo de petróleo deve definir a parcela dos navios que realizam o transporte de seus produtos que será gerida por ela mesma e o quanto do serviço de transporte será contratado de terceiros. O dimensionamento da frota é a atividade de planejamento que define as quantidades de navios que deverão ser contratadas, em um determinado período, para atender a expectativa de movimentação futura de produtos. Trata-se de uma atividade estratégica e sujeita a um grande número de incertezas. (Christiansen et al., 2007; Pantuso et al., 2014).

O papel estratégico das decisões de composição de frota é ressaltado por Stopford (2009). É enfatizada a volatilidade inerente ao mercado de fretes e o papel do proprietário da carga - a empresa de óleo e gás, no caso analisado - na definição de qual parcela do risco ele irá assumir, através da realização de contratos com durações diferentes. Quanto maior a duração do contrato, menor a volatilidade nos custos de transporte marítimos assumidos.

## 1.1. Motivação

Variações nos valores de fretes podem resultar em indicações de uso de classes de navios diferentes ou modalidades contratuais diferentes no planejamento

da frota. A necessidade de transporte de derivados pode ser alterada por questões como o crescimento econômico e por novos investimentos, ou desinvestimentos, em capacidade produtiva realizadas por determinada empresa. Uma modelagem que considere as incertezas envolvidas no dimensionamento da frota é capaz de reduzir a exposição da empresa a riscos, trazendo um melhor resultado econômico para a companhia (Bakkehaug et al., 2014; Arslan & Papageorgiou, 2017; Wang et al., 2017).

Academicamente, a contribuição se dá ao se tratar do tema do dimensionamento da frota, para o caso de uma grande empresa brasileira de óleo e gás, na forma de um problema de renovação de frota (Pantuso et al. 2014). Nessa categoria de problema se busca definir não apenas qual a quantidade de navios necessária, mas sim como ocorrerá a evolução na frota no horizonte analisado, através da realização de diferentes tipos de contrato de afretamento ao longo do tempo. Ainda, se busca avançar a pesquisa já desenvolvida sobre o tema ao considerar, além das movimentações de cabotagem, as viagens de longo curso (importação e exportação), uma vez que navios contratados por período são capazes de atender aos dois tipos de navegação.

## **1.2. Objetivos**

O principal objetivo deste trabalho é fornecer uma ferramenta capaz de auxiliar as decisões de contratação de frota marítima em situações em que os dados de entrada do problema estão sujeitos à incerteza, para uma grande empresa brasileira da indústria de óleo e gás. Os valores dos fretes no mercado de afretamento por viagem e a previsão da necessidade movimentação de produtos derivados de petróleo foram definidos como os parâmetros sujeitos a incerteza a serem retratados. Como metodologia, foi utilizada a otimização estocástica para abordar o problema. Hagle (2005) aponta que a otimização estocástica vem se estabelecendo como uma abordagem viável para problemas de otimização sob incerteza de grande porte, como é o caso aqui estudado.

Para isso, será apresentado um modelo estocástico de programação inteiramista de dois estágios: o primeiro referente às contratações por período realizadas, e o segundo estágio referente às viagens e contratações *spot* realizadas. As

incertezas das premissas são representadas pela utilização de diferentes cenários para o mercado de fretes e a demanda de transporte prevista.

Para avaliar corretamente o impacto da utilização de contratos de diferentes durações o modelo apresentado irá considerar um horizonte de tempo de 5 anos, maior do que aquele atualmente utilizado pela empresa estudada. O horizonte estudado e o número de períodos considerado se situam dentre os maiores observados na literatura (Arslan & Papageorgiou, 2017).

O trabalho se propõe, ainda, a comparar os resultados do modelo com soluções determinísticas, para avaliar o impacto da aleatoriedade dos parâmetros na solução obtida e para avaliar o ganho na utilização de uma abordagem estocástica.

### **1.3. Estrutura do trabalho**

O presente trabalho será composto por seis capítulos, sendo esse primeiro o capítulo introdutório, no qual é definido o escopo do trabalho, a metodologia adotada, bem como os objetivos que nortearam a sua execução.

Já no Capítulo 2, será feita uma breve revisão da literatura e explanação sobre a fundamentação teórica que serviu de base para a realização do presente trabalho. Dessa forma, serão definidos os conceitos utilizados para a execução do trabalho, como o problema é tratado na literatura, o que já foi desenvolvido e quais resultados já foram alcançados.

No Capítulo 3, será apresentado o caso, descrevendo o problema do dimensionamento da frota de navios-tanque em uma empresa brasileira de petróleo.

No Capítulo 4 serão descritas as principais características do modelo proposto, com detalhamento da modelagem adotada e das questões associadas.

Ainda, serão analisadas, no Capítulo 5, a aplicação do modelo proposto e verificação de seus resultados, por meio da implementação do protótipo, das premissas adotadas e dos resultados obtidos.

Por fim, no Capítulo 6, capítulo conclusivo, serão analisados os resultados da pesquisa, com recomendações para trabalhos futuros.

## 2 Referencial Teórico

Neste capítulo, serão tratados os conceitos básicos necessários para o desenvolvimento do presente trabalho, bem como o detalhamento do problema que se visa a analisar. Inicialmente, serão apresentados conceitos associados à indústria do petróleo, destacando-se a importância do transporte marítimo para a mesma. A seguir, serão apresentados conceitos relativos ao mercado do transporte marítimo propriamente, incluindo as características dos navios utilizados que sejam relevantes para o trabalho desenvolvido. Ainda, será realizada a revisão da literatura de pesquisa operacional utilizada na resolução de questões relativas à logística marítima.

### 2.1. Mercado de Petróleo e Derivados

O petróleo é resultado da matéria orgânica que é soterrada e, ao longo de milhões de anos, sob condições de temperatura e pressão elevadas, se converte em uma mistura de hidrocarbonetos e se acumula sob uma camada de rocha impermeável. Diferentes tipos de petróleo são classificados e valorados de acordo com os tipos de hidrocarbonetos em sua composição. Isso se deve ao fato de que os hidrocarbonetos determinam que tipos de produtos derivados do petróleo poderão ser obtidos com o refino. Em geral, petróleos que apresentam maiores quantidades de hidrocarbonetos com cadeia carbônica pequena e menos contaminantes (i.e., enxofre) têm seu preço elevado, pois permitem a produção de uma maior quantidade de produtos derivados de maior valor.

O *downstream* é o setor da indústria do petróleo responsável pelas atividades de refino, transporte, comercialização e distribuição, enquanto a expressão *midstream* é utilizada para designar o transporte de petróleo ou gás natural do ponto de produção até o ponto de refino. O presente trabalho abordará o transporte de dois

tipos de derivados distintos: Os derivados claros, dentre os quais se destacam o diesel, a gasolina, a nafta e o querosene de aviação; e os derivados escuros, dentre os quais se destacam o óleo combustível e o *bunker*.

Um país produtor de petróleo não necessariamente terá uma indústria de refino proporcionalmente desenvolvida. Por essa razão, há países com grande produção do petróleo, enquanto outros destacam-se pelo refino, sendo os produtos derivados de petróleo, por sua vez, utilizados e distribuídos por todo o mundo. Devido a isso, verifica-se um complexo e constante fluxo de transporte do petróleo e de seus derivados entre cada um desses países (produtores, refinadores e consumidores).

Como exemplos das principais movimentações de petróleo podemos citar as exportações das Américas do Sul e Central para a China, além disso os países do Oriente Médio exportam volumes consideráveis para os Estados Unidos, Europa, Japão e China. Dentre as movimentações de produtos refinados de petróleo, destacam-se as exportações dos Estados Unidos para a América do Sul e Central, da Rússia para a Europa, da Europa para a África e de Singapura para países asiáticos do pacífico. (BP, 2018).

## **2.2. Transporte Marítimo: Principais Conceitos**

A importância econômica das embarcações para o comércio internacional de petróleo remonta ao primeiro embarque de petróleo americano para a Europa, dois anos após a perfuração do primeiro poço comercial do produto, em 1859 (Yergin, 1991). O dimensionamento da frota tem como objetivo a definição de qual a quantidade de navios será utilizada e quais tipos de contrato de afretamento serão utilizados para tal (Christiansen et al., 2007). A seguir serão apresentados conceitos que auxiliarão no entendimento desses contratos, seus custos e suas implicações na utilização da frota.

### 2.2.1. Agentes do Mercado Marítimo

Segundo Stopford (2009) o mercado de fretes é o mercado onde a capacidade de transporte dos navios é negociada, na forma de contratos por viagem ou por período. Este mercado sofre influência, principalmente, da demanda de transporte e da oferta de navios. A fim de detalhar aspectos do mercado de fretes relevantes para o estudo aqui desenvolvido, faz-se necessária a definição das partes envolvidas nos contratos de transporte de carga e nos contratos de afretamento. Fernandes & Leitão (2007) delinham as diferenças entre estas duas categorias de contratos.

Quanto aos contratos de transporte de carga, com base em Pelizaro (2008) e Collyer & Collyer (2002), podemos destacar:

- Transportador: responsável por realizar o transporte da carga do local de saída até o local de chegada, em geral, empresas ou autônomos com capacidade de transporte a oferecer; e
- Embarcador: é o responsável pela carga e necessita do transporte do produto entre dois pontos da cadeia de suprimentos, numa data devidamente acordada.

No tocante aos contratos de afretamento, Pelizaro (2008) e Saraceni (2012) ajudam a delinear os seguintes agentes:

- Armador: é a pessoa ou empresa responsável pela equipagem do navio, tornando-o apto para a exploração comercial. Para tal o armador se encarrega da administração técnica do navio, de prover tripulação ao mesmo, do fornecimento de bens de consumo e manutenção, dentre outros. Busca maximizar a rentabilidade do seu ativo através da cobrança de frete para o transporte de cargas, ou da locação da embarcação a uma taxa diária (*hire*). O armador pode ou não ser o proprietário da embarcação;
- Fretador: é o cedente da embarcação, ou parte dela, para o transporte de cargas ou passageiros, mediante pagamento de frete ou aluguel. Nem sempre o fretador é o armador do navio;
- Afretador: é aquele que contrata a embarcação para a realização do transporte, pagando para tal frete ou aluguel por período determinado ao fretador; e

- *Broker*: atua como intermediário entre fretadores com capacidade de transporte para ofertar e afretadores com necessidade de transporte para as suas cargas. Auxilia na negociação de valores e de termos e condições do contrato de afretamento. Recebe comissão paga pelo fretador.

É possível que um mesmo agente assuma papéis distintos em diferentes ocasiões (Fernandes & Leitão, 2007). Por exemplo, uma empresa de transporte (transportador) que não é proprietária do navio, afreta as embarcações por tempo do proprietário (fretador), este continua sendo o armador. A empresa de transporte então utiliza as embarcações para prestar serviços de transporte a terceiros (embarcadores) e, eventualmente, atua como fretador, realizando contratos por viagem a terceiros (afretadores) que desejam transportar suas próprias cargas.

### **2.2.2. Gestão Náutica e Gestão Comercial**

Para melhor entendimento do papel dos agentes, descritos acima, nos diferentes tipos de contratos de afretamento, são úteis os conceitos de gestão náutica e de gestão comercial. Tais conceitos têm origem no direito marítimo e encontram-se descritos no art. 2º da Resolução nº 1.811/2010, da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ):

- I - gestão náutica da embarcação: É o controle efetivo pela empresa brasileira de navegação sobre a administração dos fatos relativos ao aprovisionamento, equipagens, à navegação, estabilidade e manobra do navio, à segurança do pessoal e do material existente a bordo, à operação técnica em geral, ao cumprimento das normas nacionais e internacionais sobre segurança, prevenção da poluição do meio ambiente marinho e direito marítimo, e à manutenção apropriada da embarcação;
- II - gestão comercial da embarcação: É o controle efetivo pela empresa brasileira de navegação sobre a negociação de contratos de transporte ou de operações de apoio marítimo e portuário, inclusive o adimplemento das obrigações comerciais assumidas nas esferas pública e privada.

O primeiro dos conceitos acima transcrito refere-se às atividades que têm por objetivo tornar o navio apto para a navegação, como contratação da tripulação, manutenção, realização de docagens e obtenção de certificação necessárias. Já a gestão comercial do navio refere-se às decisões associadas às viagens a serem

realizadas e à definição dos mercados em que ele deverá atuar, conforme a seguir será analisado.

### **2.2.3. Classificação de Custos**

Entendidos os conceitos acima, é apresentada a segregação dos custos a seguir, baseada no trabalho de Stopford (2009):

- Custos de Capital: capital próprio, financiamentos e tarifas de *brokers*;
- Custos Operacionais do Navio: salários, provisões, manutenções, reparos, suprimentos, lubrificantes, água, seguros e despesas administrativas; e
- Custos da Viagem: segregados em custos do porto (tarifas portuárias, estiva, limpeza dos compartimentos de armazenagem e *cargo claims*) e combustíveis e outros custos da navegação (combustíveis e tarifas de trânsito em canal).

Na classificação acima, os custos de capital estão associados à propriedade da embarcação. Já os custos operacionais do navio, estão associados à gestão náutica da embarcação e os custos da viagem estão associados à gestão comercial.

A seguir veremos como estes conceitos estão representados em cada tipo de contrato de afretamento.

### **2.2.4. Tipos de Contratos de Afretamento**

Pelizaro (2008), Saraceni (2012), Stopford (2009) e Fernandes & Leitão (2007) descrevem as características gerais dos principais tipos de contrato utilizados no transporte marítimo de petróleo e derivados:

- Afretamento a casco nu ou BCP (*Bareboat Charter Party*): o afretador contrata a embarcação por tempo determinado, assumindo a gestão náutica e a gestão comercial do navio. Nesta modalidade contratual, o afretador assume a posse da embarcação, exercendo também o papel de armador. Cabe, portanto, ao afretador providenciar a tripulação e demais itens inerentes necessários à navegação. Assim o afretador

assume tanto os custos da viagem quanto os custos operacionais do navio, de acordo com a classificação apresentada acima. O fretador recebe do afretador um aluguel, em geral pago mensalmente, calculado a partir de uma taxa diária determinada;

- Afretamento por tempo ou TCP (*Time Charter Party*): o afretador contrata a embarcação por tempo determinado, assumindo apenas a gestão comercial do navio - A embarcação fica à disposição do afretador para se deslocar e transportar cargas conforme as instruções do contratante. Nesta modalidade contratual, o fretador mantém a posse da embarcação, sendo responsável por deixá-la apta a operar. Num contrato TCP, os custos operacionais do navio ficam a cargo do fretador, enquanto os custos da viagem são responsabilidade do afretador. O fretador recebe do afretador um aluguel, em geral pago mensalmente, calculado a partir de uma taxa diária determinada;
- Afretamento por viagem ou VCP (*Voyage Charter Party*): o afretador contrata do fretador os serviços de transporte para movimentar a carga combinada entre dois ou mais portos. Nesta modalidade fica a cargo do fretador a gestão náutica e a gestão comercial da embarcação, bem como seus respectivos custos. No contrato VCP o afretador paga ao fretador o valor do frete combinado pelo transporte da carga. O contrato também determina o pagamento de *demurrage* (sobrestadia) no caso de o tempo gasto nas operações portuárias exceder a duração estipulada; e
- Contrato de Afretamento ou COA (*Contract of Affreightment*): Se assemelha ao VCP, contudo o objeto deste contrato não é um navio específico e sim uma capacidade de transporte. É comumente utilizado quando ocorrem carregamentos sucessivos, desta forma o afretador garante que haverá disponibilidade de transporte a um valor de frete combinado e o fretador consegue otimizar sua frota, dado que não há vínculo entre a carga e o navio que realizará o transporte.

Convém destacar que, do ponto de vista do planejamento da frota, nos contratos BCP e TCP, a posse (e não a propriedade) da embarcação é transferida, pelo período determinado, ao afretador. Este, ao passo que reduz sua exposição à

volatilidade do mercado de fretes VCP, passa a assumir uma despesa fixa pela duração do contrato (Stopford, 2009). Com isso, o ganho do afretador ao realizar opção por um contrato por tempo está associado com a sua capacidade de programar as cargas e a própria frota contratada de forma eficiente, evitando períodos de ociosidade da embarcação.

Por uma questão prática, neste trabalho, navios afretados com um contrato TCP e navios afretados com um contrato VCP serão chamados de navios TCP e navios VCP, respectivamente.

O conceito de TCE, ou *time charter equivalent*, é particularmente útil para se apurar a rentabilidade de um navio contratado em VCP em uma base comparável ao aluguel de um navio contratado em TCP (Arnesen et al., 2017; Stopford, 2009). Como expresso na equação (1), o valor do TCE é obtido subtraindo-se do valor de um determinado frete, despesas que em um contrato TCP ficariam a cargo do afretador (basicamente despesas portuárias e gastos com o consumo de combustível). O valor restante é então dividido pela duração em dias da viagem contratada, considerando a ida e a volta ao ponto de partida. O valor obtido representa qual deveria ser o valor do *hire* de um navio contratado em TCP para que este realizasse a viagem com o mesmo custo do frete do contrato VCP.

$$TCE = \frac{\text{frete} - \text{despesas portuárias} - \text{consumo de combustível}}{\text{duração da viagem em dias}} \quad (1)$$

A Figura 1, a seguir, permite visualizar como os tipos de custos apresentados na seção 2.2.3 estão associados aos tipos de contrato mais relevantes neste estudo, o TCP e o VCP. As despesas da viagem são compostas, principalmente pelas despesas portuárias e pelo consumo de combustível do navio. Os custos operacionais do navio e os custos de capital são, nesse contexto, agrupados de forma a representar a remuneração do fretador. No contrato TCP o valor pago pelo afretador ao fretador é o aluguel, usualmente expresso em dólares por dia. O valor pago no contrato VCP é o frete correspondente ao transporte de determinada carga. O valor do frete contempla as despesas portuárias e o custo de combustível. Já a remuneração do fretador para a viagem pode ser representada pelo TCE, também expresso em dólares por dia.

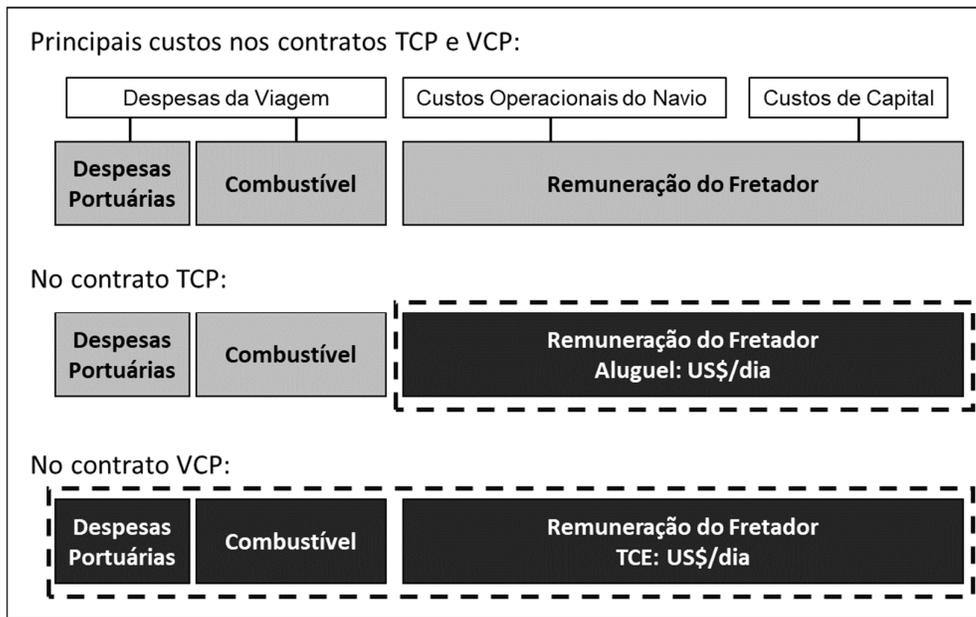


Figura 1 – Custos dos Contratos TCP e VCP. Fonte: o Autor

A seção a seguir tratará da classificação das empresas de navegação de acordo com a sua atuação no mercado.

### 2.2.5. Atuação no mercado: *liner*, *tramp* e *industrial*

Até 1950, o mercado de transporte marítimo caracterizou-se pelo uso de navios de carga geral, os quais ou eram usados em rotas regulares (*liner*) ou eram contratados para realizar viagens específicas (*tramp*). Comumente, as empresas de navegação destinavam os navios novos à categoria *liner* e os demais, à categoria *tramp*. A partir de 1950, com o surgimento do contêiner e de navios especializados, estes destinados ao crescente transporte de grãos, óleo e outras commodities, os navios de carga geral perdem espaço (Stopford, 2009).

Atualmente, é comum, na literatura (Christiansen et al., 2007), a classificação da atuação de uma empresa de navegação no mercado em três categorias distintas: *liner*, *tramp* e *industrial*. Estas classificações podem ser entendidas como diferentes expressões da gestão comercial do navio e são úteis para discriminar, no âmbito da pesquisa operacional, diferentes tipos de problemas de planejamento de transporte marítimo. Os operadores de navios *liners* atuam em rotas pré-definidas que são realizadas com certa regularidade. Buscam estruturar as viagens da maneira mais

eficiente para atender os portos de cada rota. Em geral o transporte é feito por navios porta-contêineres e por navios graneleiros com diversas segregações, para atender produtos de embarcadores distintos. Já os operadores *tramp* têm seus navios contratados para cada viagem individualmente e buscam selecionar viagens que maximizem o lucro. Destacam-se entre estes, os navios de granel sólido e líquido. Operadores de *industrial* são, em geral, empresas que buscam transporte para sua própria carga e planejam a composição e utilização da frota buscando a redução dos custos de transporte.

### **2.2.6. Navios Tanque**

Para o transporte de granel líquido, são utilizados navios-tanque (Saraceni, 2012). Esses navios deverão possuir determinadas características, de acordo com os tipos de produtos que eles irão transportar, como capacidade volumétrica dos tanques adequada ao lote comercial do produto a ser transportado, sistema de bombeio para a descarga e para a movimentação do produto nos tanques, revestimentos específicos nos tanques para evitar contaminações dos produtos e sistema de aquecimento para conservar a carga em temperatura que permita o bombeio.

Outros atributos dos navios-tanque que influenciam sua operação e o resultado econômico de sua operação são: (i) a velocidade de navegação que o navio pode atingir, ligado a isso, o consumo de combustível do navio em diferentes velocidades, e (ii) a vazão de bombeio para cada tipo de produto e o seu respectivo consumo.

Os navios-tanque são comumente classificados de acordo com sua capacidade de transporte em toneladas. Na Tabela 1, a seguir, o autor apresenta a classificação que será utilizada neste trabalho, a partir de uma adaptação de Saraceni (2012).

Tabela 1 - Classificação dos Navios Quanto ao Porte

Classe	Tonelagem de Porte Bruto	
	Limite Inferior(t)	Limite Superior(t)
ULCC – Ultra Large Crude Carrier	300.000	-
VLCC – Very Large Crude Carrier	200.000	300.000
Suezmax	120.000	200.000
Aframax	80.000	120.000
Panamax	60.000	80.000
MR 2	35.000	60.000
MR 1	25.000	35.000
Handy	-	25.000

Fonte: o Autor, adaptado de Saraceni (2012)

### 2.3. Estudos de Pesquisa Operacional no Transporte Marítimo

O transporte marítimo possui características operacionais próprias quando comparado com os demais modais: possui tempos de carregamento e descarregamento comparativamente grandes, opera dia e noite, as viagens podem se estender de poucos dias a meses, além de possuir ampla flexibilidade quanto ao trajeto percorrido. Por conta disso, os modelos de planejamento de frota marítima também se distinguem dos modelos que tratam os demais modais de transporte (Christiansen et al., 2007).

Christiansen et al. (2007) apresentam a classificação dos problemas de transporte marítimo nos níveis estratégico, tático e operacional. Entre os problemas do nível estratégico elencam-se: (i) definição do mercado onde atuar, (ii) design do navio, (iii) desenho das redes e sistemas de transportes, (iv) decisões de tamanho e composição da frota e (v) localização, tamanho e desenho dos portos e terminais.

Como problemas táticos, são citados: (i) ajustes no tamanho e composição da frota, (ii) *deployment* da frota (alocação de navios a frentes comerciais específicas), (iii) roteirização e programação de navios, (iv) programação de berços, (v) programação de guindastes, (vi) gerenciamento do pátio de contêineres, (vii) estiva de contêineres, (viii) gerenciamento de navios e (ix) distribuição de contêineres vazios.

Já os problemas operacionais apresentados são: (i) definição da velocidade de navegação, (ii) carregamento do navio e (iii) roteirização ambiental.

Hoff et. al. (2010) realizam uma revisão da literatura descrevendo e categorizando problemas relacionados à composição da frota e problemas de roteamento, definindo a seguir o problema de composição de frota e roteamento combinados. Posteriormente, Christiansen et. al. (2013) realizam a revisão da literatura de roteamento e dimensionamento de navios, destacando o uso de sistemas de suporte à decisão baseados em otimização para abordar este tipo de problema. Diz (2012) elaborou um sistema de suporte à decisão baseado em otimização para auxiliar na programação dos navios de petróleo nas viagens de longo curso. O sistema aloca os navios disponíveis a determinado conjunto de cargas, a fim de minimizar o custo do transporte.

Pantuso et al. (2014), por sua vez, apresentam uma revisão da literatura sobre problemas de dimensionamento de frota e relatam a escassez de pesquisa na área, sendo que a maioria dos trabalhos revisados adotam simplificações do problema, como a definição da frota para um único período ou adoção de frota homogênea. Neste trabalho é definido o conceito de *Maritime Fleet Renewal Problem*, aqui chamados de problemas de renovação da frota: são problemas de dimensionamento que abordam a evolução da frota ao longo de diversos períodos. Os autores destacam que poucos artigos explicitamente abordam incerteza e adotam ferramentas apropriadas para tal. Os trabalhos descritos a seguir abordam diferentes metodologias para dimensionamento da frota.

Fagerholt (1999) aborda o problema da frota ótima para navios *liners*. O método desenvolvido consiste na geração de rotas navegáveis, inicialmente, priorizando os maiores navios e, em seguida, aloca os navios de menor capacidade, nas rotas em que a capacidade dos navios maiores não é inteiramente utilizada.

Xie et al. (2000) utilizam a programação dinâmica para melhorar a solução fornecida por um modelo linear para o planejamento da frota.

Zeng & Yang (2007) utilizam a otimização integrada e busca tabu para a composição da frota e o roteamento dos navios, de forma minimizar o custo, para o transporte de carvão.

Pelizaro (2008) aborda o dimensionamento da frota de navios para o transporte de cabotagem e longo curso de petróleo, através da análise do tempo de ciclo, além da realização de simulações, envolvendo tamanhos de lote e roteamento.

Shyshou et. al. (2010) descrevem um modelo de simulação para tratar das incertezas envolvidas no dimensionamento da frota de embarcações para o lançamento de âncoras de instalações offshore.

Meng & Wang (2010) abordam o problema da programação de navios *liner*, utilizando programação “*chance constrained*” para representar as incertezas da demanda. Em Meng et. al. (2012), um modelo MIP de programação estocástico é utilizado para abordar o problema do planejamento da frota dos navios *liner*.

Fagerholt et. al. (2010) apresentam abordagem para um amplo conjunto de problemas como dimensionamento de frota e planejamento de contratos de longo prazo. Os autores utilizam simulação de Monte Carlo em conjunto com sistema baseado em otimização, com horizonte rolante, para a programação dos navios.

Alvarez et. al. (2011) propõem um modelo de programação inteira-mista, complementado por uma otimização robusta, para representar as incertezas do problema. O modelo desenvolvido propõe-se a auxiliar nas decisões: venda, compra, afretamento, *lay-up*, sucateamento das embarcações, bem como alocação de navios a determinados tipos de contratos e mercados geográficos.

Halvorsen-Weare & Fagerholt (2011) analisam diferentes metodologias e identificam potencial melhoria com o uso de abordagens robustas para o problema de programação das embarcações de apoio das plataformas de petróleo.

Halvorsen-Weare et. al. (2012) buscam uma frota e roteamento ótimos para o problema do planejamento do suporte às plataformas de petróleo.

Steffensen (2012), em sua tese de mestrado, estudou o problema do dimensionamento de frota de navio da classe Ro-Ro, analisando o impacto de diversas variáveis operacionais na utilização da frota e seus impactos na quantidade de navios resultante.

Fuller (2013) desenvolveu o método probabilístico para determinar a quantidade ótima de navios que fazem o alívio das plataformas de petróleo, a fim de atender um conjunto de plataformas de petróleo, considerando as incertezas do sistema.

Vieira (2014) aborda o problema do dimensionamento da frota para a cabotagem de derivados de petróleo, considerando a locação de navios de diferentes portes, em diferentes rotas, a fim de escoar os derivados dos pontos de oferta aos pontos de demanda.

Bakkehaug et. al. (2014) abordam o problema da renovação da frota, através da utilização da otimização estocástica, sinalizando ganhos nas soluções obtidas quando consideradas as incertezas dos parâmetros.

Polat et. al. (2014) utilizam o modelo MIP e um algoritmo de busca para determinar a frota e as rotas utilizadas, para navegação de curta distância, utilizando navios porta-containers.

Gundegjerde et. al. (2015) desenvolveram um modelo estocástico, considerando as incertezas no mercado, condições operacionais e nível de serviço para definição da frota de helicópteros e embarcações para suporte à manutenção de uma planta de produção de energia eólica.

Laake J. & Zhang A. (2015) abordam o problema do planejamento da frota de uma empresa de navegação *tramp*, para isso é utilizado um modelo MIP de forma a suportar decisões relativas a tamanho e composição da frota, bem como a compra, venda e alocação dos navios em diferentes modalidades de contratação.

Pantuso et al. (2016) tratam do problema de renovação da frota, comparando, para tal, as soluções fornecidas por modelos de otimização estocástica e determinística, concluindo que existe ganho em se considerar as incertezas do problema.

Santos et al. (2017) abordam o dimensionamento da frota de navios-tanque para o horizonte de um ano com o uso de otimização estocástica em dois estágios, sob a perspectiva de uma empresa do setor de óleo e gás, com obrigação de atender a uma demanda especificada.

Wang et. al. (2017) desenvolvem um modelo de otimização estocástico, incorporando otimização da velocidade para abordar o problema do dimensionamento da frota de navios químicos.

Arslan & Papageorgiou (2017) introduzem um modelo de otimização estocástico multiestágio, implementado utilizando horizonte rolante, para abordar as incertezas envolvidas no problema da renovação da frota de navios graneleiros.

Ehlers et. al. (2018) desenvolveram uma ferramenta de suporte de decisão para o dimensionamento de frotas, baseado em um algoritmo de “*particle swarm optimization*”, combinado com um modelo estocástico.

A Tabela 2, a seguir, apresenta a classificação dos artigos quanto ao tipo de problema de dimensionamento de frota e quanto à metodologia adotada, com base no trabalho de Pantuso et al. (2014).

Tabela 2 - Classificação dos Navios Quanto ao Porte

Estudo	Tipo de Problema	Metodologia
Fagerholt (1999)	Tamanho e Composição	Programação Inteira
Xie et al. (2000)	Renovação da Frota	Programação Dinâmica e Programação Linear
Zeng & Yang (2007)	Tamanho e Composição	Heurística(Busca Tabu) e Programação Inteira
Pelizaro (2008)	Tamanho e Composição	Heurística(Clarke e Wright)
Shyshou et. al. (2010)	Tamanho (frota homogênea)	Simulação
Meng & Wang (2010)	Tamanho e Composição	Programação Estocástica
Meng et. al. (2012)	Tamanho e Composição	Programação Estocástica
Fagerholt et. al. (2010)	Tamanho e Composição	Simulação
Alvarez et. al. (2011)	Renovação da Frota	Otimização Robusta
Halvorsen-Weare & Fagerholt (2011)	Tamanho e Composição	Programação Inteira e Simulação
Halvorsen-Weare et. al. (2012)	Tamanho e Composição	Programação Inteira e Heurística(voyage-based solution)
Steffensen (2012)	Tamanho e Composição	Programação Inteira Mista
Fuller (2013)	Tamanho (frota homogênea)	Simulação
Vieira (2014)	Tamanho e Composição	Programação Inteira Mista
Bakkehaug et. al. (2014)	Renovação da Frota	Programação Estocástica
Polat et. al. (2014)	Tamanho e Composição	Programação Estocástica e Heurística(Adaptive Neighborhood Search)
Gundegjerde et. al. (2015)	Tamanho e Composição	Programação Estocástica
Laake J. & Zhang A. (2015)	Renovação da Frota	Programação Estocástica
Pantuso et al (2016)	Renovação da Frota	Programação Estocástica
Santos et al. (2017)	Tamanho e Composição	Programação Estocástica
Wang et. al. (2017)	Renovação da Frota	Programação Estocástica
Arslan & Papageorgiou (2017)	Renovação da Frota	Programação Estocástica
Ehlers et. al. (2018)	Renovação da Frota	Programação Estocástica e Heurística(Particle Swarm Optimization)

Fonte: o Autor, com base em Pantuso et al. (2014)

Tomando-se como base a revisão da literatura desenvolvida por Pantuso et al. (2014), pode ser observado que nos anos recentes ocorreu um aumento na quantidade de trabalhos abordando problemas de renovação da frota e utilizando, como metodologia, a programação estocástica, também chamada de otimização estocástica. A seção a seguir faz uma breve introdução ao tema da otimização estocástica, destacando o uso de métricas para a avaliação dos ganhos na sua utilização.

## 2.4. Otimização Estocástica

Como visto, muitas modelagens utilizam otimização estocástica para abordar o problema do dimensionamento da frota sob condições de incerteza. Higle (2005) descreve os problemas de otimização estocástica como uma mistura de problemas

de otimização tradicionais com modelos probabilísticos. Modelos de otimização estocástica buscam representar situações em que certos parâmetros de um problema são melhores descritos na forma de uma variável aleatória. Nem sempre é possível, na modelagem, tratar a incerteza associada a tais parâmetros com a utilização de médias ou de algum outro valor determinístico (Kall & Wallace, 1994).

*Recourse Problems* são problemas de otimização estocástica em que algumas decisões devem ser tomadas antes que a informação a respeito de certos parâmetros esteja disponível, enquanto outras decisões são tomadas após estes valores serem conhecidos. Assim, *Recourse Problems* sempre são apresentados como problemas de dois ou mais estágios (Higle, 2005).

Higle (2005) destaca, como componentes de um *Recourse Problem* com dois estágios: (i) a árvore de cenários, que apresenta como estão estruturados os cenários, onde cada cenário representa uma realização completa dos elementos estocásticos do problema. (ii) os problemas de cada cenário, que são apresentados como um problema de otimização determinístico, e (iii) as restrições de não-antecipatividade, que determinam a implementação das decisões de primeiro estágio nos problemas de segundo estágio.

Higle (2005) aponta ainda que a solução ótima de um *Recourse Problem* tende a buscar valores para as decisões de primeiro estágio que permitam, com as decisões tomadas no segundo estágio, aproveitar valores favoráveis da realização dos parâmetros aleatórios do problema, sem que ocorra demasiada exposição em situações em que tais variáveis assumam valores menos vantajosos. Kall & Wallace (1994) pontuam que a solução de um problema estocástico (valores das decisões de primeiro estágio), em geral, não é a solução ótima do problema, se analisado *a posteriori*, depois que o valor dos parâmetros incertos são revelados, contudo dificilmente a solução obtida será um valor ruim.

Na otimização estocástica, a avaliação de vários cenários em geral contribui para o aumento do tamanho do problema e sua dificuldade de resolução (Kall & Wallace, 1994).

Kall & Wallace (1994) afirmam que, apesar de, em certos casos, modelos determinísticos serem capazes de fornecer bons resultados, dificilmente é possível concluir que os resultados são bons, sem compará-los a uma modelagem de otimização estocástica. É difícil determinar o impacto da incerteza no problema sem comparar os resultados dos modelos determinísticos e estocásticos.

Birge e Louveaux (2011) nos apresentam as seguintes inequações, que são úteis para avaliar o benefício da utilização da otimização estocástica. Assim, para um problema de minimização:

$$WS \leq RP \leq EEV \quad (2)$$

RP (*Recourse Problem*) é a solução do problema estocástico, como o que será apresentado neste trabalho. WS (*Wait and See*) se refere ao valor esperado considerando a solução ótima de cada cenário individualmente, pressupondo capacidade de predição perfeita. EEV (*Expected Value of Expected Solution*) é o valor esperado considerando a implementação do valor da solução do caso determinístico em cada um dos cenários do problema.

A partir desses valores, é possível obter o EVPI (*Expected Value of Perfect Information*), que se refere ao módulo da diferença entre RP e WS, e representa o impacto da incerteza afeta o resultado do problema analisado, também entendido como o valor que pode ser extraído da melhoria da capacidade de previsão dos parâmetros com incerteza. Um valor de EVPI alto significa que a incerteza afeta consideravelmente o problema, contudo não é suficiente para afirmar que um modelo estocástico forneça uma solução significativamente melhor que uma abordagem determinística (Kall & Wallace, 1994).

Já a grandeza VSS (*Value of Stochastic Solution*) se refere ao módulo da diferença entre EEV e RP, e representa o benefício do uso da otimização estocástica, em comparação com a solução determinística.

Estes conceitos, aqui apresentados, serão utilizados no Capítulo 5, no qual será avaliado o ganho da utilização da otimização estocástica no caso estudado.

### 3 Caso Estudado: Empresa Brasileira de Óleo e Gás

#### 3.1. Descrição da Empresa, da Indústria e do Mercado Consumidor

O caso estudado é o de uma empresa brasileira de óleo e gás. A empresa é verticalizada, exercendo atividades que vão da exploração de petróleo, passando pelo transporte e refino, até a venda de produtos derivados às distribuidoras.

A maior parte de sua produção de petróleo ocorre em plataformas *offshore* próximas ao litoral da região sudeste do país, o restante está distribuído ao longo do litoral da região nordeste e no Rio Solimões.

O refino, por sua vez, está concentrado na região Sudeste do país, com destaque para o estado de São Paulo. Também existem refinarias nas regiões Sul, Nordeste e Norte.

A empresa possui uma capacidade de produção de petróleo e capacidade de refino em volumes comparáveis à demanda nacional por derivados. A empresa é o principal supridor do país de derivados de petróleo.

#### 3.2. Premissas Logísticas

Nem todo o petróleo produzido no Brasil é refinado em território nacional. Parte do petróleo é exportado, sendo os principais destinos de exportação o Extremo Oriente (Índia e China), a Europa e os Estados Unidos. Ainda, parte do petróleo refinado no Brasil é importado, sendo as principais origens a costa oeste africana e o Oriente Médio.

Da mesma forma, nem todo derivado de petróleo demandado pelo mercado brasileiro é produzido no país. Parte desses derivados é importada de origens como Europa e Estados Unidos. Ainda, no processo de refino no Brasil, alguns derivados são produzidos em um volume tal que não são absorvidos pelo mercado nacional,

sendo então exportados. A empresa disputa o mercado nacional de derivados de petróleo com outros agentes que, em geral, importam tais produtos.

Na empresa analisada, há um processo que será chamado, neste estudo, de Planejamento do Abastecimento. Tal processo fornece indicações a respeito de quais produtos (petróleos e derivados) serão comercializados, processados e transportados. É a partir do resultado desse trabalho que é definida uma importante premissa para a pesquisa aqui desenvolvida: os fluxos de produtos, ou seja, para cada período analisado, o volume de um determinado tipo de produto que é transportado de uma determinada origem para um determinado destino. No caso estudado, os volumes são expressos em metros cúbicos e a periodização é feita em meses, sendo que o horizonte de planejamento varia de um ano a cinco anos.

Uma vez que o Brasil possui um extenso litoral onde grande parte da população está concentrada, o transporte via modal aquaviário, através de viagens de cabotagem e de longo curso, constitui uma alternativa eficiente para tratar do problema causado pelo desequilíbrio entre oferta e demanda de produtos derivados de petróleo em diferentes regiões do país. Como exemplo, pode-se assumir que, por conta da concentração de refinarias na região sudeste, o volume de produtos derivados que são transportados desta região para as regiões norte e nordeste seja maior que o volume movimentado no sentido inverso. No entanto, como as regiões norte e nordeste também podem ser abastecidas a partir de importações, um aumento no volume importado para abastecer as regiões norte e nordeste pode implicar em uma redução na produção de derivados na região sudeste ou em um aumento das exportações da produção excedente.

Assim, as cidades que possuem terminais aquaviários funcionam como ponto de recebimento de produtos que irão abastecer as regiões próximas. Grande parte das instalações portuárias que operam petróleo e derivados do país pertencem a uma empresa subsidiária da empresa analisada. Entre as restrições logísticas associadas aos portos, tem-se a disponibilidade de tancagem e o calado que restringem o tipo de embarcação, bem como o volume que pode ser carregado ou descarregado no porto para cada tipo de navio e para cada tipo de produto.

A empresa, além de comercializar petróleo e derivados, também é responsável pela realização dos contratos de afretamento de navios, por período e por viagem, utilizados para o transporte de seus produtos. Por conta disso, a empresa estudada também constitui uma Empresa Brasileira de Navegação (EBN),

cuja atuação pode ser enquadrada na classificação *industrial*, conforme classificação apresentada por Christiansen et al. (2007) na Seção 2.2.5. Comumente, nas movimentações de cabotagem, de exportação e de importação, a empresa estudada é o agente responsável pelo serviço de transporte. A exceção ocorre em casos menos frequentes quando na ocasião de uma importação, em que o transporte é providenciado pela empresa estrangeira que vendeu o produto. Cabe destacar que por conta de restrições na legislação (BRASIL, 1997), a utilização de contratos VCP para atuação na cabotagem é dificultada.

### **3.3. Dimensionamento Atual**

O Planejamento do Transporte Marítimo é o processo pelo qual a empresa estrutura um plano no qual define quais tipos de navios e tipos de contratos serão utilizados para o transporte de produtos dentro de um período de tempo definido.

Atualmente, a atividade é realizada com a utilização de modelos de programação linear/programação linear inteira mista de desenvolvimento interno. O dimensionamento utilizado para subsidiar as contratações da referida empresa tem como base, em geral, um horizonte de tempo de um ano, com detalhamentos mês a mês. O modelo, contudo, suporta também horizontes mais longos, com detalhamento anual.

A partir da previsão de movimentação de produtos, características operacionais dos navios e dos terminais aquaviários, bem como previsão do mercado de fretes e de outros custos operacionais, o modelo define indicação de contratações em TCP e VCP para atender a demanda de transporte esperada. Cabe destacar que o modelo trata todas as premissas mencionadas de forma determinística.

A atividade de Planejamento do Abastecimento gera, no nível tático, indicações de quais movimentações de produtos serão realizadas visando a maximizar o resultado financeiro da empresa. Tais fluxos são apresentados em uma tabela, discriminados de acordo com: os meses no horizonte analisado, os tipos de produto, os pontos de origem, os pontos de destino e os volumes movimentados. As previsões de movimentação têm natureza contínua, de forma que cada indicação de

volume movimentado não irá, necessariamente, ser compatível com o tamanho de lotes usualmente praticados no mercado, com o lote associado a um tamanho de navio ou com um lote mínimo economicamente viável. Ao longo do processo de Planejamento de Transporte Marítimo, são realizadas reuniões com equipes de outras áreas da empresa e estes fluxos são validados, sendo feitos ajustes quando necessário.

Características operacionais dos navios são obtidas a partir de valores históricos, valores contratuais e valores usualmente adotados na indústria, para cada classe de navio. Dentre as características operacionais relevantes para o dimensionamento do número de navios, destacam-se a capacidade de transporte do navio, a velocidade de navegação em carga e em lastro e o consumo de combustível.

Para cada porto, é determinado quais tipos de navios podem realizar operações de carga e descarga de produtos. O volume máximo para cada tipo de operação, em geral, é delimitado pelo tamanho do navio, por restrições de tancagem em terra ou pela profundidade da lâmina de água que restringe o calado do navio. A duração das operações de carga e descarga têm impacto na quantidade de navios demandada pela empresa e é usualmente obtida pela análise de valores históricos. Os tempos de carga e descarga também podem ser calculados pelo somatório dos tempos das atividades que compõe a operação portuária, como o tempo em fila de espera para liberação do berço, tempo de atracação e desatracação e o tempo de bombeio do navio para o terminal ou do terminal para o navio. Os custos da operação portuária para cada porto e o tipo de navio são fornecidos pela gerência que realiza o controle dessas despesas.

Para o cálculo do custo de cada viagem, são utilizadas previsões do mercado de fretes, tanto para navios TCP, como navios VCP. Tais previsões são elaboradas internamente, com base em relatórios de mercado e fundamentos macroeconômicos. Existe relação entre os níveis de mercado TCP e VCP. Contratos TCP mais curtos tendem a se aproximar mais da remuneração obtida no mercado VCP no período correspondente, enquanto contratos TCP quem têm maior duração estão, em geral, associados a tendências de longo prazo e são mais afetados pelo custo de capital do navio. Também são componentes do custo da viagem: as despesas portuárias citadas acima e o custo do consumo de combustível, que é calculado com base na distância navegada, no consumo de combustível diário para

o tipo de navio utilizado e no custo de cada tipo de combustível, esse fornecido pelo departamento de *Marketing* e Comercialização.

O modelo busca a composição da frota contratada e a combinação de diferentes viagens que possibilitem atender a demanda de transporte indicada com o menor custo possível.

Ao avaliar as possibilidades de composição de frota TCP, o modelo considera uma frota inicial e define as novas contratações necessárias. A frota inicial é composta pelos navios já contratados, cujo custo e data de término do contrato já são sabidos. Os novos contratos TCP podem visar a atender a um incremento na demanda de transporte ou repor a saída da frota de um navio contratado anteriormente. O custo dos novos contratos está associado à previsão mercado de afretamento em TCP para o período em que é feita a contratação, sendo que esta previsão de mercado é distinta para diferentes durações de contrato TCP. Assim, o modelo não apenas calcula uma quantidade de navios necessária, como também gera indicações de que tipos de contratos devem ser realizados para renovação da frota, se enquadrando na classificação de *Fleet Renewal Problem*, apresentada por (Pantuso et al., 2014).

Além da frota TCP o modelo também define quais viagens serão realizadas em VCP. As viagens VCP são contratadas para atender a necessidade de transporte que ocorre em períodos específicos, dessa forma podem atuar de forma complementar ao TCP, para absorver variações na demanda. Contudo, em situações em que o mercado de fretes de VCP seja mais vantajoso que o TCP, é possível que o modelo opte por contratar menos navios em TCP e por realizar mais viagens VCP.

Ao fim do processo, as indicações do modelo de dimensionamento da frota são analisadas e são elaborados um detalhamento da frota por tipo de navio e de contrato, além de um plano de contratação para os navios TCP ao longo do ano.

### **3.4. Questões Levantadas no Dimensionamento Atual**

A minimização dos custos por meio da ferramenta atualmente utilizada, considerados os aspectos determinísticos das premissas adotadas, pode resultar na indicação de frotas que exponham a empresa a riscos. Tais riscos podem, por sua vez, ser representados por ociosidade e/ou indisponibilidade de determinado tipo

de navio. Ademais, podem ser destacados como fontes de incertezas para o dimensionamento da frota: (i) a variabilidade na demanda de derivados de petróleo, principalmente na situação de crise econômica; (ii) a incerteza nas origens da importação e nos destinos de exportação no transporte de longo curso, que podem afetar a quantidade e os tipos de navios utilizados; (iii) a volatilidade do mercado de fretes; e (iv) as incertezas operacionais que impactam na produtividade da frota, com destaque para o tempo de operação no terminal portuário, em função de filas.

Outro ponto de atenção na abordagem atual diz respeito à natureza contínua dos fluxos definidos no planejamento tático para o horizonte de tempo utilizado no dimensionamento da frota. A programação linear adotada traduz fluxos contínuos em quantidades de viagens fracionárias e essas, em quantidades de navio fracionárias, que podem falhar em representar a situação real.

Soluções de roteirização podem ajudar a tratar essa questão. No entanto, as soluções adotadas por outros setores da empresa estudada consideram o horizonte de tempo muito curto para subsidiar o dimensionamento da frota.

## 4 Descrição do Modelo Proposto

Para dar suporte ao dimensionamento da frota de navios tanque, foi desenvolvido um modelo de otimização estocástica que busca minimizar os custos de transporte de uma determinada quantidade de produto, considerando incertezas na demanda de transporte e no mercado de afretamento para as viagens VCP.

O modelo consiste na representação dos deslocamentos dos navios para atender as necessidades de transporte por via marítima de diferentes produtos e nas decisões de contratação para compor a frota de navios necessária para tais transportes. Tal modelo se baseia nos trabalhos de Vieira(2014) e Santos et al. (2017), que tratam do mesmo tema.

O modelo buscou representar, como premissas, as informações disponíveis pelo departamento que realiza a atividade de Planejamento do Transporte Marítimo na empresa estudada. Sendo definidas as principais incertezas associadas às premissas utilizadas.

### 4.1. Detalhamento do Modelo Proposto

O planejamento das contratações em TCP pode ser entendido como o principal resultado do dimensionamento da frota, uma vez que se trata de navios cujo início do processo de contratação é motivado diretamente pelo Planejamento do Transporte Marítimo, e estes navios permanecem na frota por toda a duração do contrato. Os contratos VCP, ao contrário, somente são contratados quando já estão definidos a carga que será transportada e o seu respectivo destino.

O horizonte de tempo que é considerado para a tomada de decisões de dimensionamento da frota é subdividido em períodos. A duração em dias de cada período é um parâmetro do problema, podendo ser definida como meses, trimestres, anos, etc.

O modelo desenvolvido consiste em uma otimização estocástica de dois estágios (Higle, 2005) conforme descrito na Seção 2.4. No primeiro estágio são definidas as indicações de contratação em TCP para o horizonte analisado. Estes mesmos contratos TCP serão considerados em todos os cenários probabilísticos analisados. Cabe destacar que a modelagem adotada não busca apenas definir um tamanho de frota TCP ideal para ser utilizada ao longo de todo o horizonte analisado. O objetivo aqui é entender a frota disponível como um conjunto de contratos TCP independentes, com datas de início, datas de término e custos de *hire* próprios. Assim, a cada período de tempo considerado no modelo, há a possibilidade de se adicionar novos contratos TCP para aumentar a frota ou para repor um contrato que tenha terminado. O modelo também permite considerar uma frota inicial correspondente a contratos que foram realizados antes do horizonte analisado. Assim, o modelo se enquadra na classificação de *Fleet Renewal Problem*, apresentada por (Pantuso et al., 2014).

As decisões de segundo estágio consistem na definição das viagens, tanto em navios TCP quanto VCP, que serão realizadas para atender à necessidade de transporte prevista. Para as viagens em navios TCP é utilizada a frota estabelecida pelo primeiro estágio do problema. Os navios VCP são contratados em cada período para atender a demanda específica de transporte deste período.

Na modelagem adotada, os deslocamentos de navios realizados para atender a necessidade de transporte de cada período são divididos em pernadas. Uma pernada representa o deslocamento de um navio, entre um porto de origem e um porto de destino. Assim, em um grafo, os portos correspondem aos nós e os trajetos percorríveis a arcos que conectam dois nós. A decisão de se realizar uma pernada com um tipo de navio em determinado período implica que uma determinada quantidade de produto poderá ser transportada naquele arco, naquele período. Essa quantidade de produto movimentada é limitada pela capacidade volumétrica do navio e por restrições dos portos de carga e descarga.

Para determinar a quantidade adequada de navios necessária, é preciso representar também as pernadas de reposicionamento do navio, as quais são navegadas em lastro, sem transportar produtos. A modelagem matemática, apresentada na Seção 4.2, a seguir, garante que todas as viagens realizadas por navios TCP farão parte de ciclos, nos quais uma sequência de pernadas de determinado navio, sejam elas em carga ou em lastro, sempre retornará ao ponto de

partida. Para as viagens VCP, o controle do navio está nas mãos do armador e as pernadas navegadas em lastro não são relevantes para o problema, contudo, para representação do custo, foi considerado um ciclo composto por uma perna com carga seguida por uma viagem de retorno em lastro ao ponto de partida

A demanda de transporte considerada no modelo é específica de cada cenário probabilístico considerado. São utilizadas previsões de fluxos, como aquelas fornecidas pelo processo de Planejamento do Abastecimento, conforme descrito na Seção 3.2.

As indicações de movimentação de produtos estão sujeitas, contudo, a incerteza. Mudanças no cenário político e econômico, na regulamentação ou nos preços do mercado internacional podem causar variações na demanda de produtos ou na economicidade de determinadas operações. As incertezas na previsão dos fluxos de produtos são representadas através da utilização de cenários distintos, cada um correspondendo a um conjunto de diferentes movimentações de produtos.

Neste estudo os produtos são agrupados em categorias associadas às especificações dos navios utilizados no seu transporte. Após o transporte de um derivado escuro, o tanque do navio deve ser lavado para que um derivado claro possa ser transportado, resultando em um período sem que os tanques possam ser utilizados e em custos adicionais. Por este motivo, os navios que transportam derivados claros e os que transportam derivados escuros são tratados como grupos distintos, e o tamanho de cada frota calculada separadamente, em rodadas distintas do modelo.

Outro elemento importante para a elaboração do dimensionamento da frota é são os preços mercado de transporte marítimo. As variações nos mercados de afretamento por viagem ou por período afetam a decisão de qual tipo de contrato será realizado ou até mesmo em qual classe de navio será mais vantajosa para um determinado transporte. Tanto o mercado de fretes VCP quanto o TCP estão sujeitos à incerteza, no entanto o mercado VCP apresenta maior volatilidade (Stopford, 2009), sendo escolhido, portanto, como parâmetro estocástico na modelagem proposta. Novamente, são utilizados cenários distintos para diferentes comportamentos do mercado de fretes VCP.

Os mercados TCP e VCP são representados no modelo pelo *hire* TCP e pelo TCE respectivamente. Os custos de *hire* de cada contrato ocorrem nos períodos que este contrato está ativo. Os custos associados ao TCE nas viagens VCP são correspondentes à duração da viagem, em dias, e consideram tanto a viagem com

carga quanto a viagem de retorno em lastro correspondente. A modelagem considera que os navios TCP podem ser contratados a cada período. Estes contratos podem ter durações distintas, estabelecidas como parâmetro de entrada do modelo.

No modelo os custos de *bunker* e as despesas portuárias são tratados como parte dos custos operacionais da viagem, havendo diferença entre as pernadas em carga e em lastro. Por simplificação, assumiu-se que as despesas portuárias e de combustível são constantes dentro do horizonte analisado e não variam entre os cenários. Também são diferenciadas as durações das pernadas em carga e em lastro.

O modelo foi desenvolvido com auxílio da ferramenta AIMMS®, a mesma plataforma na qual o atual modelo de dimensionamento de frota utilizado na empresa foi desenvolvido. O *solver* utilizado foi o CPLEX 12.6.2.

## 4.2. Modelagem Matemática

A seguir será apresentada a formulação matemática do modelo desenvolvido, com comentários a respeito das funções de suas variáveis e restrições.

As Tabelas 3, 4 e 5, a seguir, apresentam, respectivamente, os conjuntos, os parâmetros e as variáveis de decisão utilizados no modelo proposto:

Tabela 3 – Conjuntos do Modelo Proposto

Código	Índice	Nome	Descrição
V	v	Tipos de Navios	Conjunto dos tipos de navios que irão compor a frota.
N	i, j	Nós	Conjunto de nós que representam os terminais de carga e descarga.
A		Arcos	Conjunto dos arcos conectando os nós <i>i</i> e <i>j</i>
$A_{sm}^{MOV}$		Arcos com Movimentação de Produto	Subconjuntos dos arcos( <i>i,j</i> ) entre os nós <i>i</i> e <i>j</i> que apresentam fluxo de produtos para o cenário <i>s</i> e o período <i>m</i>
$A^{LC}$		Arcos de Longo Curso	Subconjunto dos arcos( <i>i,j</i> ) entre os nós <i>i</i> e <i>j</i> que representam viagens de longo curso
P	p	Produtos	Conjunto dos Produtos a serem transportados.
S	s	Cenários	Conjunto dos cenários possíveis.
M	m, n	Períodos	Conjunto dos períodos no horizonte de planejamento.
D	d	Durações de TCP	Conjunto das durações em períodos dos contratos TCP.
K		Contratos TCP	Conjunto dos contratos com duração <i>d</i> celebrados no período <i>n</i> .
$K_m^A$		Contratos TCP Ativos	Subconjuntos do par (d,n) em que contratos com duração <i>d</i> realizados no período <i>n</i> que estão ativos no período <i>m</i> .

Fonte: o Autor

Tabela 4 – Parâmetros do Modelo Proposto

Código	Nome	Descrição	Unidade
$N^{RESTR}_{iv}$	Restrição Operacional	Define se o navio $v$ é capaz de operar no porto $i$ .	{0,1}
$N^{VOL.MAX}_{vi}$	Volume Máximo	Volume máximo que pode ser carregado ou descarregado no navio do tipo $v$ no porto $i$ .	m <sup>3</sup>
$PA^{MOV}_{ijsm}$	Arcos com Movimentação	Parâmetro que define se há movimentação de produtos planejada no arco entre os nós $i$ e $j$ , no cenário $s$ e no período $m$ .	{0,1}
$PA^{L}_{ij}$	Arcos de Longo Curso	Parâmetro que define se o arco entre os nós $i$ e $j$ está associado a uma viagem de longo curso.	{0,1}
$D_{pism}$	Demanda de Movimentação	Movimentação planejada dos produtos $p$ , no arco entre os nós $i$ e $j$ , no cenário $s$ e no período $m$ .	m <sup>3</sup>
$T^C_{vij}$	Tempo da viagem com carga.	Tempo em dias da viagem com carga, do navio $v$ do porto $i$ ao porto $j$ . Contempla o tempo de navegação e o tempo das operações portuárias de carga e descarga.	Dias
$T^L_{vij}$	Tempo da viagem em lastro.	Tempo em dias da viagem de lastro, do navio $v$ do porto $i$ ao porto $j$ . Contempla o tempo de navegação.	Dias
$C^{OP.C}_{vij}$	Custo Operacional da viagem com carga.	Custo operacional da viagem com carga, do navio $v$ do porto $i$ ao porto $j$ . Contempla o consumo de combustível na navegação e nas operações portuárias de carga e descarga, além de despesas portuárias nos portos de carga e descarga.	Dólar
$C^{OP.L}_{vij}$	Custo Operacional da viagem em lastro.	Custo operacional da viagem em lastro, do navio $v$ do porto $i$ ao porto $j$ . Contempla o consumo de combustível na navegação.	Dólar
$TCP^{HIRE}_{vdn}$	Valor do Aluguel para contrato TCP	Custo diário do contrato de Afretamento por Tempo ( $TCP$ , <i>Time Charter Party</i> ) para o navio do tipo $v$ . ( <i>Hire</i> , ou "aluguel")	Dólar/dia
$VCP^{TCE}_{vsm}$	Valor Equivalente ao Aluguel para contrato VCP	Custo diário equivalente do contrato de Afretamento por Viagem ( $VCP$ , <i>Voyage Charter Party</i> ) para o navio do tipo $v$ no cenário $s$ . ( $TCE$ , <i>Time Charter Equivalent</i> ).	Dólar/dia
$S^{PROB}_s$	Probabilidade do Cenário	Probabilidades de ocorrência do cenário $s$ .	[0,1]
$M^{DIAS}$	Dias no Período	Número de dias contidos em um período (trimestre) no qual a frota deverá ser dimensionada. Ou seja, 90 dias.	Dias
$M^{TCP}_{dmn}$	Contrato Ativo no Período	Parâmetro que define se um contrato $TCP$ com duração $d$ e contratado no período $n$ está ativo no período $m$ .	{0,1}

Fonte: o Autor

Tabela 5 – Variáveis de Decisão do Modelo Proposto

Código	Descrição	Unidade	Domínio
$x^C_{vijsm}$	Variável igual ao número de viagens com carga dos navios TCP do tipo $v$ entre os nós $i$ e $j$ no cenário $s$ do período $m$ .	Unidades	$0$ , se $PA^{MOV}_{ijsm} = 0$ $Z_+$ , se $PA^{MOV}_{ijsm} = 1$
$x^L_{vijsm}$	Variável igual ao número de viagens em lastro dos navios TCP do tipo $v$ entre os nós $i$ e $j$ no cenário $s$ do período $m$ .	Unidades	$R_+$
$w_{vijsm}$	Variável igual ao número de viagens VCP de navios do tipo $v$ entre os nós $i$ e $j$ no cenário $s$ do período $m$ .	Unidades	$0$ , se $PA^{LC}_{ij} = 0$ $R_+$ , se $PA^{LC}_{ij} = 1$
$y_{vijpsm}$	Variável igual à quantidade de produto $p$ transportada por navios do tipo $v$ entre os nós $i$ e $j$ no cenário $s$ do período $m$ .	$m^3$	$R_+$
$z^{CP}_{vnd}$	Variável igual à quantidade de contratos TCP realizados para o navio do tipo $v$ , com duração $d$ , foram contratados no período $n$ .	Unidades	$Z_+$
$z^{DISP}_{vm}$	Variável igual ao número de navios TCP do tipo $v$ que estão disponíveis no período $m$ .	Unidades	$R_+$
$CF^{TCP}_m$	Variável que representa o somatório do custo dos alugueis ( <i>hires</i> ) dos contratos TCP para cada período $m$ .	Dólar	$R_+$
$CF^{VCP}_{sm}$	Variável que representa o somatório do custo dos TCE dos contratos VCP para cada cenário $s$ e para cada período $m$ .	Dólar	$R_+$
$CF^{OP}_{sm}$	Variável que representa o somatório dos custos operacionais das viagens realizadas por navios contratados em TCP e em VCP para cada cenário $s$ e para cada período $m$ .	Dólar	$R_+$
$CF^{TOTAL}$	Variável que representa o valor esperado do custo total do transporte marítimo.	Dólar	$R_+$

Fonte: o Autor

As variáveis  $x^C_{vijsm}$  e  $x^L_{vijsm}$  representam o número de viagens de navios TCP em carga e em lastro, respectivamente, entre os portos  $i$  e  $j$  realizadas por uma embarcação do tipo  $v$ , no cenário  $s$  e no período  $m$ . A variável  $w_{vijsm}$  representa o número de viagens de navios VCP entre os portos  $i$  e  $j$  realizadas por uma embarcação do tipo  $v$ , no cenário  $s$  e no período  $m$ . As variáveis  $x^C_{vijsm}$  e  $w_{vijsm}$  somente são criadas caso exista movimentação de produto planejada para o arco  $ij$ , no mês  $m$  do cenário  $s$ .

Enquanto a variável  $x^C_{vijsm}$  é inteira não-negativa, a variável  $x^L_{vijsm}$  é apenas não-negativa. A justificativa para tal é que, na formação dos ciclos que constituem as viagens, as pernadas em lastro são utilizadas apenas para completar o ciclo, retornando ao porto de origem ou para conectar duas viagens realizadas com carga. Assim, o apesar de tais variáveis serem contínuas, elas assumirão valores inteiros

para conseguir completar os ciclos. Essa separação entre viagens com carga e em lastro permite reduzir o número de variáveis inteiras no modelo.

A Figura 2, abaixo, ilustra a separação das atividades das viagens de transporte de carga, na linha contínua, e de reposicionamento do navio, na linha tracejada. As viagens com carga e em lastro podem ser recombinadas para formar ciclos com três ou mais pernadas. Esta separação concentra as operações portuárias de carregamento e descarga nas viagens com carga e permite que a viagem de lastro funcione apenas para o reposicionamento do navio, atividade que possui tempo e custos distintos das movimentações com carga.

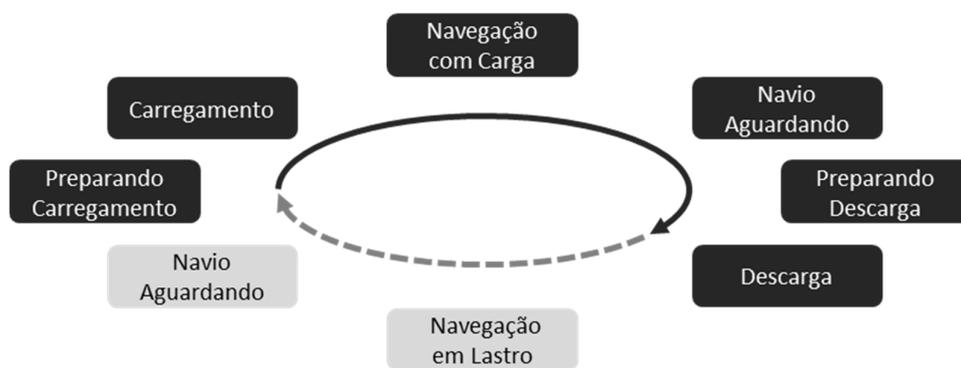


Figura 2 – Operações Associadas aos Custos e Tempos das Viagens em Carga e Em Lastro.

Fonte: o Autor

Optou-se por tratar a variável  $w_{vijsm}$  como não negativa contínua. O racional por trás de tal decisão é que, no caso real, as contratações em VCP são geralmente realizadas uma vez que o produto a ser transportado já está definido e por conta disso as viagens são realizadas com o lote cheio. O uso de uma restrição de integralidade implicaria na realização de viagens com carregamentos parciais, nas situações em que o volume de movimentação previsto não fosse equivalente ao tamanho do navio. As condições impostas ao desenho das viagens realizadas pela restrição de integralidade são mais adequadas às viagens em TCP, nas quais os navios estão sob controle da empresa contratante e a restrição do lote praticado, com destaque para a cabotagem, é mais usual.

A variável  $y_{vijpsm}$  representa a quantidade de produto  $p$  transportada por navios do tipo  $v$  entre os nós  $i$  e  $j$  no cenário  $s$  e no período  $m$ . A variável  $z_{vnd}^{CP}$  representa a quantidade de contratos TCP realizados para o navio do tipo  $v$ , com duração  $d$ , foram contratados no mês  $n$ . A variável  $z_{vm}^{DISP}$  representa o número de navios TCP

do tipo  $v$  que estão disponíveis no período  $m$ . Esta variável é resultado do somatório dos contratos realizados no mês  $n$  que estão ativos no mês  $m$ .

As variáveis  $CF^{TCP}_m$ ,  $CF^{VCP}_{sm}$  e  $CF^{OP}_{sm}$  representam, respectivamente, para cada período  $m$  e cenário  $s$ , o custo dos alugueis (*hires*) dos contratos *TCP*, o custo da parcela relativa ao *TCE* dos contratos *VCP* e os custos operacionais das viagens realizadas por navios contratados em *TCP* e em *VCP*.

A seguir é apresentada a modelagem matemática do modelo desenvolvido:

**Função Objetivo:**

$$\text{Min } CF^{TOTAL} \quad (3)$$

**Sujeito a:**

$$CF^{TOTAL} = \sum_{m \in M} CF_m^{TCP} + \sum_{s \in S} S_s^{PROB} \sum_{m \in M} (CF_{sm}^{VCP} + CF_{sm}^{OP}) \quad (4)$$

$$CF_m^{TCP} = \sum_{v \in V} \sum_{(d,n) \in K_m^A} M^{DIAS} TCP_{vdn}^{HIRE} z_{vdn}^{CP} \quad \forall m, (d,n) \in K_m^A \quad (5)$$

$$CF_{sm}^{VCP} = \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} VCP_{vsm}^{TCE} (T_{vij}^C + T_{vji}^L) w_{vijsm} \quad \forall s, m \quad (6)$$

$$CF_{sm}^{OP} = \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (x_{vijsm}^C C_{vij}^{OP,C} + x_{vijsm}^L C_{vji}^{OP,L} + w_{vijsm} (C_{vij}^{OP,C} + C_{vji}^{OP,L})) \quad \forall s, m \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N} x_{vijsm}^C + \sum_{i \in N} x_{vijsm}^L = \sum_{i \in N} x_{vjism}^C + \sum_{i \in N} x_{vjism}^L \quad \forall v, j, s, m \quad (8)$$

$$\sum_{v \in V} y_{vijpsm} = D_{pijms} \quad \forall i, j, p, s, m \quad (9)$$

$$\sum_{p \in P} y_{vijpsm} \leq N_{vi}^{VOL,MAX} (x_{vijsm}^C + w_{vijsm}) \quad \forall v, i, j, s, m \quad (10)$$

$$\sum_{p \in P} y_{vijpsm} \leq N_{vj}^{VOL,MAX} (x_{vijsm}^C + w_{vijsm}) \quad \forall v, i, j, s, m \quad (11)$$

$$z_{vm}^{DISP} = \sum_{(d,n) \in K_m^A} z_{vdn}^{CP} \quad \forall v, m \quad (12)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (x_{vijsm}^C T_{vij}^C + x_{vijsm}^L T_{vji}^L) \leq M^{DIAS} z_{vm}^{DISP} \quad \forall v, s, m \quad (13)$$

$$x_{vijsm}^C \geq 0 \text{ e inteiro} \quad \forall v, i, j, s, m, (i,j) \in A^{MOV}_{sm} \quad (14)$$

$$x_{vijsm}^L \geq 0 \quad \forall v, i, j, s, m \quad (15)$$

$$w_{vijsm} \geq 0 \quad \forall v, i, j, s, m, (i,j) \in A^{LC} \quad (16)$$

$$y_{vijpsm} \geq 0 \quad \forall v, i, j, p, s, m \quad (17)$$

$$z_{vdn}^{CP} \geq 0 \text{ e inteiro} \quad \forall v, d, n \quad (18)$$

O objetivo do modelo apresentado é minimizar o valor esperado para custo total do transporte marítimo de derivados claros de petróleo (3).

O cálculo do valor esperado para o custo total é expresso na restrição (4). Nesse modelo, o custo total é composto pelo custo de aluguel contratos TCP (*hire*), pelo custo equivalente ao aluguel para contratos VCP (TCE) e pelo custo operacional para viagens de navios contratados em TCP e VCP. As decisões de contratação de navios em TCP são tomadas no momento inicial, com o objetivo de definir uma frota TCP que vale para todos os cenários. Os custos de TCE e custos operacionais são específicos de cada cenário, portanto, no cálculo do custo total, esses custos são ponderados pela probabilidade de ocorrência de cada cenário.

O custo dos alugueis dos navios TCP de cada mês, expresso pelas restrições (5), é resultado do somatório dos alugueis para os contratos que estão ativos neste mês. O somatório é feito considerando o conjunto  $K^A_m$ , que fornece a lista dos contratos realizados no mês  $n$  que estarão ativos no mês  $m$ .

As restrições (6) definem, para cada cenário e para cada mês, o resultado do somatório do produto do TCE pelo número de dias da viagem redonda utilizados por cada tipo de navio.

De forma similar, a restrição (7) define os custos operacionais para cada cenário e para cada mês, como resultado do somatório do produto do custo de cada arco viajado com carga ou em lastro pelo custo do respectivo arco.

A restrição (8) garante que para cada cenário, para cada mês e cada tipo de navio, o número de viagens em arcos que terminam em determinado nó é equivalente ao número de viagens em arcos que iniciam neste mesmo nó, sejam estas viagens com carga ou em lastro. Assim, as viagens realizadas em arcos façam parte de ciclos onde o navio termina por retornar ao ponto de origem.

A restrição (9) garante o atendimento da demanda planejada.

As restrições (10) e (11) garantem que as viagens entre dois portos são suficientes para transportar o volume de produto indicado pelo planejamento da demanda. O volume transportado em cada viagem e em cada tipo de navio é definido com base nas restrições dos portos de origem (10) e de destino (11).

As restrições (12) definem, para cada período do horizonte de planejamento, a quantidade disponível de cada tipo de navios contratados em TCP. Esta quantidade de navios disponíveis é resultado da quantidade e da duração dos contratos realizados no mês ou em meses anteriores.

As restrições (13) garantem que a quantidade de navios TCP disponíveis é suficiente para realizar as viagens em TCP necessárias, levando-se em conta a duração de cada viagem.

As restrições (14), (15), (16), (17) e (18) definem o domínio das variáveis de decisão do modelo. As restrições (16) restringem a criação da variável  $w_{vijsm}$  a pernadas onde  $i$  ou  $j$  sejam portos estrangeiros, desta forma, não é permitida a cabotagem em viagens VCP.

No capítulo a seguir, serão descritos os casos analisados e será detalhado como foram trabalhados os dados utilizados como parâmetros do modelo matemático.

## 5 Aplicação do Modelo e Análise de Resultados

No Capítulo 4 foi descrito o modelo matemático utilizado neste estudo para o dimensionamento da frota. Este capítulo, abordará os parâmetros utilizados na modelagem e os resultados obtidos. Inicialmente, serão apontados aspectos mais gerais a respeito dos parâmetros utilizados para a alimentação do modelo e dos resultados obtidos na otimização. A seguir, serão abordados os dois casos estudados, cada um retratando o transporte de uma categoria de produto diferente. Primeiro, no caso do transporte de produtos claros, serão apresentados os parâmetros utilizados e os resultados obtidos com a aplicação do modelo. A seguir serão apresentados premissas e resultados do caso do transporte de produtos escuros. Por fim, serão discutidos aspectos relacionados à otimização dos casos estudados e será feita a avaliação do ganho obtido com a utilização da otimização estocástica para tratar este problema.

### 5.1. Descrição Geral dos Parâmetros dos Casos Analisados

Como descrito anteriormente, o dimensionamento da frota tem como premissa a previsão de movimentação de produtos resultante do Planejamento do Abastecimento, que, periodicamente, produz um cenário de planejamento de médio prazo, com horizonte de 5 anos. Esta rodada foi utilizada no caso estudado pois permite avaliar do impacto da realização de contratos TCP com durações distintas. Este horizonte de tempo é mais extenso do que aqueles atualmente utilizados nos estudos de dimensionamento para a frota utilizada na cabotagem de derivados de petróleo na empresa estudada, que, em geral, consideram um período de 12 ou 18 meses em sua análise. Contudo, por questões computacionais, para reduzir o tamanho do modelo, os períodos foram considerados como sendo trimestres no lugar de meses. Adicionalmente, para reduzir o número de variáveis no modelo,

portos que movimentavam volumes pequenos passam a ser representados por um porto com maior movimentação na mesma região geográfica.

A modelagem considera que um navio dedicado ao transporte de uma determinada categoria de produto pode carregar, em uma mesma viagem, tipos diferentes de produtos desta categoria. Assim, por exemplo, um navio dedicado ao transporte de produtos claros pode levar, de um mesmo porto de origem a um porto de destino, quantidades de gasolina e de nafta, desde que a soma dos volumes transportados esteja dentro da capacidade do navio para aquela viagem. Este fato implica que, na modelagem adotada, todos os produtos de uma mesma categoria podem ser tratados como um mesmo produto. Assim, para simplificação da alimentação dos dados, os volumes transportados serão identificados apenas pelo nome da categoria de produtos, por exemplo: produtos claros e produtos escuros.

Como explicado no Capítulo 4, as pernadas em lastro são utilizadas para reposicionar os navios, conectando o ponto final de uma pernada com carga ao ponto inicial de uma pernada com carga, de forma a “fechar” os ciclos que continuam as viagens utilizadas. Seria interessante para o modelo contar com a representação de pernadas em lastro conectando quaisquer dois pontos distintos. Contudo, devido à quantidade de portos existente, tal representação pode resultar em um aumento significativo do número de variáveis do problema. Para reduzir o número de arcos representando as pernadas em lastro foram criados nós intermediários adicionais, funcionando como *hub* para conectar regiões geográficas distintas. Assim, portos geograficamente distantes são conectados pelos seus *hubs* e não diretamente.

Os casos de claros e de escuros consideraram diferentes tipos de incertezas nas previsões de movimentação de produtos. O caso do transporte de produtos claros avaliou os impactos na frota de navios da incerteza da demanda nacional de derivados de petróleo. Além do cenário original, foram gerados, pela equipe que realiza o Planejamento do Abastecimento, dois cenários adicionais considerando uma redução e um aumento de 2% no consumo de derivados de petróleo, sendo tal grandeza sugerida pela própria equipe que realiza o Planejamento do Abastecimento. Já o caso do transporte de produtos escuros tratou da incerteza do destino dos fluxos de exportação de óleo combustível, que pode ocorrer, por exemplo, por causa da variação do preço deste produto em diferentes mercados internacionais. O cenário original considerou Cingapura como principal destino de

exportação e foi criado um cenário adicional que considerava que parte do volume entregue em Cingapura era deslocado para o porto de Rotterdam.

Uma breve comparação entre os casos estudados pode ser feita analisando-se a Figura 3, abaixo. Nesta figura estão representados os volumes movimentados para os cenários de valor esperado para os casos de movimentação de produtos claros e de produtos escuros. Estas movimentações estão segregadas por tipo: cabotagem, exportação ou importação. Como ilustração das distinções entre os dois casos analisados, pode ser observado que o volume movimentado de produtos claros é significativamente maior do que o de produtos escuros. Nos fluxos de produtos claros, as importações são uma grande parcela do volume total. Já nos fluxos de produtos escuros, as exportações são mais significativas.

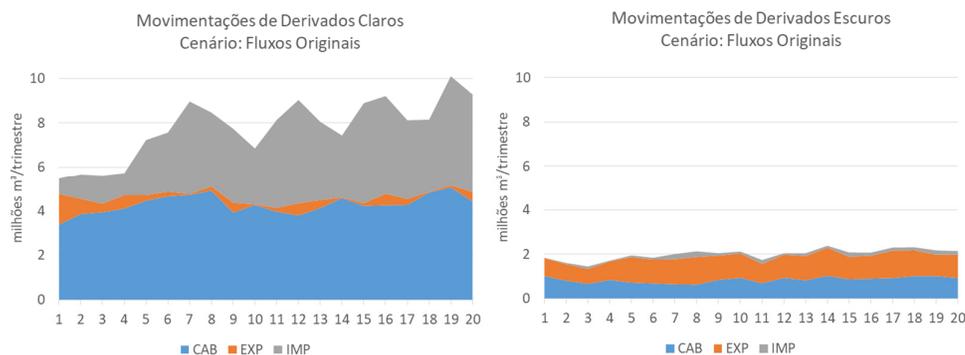


Figura 3 – Fluxos originais de produtos claros e escuros. Fonte: o Autor

As previsões de mercado de afretamento TCP e VCP utilizadas nestes casos são calculadas com base em relatórios de mercado fornecidos por uma empresa de consultoria de transporte marítimo. Para tal, foi utilizada a realização do mercado de 2018 e previsões trimestrais para o período de 2019 a 2022. Para representar a incerteza no mercado de fretes VCP, além de um cenário com o valor de TCE indicado no relatório, foram criados dois cenários adicionais. Por exemplo, no caso de claros, em um destes cenários o TCE tem redução de 10% e no outro há um aumento de 10%.

Assim, os cenários utilizados para retratar a incerteza no modelo são obtidos pela combinação de um “cenário de fluxos” e de um “cenário de mercado VCP”. Estes cenários resultantes são representados por um par ordenado: No caso de produtos claros, o primeiro algoritmo representa diferentes cenários de fluxos (1 =

base, 2 = redução da demanda e 3 = aumento da demanda). O segundo algoritmo representa os cenários de mercado VCP (1 = base, 2 = redução e 3 = aumento). Assim, por exemplo, o cenário (2,3) corresponde ao cenário que considera redução no mercado interno de derivados e aumento no mercado VCP. O caso base analisado corresponde ao cenário (1,1). Como premissa, assumiu-se que os cenários obtidos são equiprováveis.

Limitou-se a capacidade do modelo de escolher contratos de três anos no último ano da análise e contratos de cinco anos nos últimos três anos avaliados. O objetivo foi evitar que fossem considerados contratos cuja maior parte da duração estivesse fora do horizonte estudado.

Para elaboração dos tempos de duração das viagens com carga e em lastro, além de seus respectivos custos operacionais, foram segregadas as operações envolvidas em uma viagem redonda, com um porto de carregamento, um porto de descarga e com o retorno ao porto de origem em lastro. Os custos e tempos associados a cada operação foram calculados com base em velocidades de navegação e consumo de combustível utilizados pelo departamento de planejamento de frota, assim como as despesas portuárias e preços de combustível.

Após a alimentação dos parâmetros na plataforma AIMMS<sup>®</sup>, foram realizadas as otimizações, buscando-se definir quais combinações de contratações de navios e de viagens a serem realizadas, são capazes de atender a necessidade de transporte dos cenários estocásticos desenvolvidos com o menor custo.

As otimizações foram rodadas em um computador com processador *Intel(R) Core (TM) i5-7400 CPU @ 3.00GHz* com memória *RAM* de 16 GB. O solver utilizado foi o CPLEX 12.6.2. A introdução de uma solução inicial foi útil para encontrar melhores soluções na otimização em menor tempo. Boas soluções iniciais puderam ser obtidas utilizando-se a solução de um único cenário ou de um subconjunto de cenários.

Posteriormente à otimização, foi possível aprimorar o resultado obtido com o uso de novas rodadas do otimizador mantendo-se fixos os valores das variáveis  $z^{CP}$  (navios contratados) ou das variáveis  $x^C$  (viagens realizadas).

Nas Seções 5.2 e 5.3 a seguir serão detalhados os dois casos estudados nesta dissertação.

## **5.2. Caso de Produtos Claros**

A cabotagem de produtos claros é o tipo de movimentação que representa o maior número de transportes individuais dentro do planejamento da logística do transporte marítimo da empresa. Tais movimentações são compostas pelo transporte de diferentes tipos de produtos para o atendimento de mercados abastecidos pelos terminais no litoral brasileiro e no rio Amazonas.

Como consequência, as movimentações de cabotagem de produtos claros, em conjunto com as movimentações de longo curso, demandam um número significativo de navios. Apesar do maior volume, os lotes médios de produtos claros transportados por via marítima costumam ser inferiores aos lotes de produtos escuros, uma vez que esses derivados, em sua maior parte, visam atender a um mercado consumidor que está distribuído por todo o país. No modelo, os navios utilizados para a cabotagem de produtos claros são os navios das classes MR 2 e MR 1. Na realidade, existem movimentações de menor volume que são realizadas em navios menores, porém estes fluxos ocorrem entre conjuntos específicos de terminais e por isso podem ser separados e considerados um problema distinto.

### **5.2.1. Premissas do Caso de Produtos Claros**

Nesta seção serão apresentadas, com maior detalhe, as premissas de movimentação de produtos e de mercado de fretes para o caso de produtos claros.

#### **5.2.1.1. Volume movimentado**

Como descrito na Seção 5.1, foram criados três cenários para a movimentação de produtos claros. A Figura 4, a seguir, ilustra as premissas adotadas para os fluxos de cabotagem. A linha preta representa o cenário base. As linhas cinza escura e cinza clara representam, respectivamente, as sensibilidades com redução de 2% e com aumento de 2% do consumo de derivados. Para os fluxos de cabotagem, a diferença entre os volumes movimentados em cada cenário é pequena – uma variação média inferior a 2% do volume em relação ao cenário original. Contudo,

na maioria dos períodos, o cenário de maior demanda implica também em um volume maior movimentado.

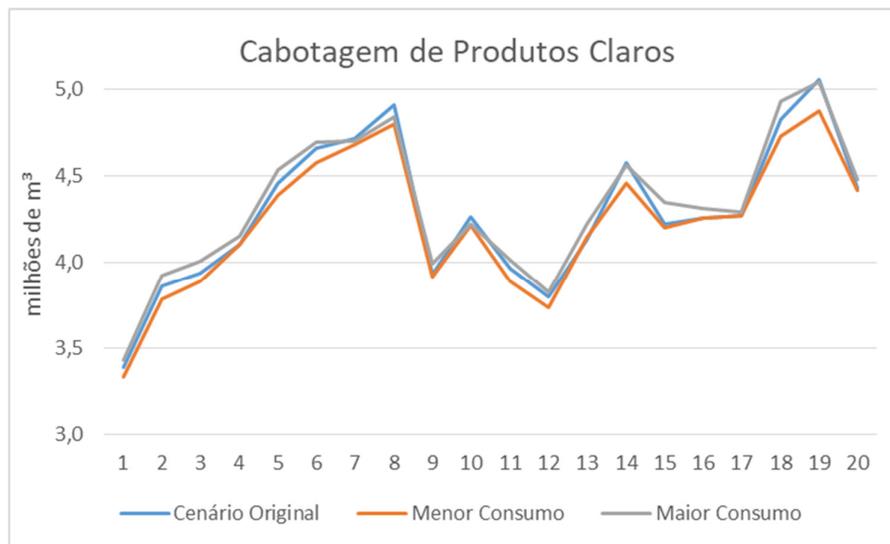


Figura 4 – Volume movimentado em cabotagem. Fonte: o Autor

Já a Figura 5, a seguir, indica as previsões de movimentação de produtos de longo curso utilizadas nos cenários analisados. Novamente, a linha azul representa o cenário base. As linhas de cor laranja e cinza representam, respectivamente, as sensibilidades com redução de 2% e com aumento de 2% do consumo de derivados. O impacto da variação da demanda interna de derivados nos fluxos marítimos de longo curso previstos é mais evidente a partir do segundo ano, quando um aumento no consumo nacional de derivados resulta em um aumento nas importações desta categoria de produtos.

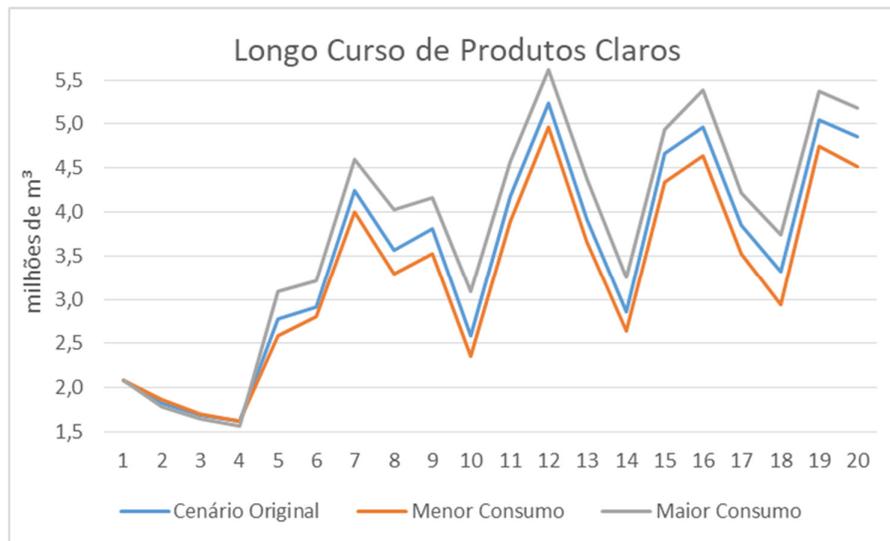


Figura 5 – Volume movimentado no longo curso. Fonte: o Autor

A seguir serão vistas as premissas de mercado de fretes utilizadas.

### 5.2.1.2. Análise dos mercados de TCP e VCP

As premissas utilizadas para o hire TCP e para o TCE em cada trimestre no horizonte estudado, calculadas com base em relatórios de mercado, são apresentadas na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Mercados TCP e VCP no Caso de Produtos Claros

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
TCP MR 2 duração 1 ano	13,8	13,1	12,6	13,0	13,5	13,5	13,5	13,4	13,6	13,7	13,7	13,6	13,9	13,9	13,8	13,7	13,9	14,0	14,0	13,8
TCP MR 2 duração 3 anos	14,1	14,1	14,1	14,3	14,2	13,7	13,6	13,5	13,8	13,9	13,8	13,7	14,0	14,0	14,0	13,8				
TCP MR 2 duração 5 anos	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	13,8	13,8	13,7												
TCP MR 1 duração 1 ano	12,2	11,3	11,3	11,7	12,2	11,6	11,6	11,7	12,0	12,2	12,1	12,0	12,2	12,1	12,1	12,1	12,3	12,4	12,3	12,2
TCP MR 1 duração 3 anos	12,8	12,8	12,8	12,8	12,7	12,5	12,4	12,3	12,4	12,4	12,4	12,4	12,6	12,7	12,6	12,5				
TCP MR 1 duração 5 anos	13,0	13,0	13,0	13,0	12,9	12,7	12,7	12,6												
TCE MR 2 cen. base	9,9	8,1	6,3	10,9	13,1	12,4	11,9	13,4	12,5	12,8	12,7	14,5	15,0	14,2	13,6	15,3	14,1	14,5	14,3	16,4
TCE MR 2 cen. -10%	8,9	7,2	5,7	9,8	11,8	11,2	10,7	12,0	11,2	11,5	11,4	13,1	13,5	12,8	12,3	13,8	12,7	13,1	12,9	14,8
TCE MR 2 cen. +10%	10,9	8,9	6,9	12,0	14,4	13,6	13,1	14,7	13,7	14,1	13,9	16,0	16,5	15,6	15,0	16,8	15,5	16,0	15,8	18,1

Valores em mil US\$/dia. Fonte: o Autor

Segundo a premissa de mercado adotada, para os TCP de MR 2, os contratos de 1 ano de duração iniciam com um valor de *hire* um pouco mais baixo que os contratos de 3 e 5 anos de duração. A partir do segundo ano essa diferença se reduz consideravelmente. Com relação aos preços do hire TCP dos navios MR 1, a Tabela 6 mostra que esta classe de navio apresenta *hires* levemente mais baixos que os navios MR 2 e uma evolução de preço similar, embora a diferença entre os contratos de um ano e os demais seja mais destacada.

A Figura 6 abaixo permite a comparação entre as previsões de TCP e TCE para a classe MR 2 e será útil nas análises subsequentes.

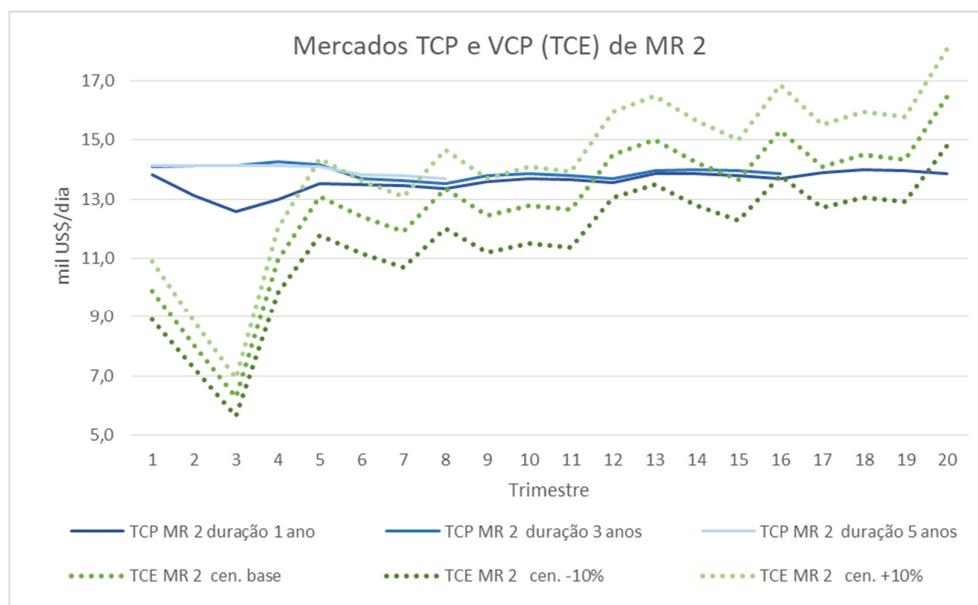


Figura 6 - Gráfico mercados TCP e TCE – Produtos Claros. Fonte: o Autor

Os contratos VCP de MR 2 apresentam TCE consideravelmente mais baixo que o valor do TCP no primeiro ano. A partir do segundo ano o TCE apresenta variação sazonal destacada. Em média, o TCE se concentra levemente abaixo dos níveis de TCP no segundo e no terceiro ano. No quarto e no quinto ano o TCE passa a apresentar cotação levemente superior ao valor do TCP. O TCE das sensibilidades de redução e de elevação do mercado tendem a se concentrar, respectivamente, abaixo e acima dos valores TCP.

Apresentadas as principais premissas do caso estudado, a seção a seguir abordará a análise dos resultados obtidos.

## 5.2.2.

### Avaliação das Soluções Apresentadas para o Transporte de Produtos Claros

Na otimização do caso dos produtos claros foi obtido uma solução com custo de US\$ 3,9 bilhões no período de 5 anos analisado, inicialmente foi obtido um GAP de otimalidade da ordem de 2%. Esta solução foi aprimorada através de otimizações adicionais em que foram “congelados”, alternadamente, os valores das variáveis referentes à contratação de navios em TCP e as variáveis referentes à realização de viagens em TCP, como mencionado na Seção 5.1.

Ainda que não tenha sido obtida solução ótima, o modelo conseguiu definir um plano de contratação que atende as demandas estabelecidas em todos os cenários. Como veremos nas seções a seguir, resultado apontado responde bem às oscilações na demanda de transporte e à evolução do mercado de fretes.

#### 5.2.2.1.

##### Frota TCP e VCP contratada

Para o caso de produtos claros foi considerada uma frota inicial, apresentada na Tabela 7, a seguir, correspondente a contratos TCP já existentes no momento em que é realizado o dimensionamento da frota.

Tabela 7 – Frota Inicial TCP no Caso de Produtos Claros

Período	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
MR 2	10	9	8	8	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4

Quantidade de navios. Fonte: o Autor

A Tabela 8, a seguir, retrata as contratações de navios TCP realizadas. Nota-se que o modelo priorizou os contratos de um ano, por possuírem *hires* em geral mais baixos, como visto anteriormente. A exceção é a realização de um contrato de 3 anos de duração no período 8, aproveitando um *hire* inferior ao patamar previsto para os contratos de 1 ano de duração nos anos seguintes.

Tabela 8 – Decisões de Contratação no Caso de Produtos Claros

Classe	Duração	Período																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
MR 2	1yr	12		3	1	21		3	17	2	7		46				54				59
MR 2	3yr								1												
MR 1	1yr	8	4		5	5	4		7	1	4		9		2		12			3	10

Quantidade de contratações TCP realizadas. Fonte: o Autor

As Tabelas 9 e 10, a seguir, mostram as com as indicações de frotas TCP e VCP. A frota TCP é retratada pelo número de navios TCP com contrato ativo no período analisado. A frota VCP é expressa pelo número de viagens realizadas no trimestre, sendo que o modelo permite a realização de uma quantidade fracionária de viagens. Cada cenário estocástico possui uma frota VCP própria.

Tabela 9 – Frota TCP utilizada no Caso de Produtos Claros

Período	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
MR 2	22	21	23	24	31	31	30	47	28	35	32	61	59	52	51	59	59	59	59	63
MR 1	8	12	12	17	14	14	14	16	12	12	12	14	13	11	11	14	14	12	15	13

Quantidade de navios TCP. Fonte: o Autor

Pode ser observado que o modelo escolheu contratar uma maior quantidade de navios MR 2 que navios MR 1. Isto pode ser explicado pois, apesar dos custos com *hire* e com a operação dos navios MR 2 serem superiores aos custos da classe MR 1, os navios MR 2 ainda são vantajosos para a maior parte do volume transportado, nos trechos em que lotes maiores podem ser praticados.

O modelo permite, em períodos de maior demanda, um aumento pontual da frota TCP, com a concentração de navios cujo contrato está terminando e de novas contratações. Tal situação ocorre no período 8, que apresenta maior volume transportado na cabotagem. Nesse período, os contratos realizados no período 5 ainda estão ativos e são realizadas 17 novas contratações, representando um aumento de 47% no número de navios MR 2 em relação ao período anterior.

A partir do período 12, há um aumento na frota TCP de MR 2. Tal aumento pode ser explicado pelo aumento do volume movimentado em conjunto com o aumento do valor do mercado de VCP, que implica na maior utilização de navios TCP nas viagens de longo curso.

A Tabela 10 mostra a quantidade de viagens VCP realizadas em cada trimestre do horizonte analisado para produtos claros, por período e por cenário.

Tabela 10 – Frota VCP Utilizada em Cada Cenário – Produtos Claros

Navio	Cenário	Período																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
MR 2	(1, 1)	27,3	24,7	17,9	5,8	28,2	30,1	63,5	17,5	50,6	21,8	59,8	10,4	5,5	4,1	46,9	10,3	5,6	3,0	37,2	5,6
MR 2	(1, 2)	26,3	24,7	17,9	5,8	28,2	30,1	63,5	17,5	50,6	21,8	59,8	10,4	6,3	4,9	46,9	10,3	5,6	3,0	37,2	5,6
MR 2	(1, 3)	26,3	24,7	17,9	3,8	28,2	30,1	63,5	17,5	50,6	21,8	59,8	9,4	5,5	4,1	45,9	10,3	5,6	3,0	37,2	5,6
MR 2	(2, 1)	25,9	25,7	17,1	6,1	23,4	28,1	57,5	11,2	44,4	17,0	53,4	4,5	2,1	2,6	41,6	3,3	2,1	1,0	31,6	2,1
MR 2	(2, 2)	25,9	25,7	17,1	6,1	23,4	28,1	57,5	11,2	44,4	17,0	53,4	5,2	2,1	2,6	41,6	3,3	2,1	1,0	31,6	2,1
MR 2	(2, 3)	25,9	25,7	17,1	4,3	23,4	28,1	57,5	12,2	44,4	16,0	53,4	4,5	2,1	2,0	41,6	3,3	1,6	1,0	31,6	2,1
MR 2	(3, 1)	26,1	26,7	20,5	2,9	34,2	35,3	70,9	29,4	59,0	32,1	66,9	14,8	16,0	15,6	55,2	17,5	14,5	12,7	43,2	11,2
MR 2	(3, 2)	26,1	26,7	20,5	2,9	34,2	35,7	70,9	29,4	59,0	32,1	66,9	14,8	16,0	16,6	56,2	17,5	14,5	12,7	42,2	12,2
MR 2	(3, 3)	26,1	26,7	20,5	2,9	34,2	35,7	70,9	28,4	59,0	32,1	66,9	14,8	16,0	14,6	56,2	17,8	14,2	12,7	43,2	12,4

Fonte: o Autor

A partir do quinto período se evidencia a tendência de os cenários de maior demanda apresentarem maiores quantidades de viagens VCP. Pode ser observado que o número de viagens VCP apresenta considerável variação a cada período de modo a absorver a sazonalidade da demanda. Em ambos os casos a quantidade de viagens VCP realizadas nos períodos 12 a 20 se situa em um patamar inferior ao intervalo do período 5 ao 11, indicando que a partir do período 12, uma parcela maior das viagens de longo curso passa a ser realizadas em navios TCP.

### 5.2.2.2. Utilização da Frota

Nesta seção, o resultado obtido na otimização será apresentado na forma de indicadores. Essas métricas podem fornecer informações qualitativas adicionais a respeito da solução alcançada e apontar oportunidades de melhoria, seja na modelagem ou na situação real.

A Tabela 11, a seguir, apresenta a separação dos navios TCP utilizados entre cabotagem e longo curso. Esta informação não estava evidente no resultado apresentado anteriormente, que apenas relatavam a quantidade total de navios. Os navios ociosos não estão representados nesses valores, embora seu custo esteja representado no custo total. O valor apresentado é a média dos cenários estocásticos. Nas movimentações de longo curso destaca-se a utilização de navios TCP de MR 2, se comparada ao uso de navios MR 1.

Tabela 11 - Utilização dos navios TCP na Cabotagem e no Longo Curso – Produtos Claros

Período	MR 2		MR 1	
	Cabotagem	Longo Curso	Cabotagem	Longo Curso
1	10,9	11,1	5,8	2,2
2	10,8	10,2	8,2	3,8
3	10,1	12,9	8,5	3,5
4	8,8	15,2	11,0	6,0
5	11,8	19,2	10,2	3,8
6	10,8	20,2	10,5	3,5
7	10,5	19,5	10,7	3,3
8	10,9	36,1	12,0	4,0
9	8,8	19,2	9,0	3,0
10	9,9	25,1	8,9	3,1
11	8,6	23,4	9,0	3,0
12	6,7	54,3	10,4	3,6
13	9,2	49,8	9,0	4,0
14	12,3	39,7	7,8	2,9
15	10,5	40,5	7,9	3,1
16	8,2	50,8	10,1	3,9
17	8,7	50,3	9,9	3,8
18	12,8	46,2	8,2	2,8
19	9,4	49,6	10,7	4,3
20	9,4	53,6	9,5	3,4

(Quantidade de navios) Fonte: o Autor

A Tabela 12, a seguir, apresenta três métricas relacionadas à eficiência da utilização dos navios TCP. Cabe destacar que são incorporadas nessas medidas as simplificações inerentes ao modelo utilizado, ou seja, a modelagem adotada será menos capaz de representar a realidade do que o seria um modelo de roteirização, por exemplo.

Tabela 12 – Indicadores de Utilização dos navios TCP – Produtos Claros

Cenários	Tempo de Utilização		Volume Utilizado		% Viagens com Carga	
	MR 2	MR 1	MR 2	MR 1	MR 2	MR 1
(1, 1)	100,0%	99,9%	62,0%	65,6%	65,5%	75,3%
(1, 2)	100,0%	100,0%	62,3%	65,3%	65,5%	75,3%
(1, 3)	100,0%	100,0%	61,8%	65,5%	65,5%	75,6%
(2, 1)	100,0%	98,0%	62,9%	63,9%	65,5%	74,9%
(2, 2)	100,0%	98,0%	62,9%	63,9%	65,5%	74,9%
(2, 3)	100,0%	98,4%	62,8%	63,9%	65,5%	74,9%
(3, 1)	100,0%	100,0%	62,0%	66,0%	65,8%	74,9%
(3, 2)	100,0%	100,0%	62,2%	66,0%	65,6%	75,0%
(3, 3)	100,0%	100,0%	61,9%	66,2%	65,7%	74,9%

Fonte: o Autor

O indicador ‘Tempo de Utilização’ mostra o percentual do tempo em que os navios ficaram realizando viagens em contraposição ao tempo que os navios ficam ociosos. Este indicador é resultado do somatório do tempo de todas as viagens, com carga e em lastro, realizadas em cada cenário, dividido pelo somatório do tempo total disponível para a frota contratada (90 dias por período por navio). A utilização foi bastante alta, principalmente para os navios MR 2, que tiveram uma ociosidade próxima de zero ao longo de todos os períodos.

O indicador ‘Volume Utilizado’ compara os lotes transportados com a capacidade máxima do navio. Os valores apresentados referem-se à divisão dos volumes totais transportados em TCP pelo volume total possível caso os navios viajassem com a sua carga máxima possível. Os resultados mostram que, para as duas classes de navios analisadas, um número significativo de viagens é realizado sem o aproveitamento total da tonelagem do navio. A realização de um lote inferior à capacidade do navio pode ocorrer por conta de restrições nos portos ou por conta de uma menor indicação de volume a ser transportado em dado período.

O indicador ‘Viagens com Carga’ se refere ao percentual do tempo que os navios dispendem em viagens com carga em relação ao tempo total de viagem. Em geral os valores resultantes devem se localizar acima de 50% pois o tempo de carga e descarga são considerados dentro do tempo da viagem com carga. Observa-se que os navios MR 1, em todos os cenários, têm um melhor aproveitamento das viagens de retorno, de forma a formar ciclos com uma menor navegação em lastro em relação ao total da viagem.

Por fim, na avaliação da resposta do modelo em relação à aleatoriedade dos parâmetros, a análise do indicador “Tempo de Utilização”, na Tabela 12, indica pouca ociosidade em todos os cenários, isso permite concluir que as variações na demanda de transporte entre os cenários foram atendidas por viagens em VCP. Em relação às variações do mercado de fretes, na Tabela 10 pode ser observado que há pouca variação na quantidade VCP indicada se comparados cenários com mesmo perfil de movimentação de derivados.

A seguir será abordado o caso da movimentação de derivados escuros de petróleo.

### **5.3. Caso de Produtos Escuros**

Embora os volumes totais movimentados de produtos escuros sejam menores que os de produtos claros, estes produtos são em geral transportados em navios maiores. O consumo destes produtos é menos fracionado e as movimentações ocorrem entre um conjunto menor de portos. Considerou-se para a cabotagem a possibilidade de utilização das classes Aframax, Panamax, MR2 e MR1. Para o longo curso, foram utilizadas as classes Aframax, Panamax e MR2. Foi considerado ainda que alguns portos não poderiam receber navios de determinadas classes, por questões operacionais ou comerciais. Assim, alterações nas origens ou destinos dos fluxos podem implicar na necessidade de utilização de classes de navios diferentes para o transporte de determinada carga.

#### **5.3.1. Premissas do Caso de Produtos Escuros**

Nesta seção serão apresentadas, com maior detalhe, as premissas de movimentação de produtos e de mercado de fretes para o caso de produtos escuros.

##### **5.3.1.1. Volume movimentado**

As Figuras 7 e 8, a seguir, mostram os dois cenários de fluxos considerados no problema. Como apresentado anteriormente, no cenário original observamos que os fluxos mais significativos são os de cabotagem e exportação, sendo que os volumes importados são menores. Nos primeiros trimestres os volumes totais são comparativamente menores. A partir do quinto trimestre, os volumes assumem um patamar um pouco mais elevado, e seguem com leve tendência de aumento. Na exportação, Cingapura se destaca como principal destino, com exceção dos períodos 6, 7 e 8, nos quais Rotterdam é o principal ponto de exportação.

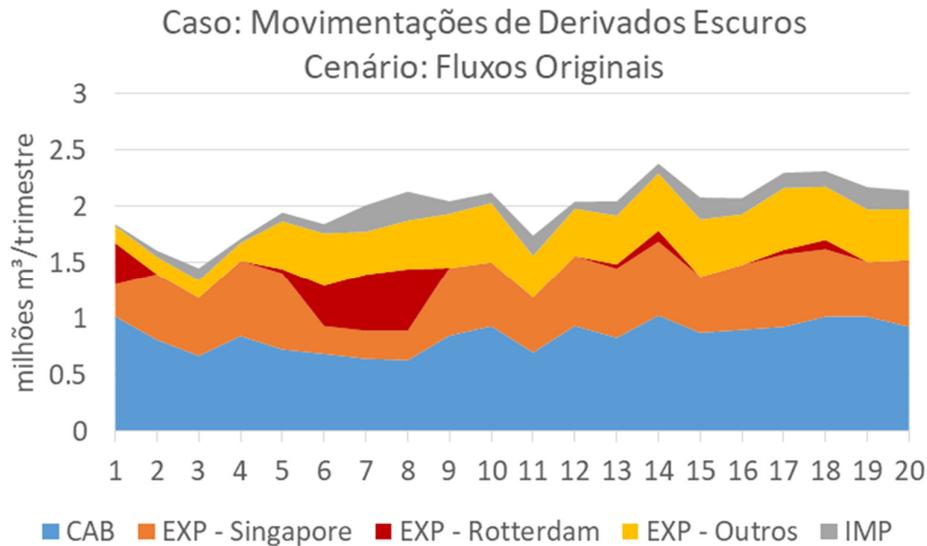


Figura 7 – Movimentações de Derivados Escuros: Fluxos Originais. Fonte: o Autor

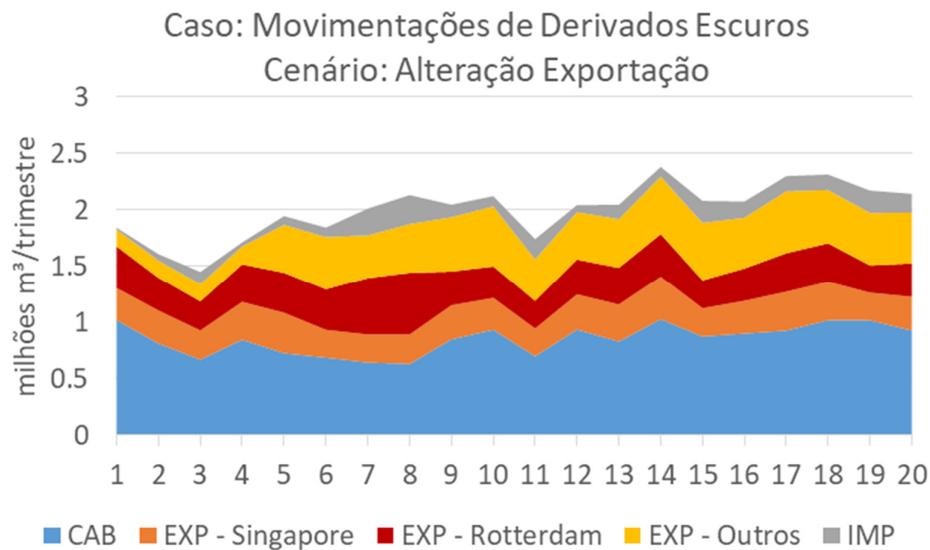


Figura 8 – Movimentações de Derivados Escuros: Alteração Exportação. Fonte: o Autor

O cenário com alteração do destino de exportação considera que pelo menos da metade do volume exportado para Cingapura no cenário de fluxos original passa a ter Rotterdam como destino. Esta modificação tem o potencial de alterar as decisões de contratação de navios apontada pelo modelo, uma vez que não apenas a distância navegada em cada situação é diferente, mas também são utilizados navios distintos para cada um destes destinos de exportação. A premissa do modelo

segue o que é observado na prática: para as viagens destinadas a Cingapura são utilizados navios Aframax e para as exportações destinadas à Europa são utilizados navios Panamax ou MR 2.

### 5.3.1.2.

#### Análise dos mercados de TCP e VCP – Produtos Escuros

O caso de produtos escuros considera uma quantidade maior classes de navios e, conseqüentemente, uma quantidade maior de mercados de TCP e VCP.

A Tabela 13, a seguir, apresenta os valores de hire TCP e de TCE utilizados. Mais adiante, serão utilizados gráficos para melhor ilustrar as evoluções dos mercados de transporte marítimo para as diferentes classes de navio.

Tabela 13 – Mercados TCP e VCP no Caso de Produtos Escuros

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
TCP Aframax duração 1 ano	14,7	13,6	14,2	17,3	18,4	15,5	15,7	18,7	18,6	19,0	19,4	22,8	22,5	18,9	19,1	22,8	20,0	20,4	20,9	24,6
TCP Aframax duração 3 anos	16,8	17,0	17,0	17,2	18,0	17,8	18,0	21,4	20,3	19,4	19,8	23,4	22,1	19,8	20,1	23,8				
TCP Aframax duração 5 anos	17,3	17,3	17,3	17,6	18,4	18,8	19,1	22,6												
TCP Panamax duração 1 ano	13,1	12,8	12,6	13,3	14,2	12,8	12,9	14,2	14,3	14,5	14,7	16,2	17,8	16,0	16,1	17,8	16,6	16,8	17,1	18,8
TCP Panamax duração 3 anos	14,9	14,4	14,4	14,4	14,6	14,4	14,5	16,1	16,2	15,8	15,9	17,6	17,7	16,6	16,7	18,4				
TCP Panamax duração 5 anos	14,9	14,6	14,6	14,6	15,1	15,4	15,5	17,1												
TCP MR 2 duração 1 ano	13,8	13,1	12,6	13,0	13,5	13,5	13,5	13,4	13,6	13,7	13,7	13,6	13,9	13,9	13,8	13,7	13,9	14,0	14,0	13,8
TCP MR 2 duração 3 anos	14,1	14,1	14,1	14,3	14,2	13,7	13,6	13,5	13,8	13,9	13,8	13,7	14,0	14,0	14,0	13,8				
TCP MR 2 duração 5 anos	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	13,8	13,8	13,7												
TCP MR 1 duração 1 ano	12,2	11,3	11,3	11,7	12,2	11,6	11,6	11,7	12,0	12,2	12,1	12,0	12,2	12,1	12,1	12,1	12,3	12,4	12,3	12,2
TCP MR 1 duração 3 anos	12,8	12,8	12,8	12,8	12,7	12,5	12,4	12,3	12,4	12,4	12,4	12,4	12,6	12,7	12,6	12,5				
TCP MR 1 duração 5 anos	13,0	13,0	13,0	13,0	12,9	12,7	12,7	12,6												
TCE-AFRAMAX Cen.1 e 3	9,9	9,5	13,6	31,9	29,1	21,7	19,1	27,6	26,8	22,6	20,2	28,7	28,0	20,8	18,3	26,5	28,1	23,8	21,2	30,1
TCE-AFRAMAX Cen.2	11,9	11,4	16,3	38,3	35,0	26,0	22,9	33,1	32,1	27,1	24,2	34,4	33,6	25,0	22,0	31,8	33,7	28,5	25,4	36,1
TCE-PANAMAX Cen.1 e 2	8,0	6,8	7,7	16,4	21,0	14,9	13,3	18,5	17,8	15,6	14,2	19,5	20,9	14,9	13,3	18,4	19,1	16,7	15,2	20,8
TCE-PANAMAX Cen.3	9,6	8,2	9,3	19,6	25,2	17,9	16,0	22,2	21,4	18,7	17,0	23,3	25,1	17,8	15,9	22,1	22,9	20,0	18,2	25,0
TCE-MR 2 Cen.1	11,9	9,7	7,5	13,1	15,7	14,9	14,3	16,0	14,9	15,4	15,2	17,4	18,0	17,1	16,4	18,4	16,9	17,4	17,2	19,7
TCE-MR 2 Cen.2	10,7	8,7	6,8	11,8	14,1	13,4	12,9	14,4	13,4	13,8	13,7	15,7	16,2	15,4	14,7	16,5	15,2	15,7	15,5	17,8
TCE-MR 2 Cen.3	13,1	10,6	8,3	14,4	17,3	16,4	15,7	17,6	16,4	16,9	16,7	19,1	19,8	18,8	18,0	20,2	18,6	19,2	18,9	21,7

Valores em mil US\$/dia. Fonte: o Autor

A Figura 9, a seguir, apresenta os valores do mercado TCP para as classes Aframax e Panamax. É observada sazonalidade e tendência de aumento dos das cotações no horizonte analisado para ambas as classes.

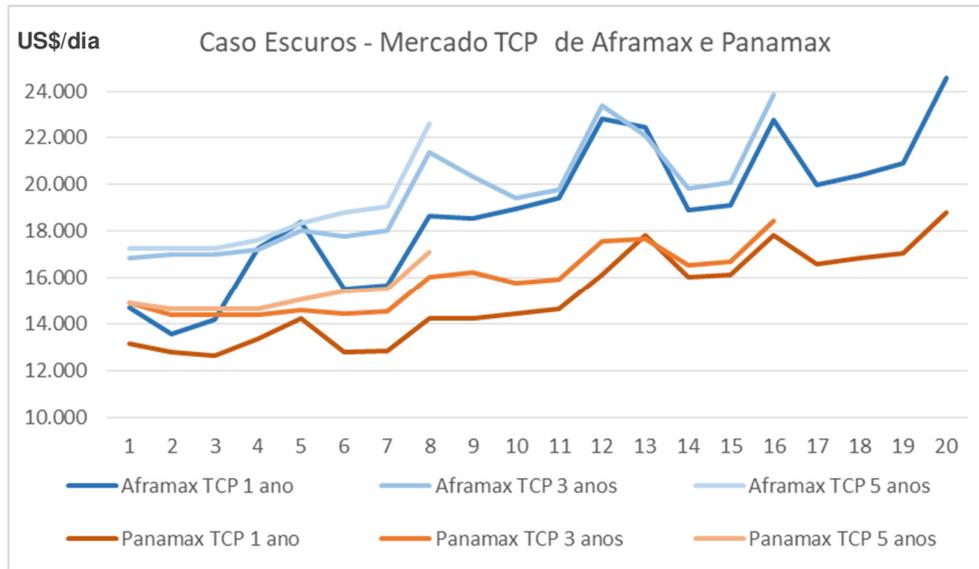


Figura 9 – Gráfico Mercado TCP – Aframax e Panamax - Escuros (US\$/dia). Fonte: o Autor

A Figura 10, a seguir, apresenta os valores do mercado TCP para as classes MR 2 e MR 1. Para estas classes, tanto a sazonalidade quanto a tendência de aumento do mercado são mais moderadas. Em todas as classes, contratos de menor duração apresentaram cotações mais baixas. Na maior parte dos períodos navios de maior porte apresentam custos de aluguel diário mais elevado, sendo que os valores da classe Panamax se aproximam dos valores de MR 2.

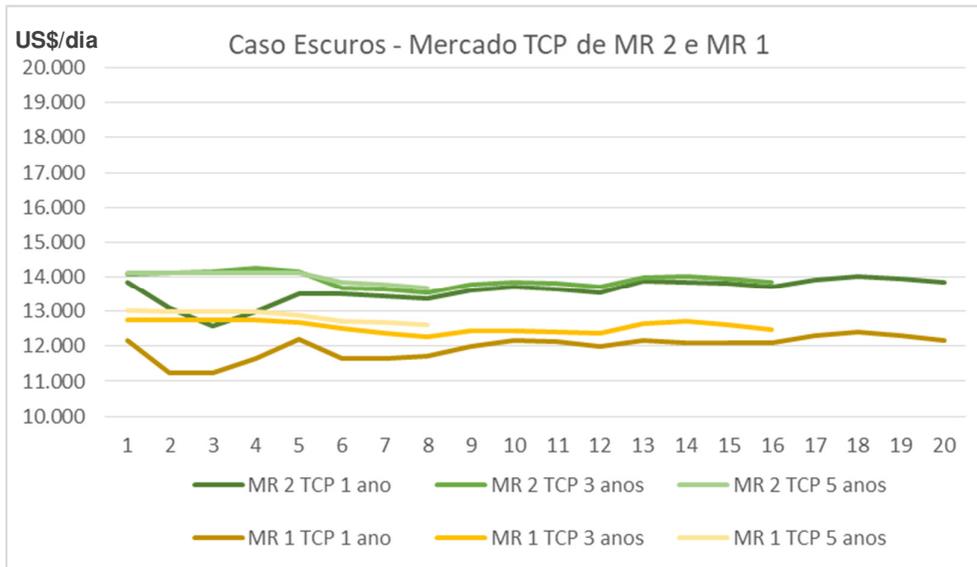


Figura 10 – Gráfico Mercado TCP – Aframax e Panamax - Escuros (US\$/dia). Fonte: o Autor

A Figura 11, a seguir, apresenta os valores de TCE nos cenários originais para as classes Aframax, Panamax e MR 2. Para este caso, considerou-se que, além do frete do cenário base (cen. 1), os navios Aframax apresentam elevação de 20% em um cenário de fretes (cen. 2) e os navios Panamax apresentam elevação de 20% no terceiro cenário (cen. 3). Como no caso de produtos claros, os navios MR 2 consideram, além dos níveis de fretes do caso base, um cenário de aumento de 10% e um com redução de 10% nas cotações de TCE previstas. No caso dos VCP as cotações de Panamax por vezes ficam no mesmo patamar das cotações de MR 2.

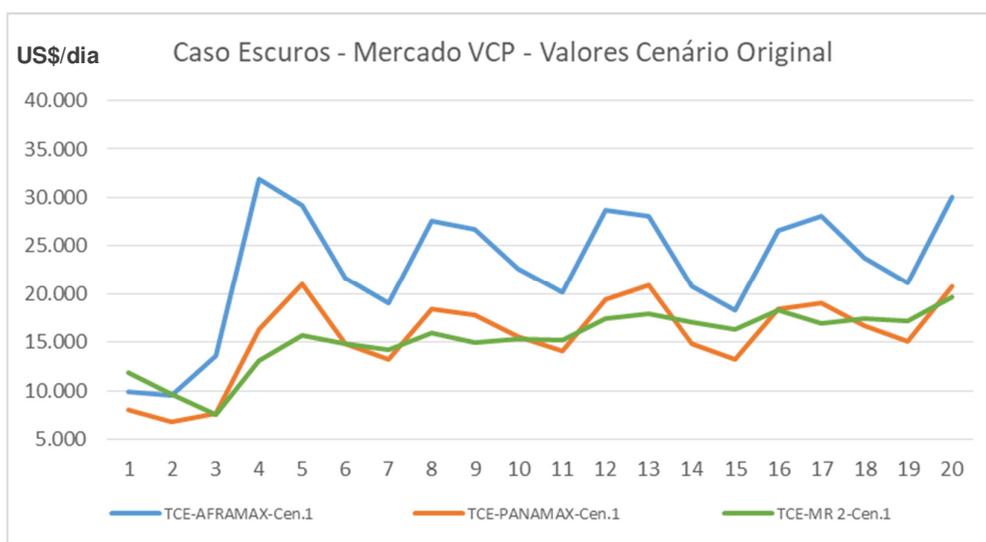


Figura 11 – Gráfico Mercado VCP – Produtos Escuros (US\$/dia). Fonte: o Autor

Na comparação da cotação TCP com a VCP, observa-se que a previsão do aluguel diário equivalente dos fretes VCP se situa, em geral, em patamares superiores ao aluguel dos contratos TCP para uma mesma classe de navios.

### 5.3.2.

#### **Avaliação das Soluções Apresentadas para o Transporte de Produtos Escuros**

Foi obtido, para o caso dos produtos escuros, uma solução com custo de US\$ 882 milhões no período de 5 anos analisado, inicialmente foi obtido um GAP de otimalidade da ordem de 3,9%. Como no caso de produtos claros, esta solução foi aprimorada através de otimizações adicionais em que foram “congelados”, alternadamente, os valores das variáveis referentes à contratação de navios em TCP e as variáveis referentes à realização de viagens em TCP

Como será visto a seguir, o modelo conseguiu fornecer uma solução de frota que reduzisse o risco associado às incertezas consideradas.

#### 5.3.2.1.

##### **Frota TCP e VCP contratada**

A Tabela 14 a seguir retrata as contratações de navios TCP indicadas pelo modelo.

Tabela 14 – Decisões de Contratação no Casos de Produtos Escuros

Classe	Dur.	Período																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
AFRAMAX	1yr		3							1					1			1			
AFRAMAX	5yr				3																
PANAMAX	1yr	1				2		1				1			1				1		
PANAMAX	3yr						1														
MR 2	1yr	1			1	3			1	2			1	3					4	1	
MR 1	1yr	6				4				5				5					5		

Fonte: o Autor

Novamente, o modelo priorizou os contratos de um ano, por possuírem *hires* em geral mais baixos, além de facilitarem o ajuste da quantidade de navios de acordo com a demanda. A exceção são as contratações de Aframax por 5 anos no período 4 e de Panamax por 3 anos no período 6. Estas contratações permitem o

aproveitamento, por um intervalo de tempo maior, dos fretes baixos observados nos primeiros períodos do horizonte analisado.

As Tabelas 15 e 16, a seguir, apresentam as indicações de frotas TCP e VCP, como visto no caso anterior. Cada cenário estocástico possui uma frota VCP própria. A Tabela 15, abaixo, apresenta a quantidade de navios TCP com contratos ativos, de cada classe e em cada período.

Tabela 15 – Frota TCP Utilizada no Caso de Produtos Escuros

Classe	Período																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
AFRAMAX		3	3	6	6	3	3	3	4	4	4	4	3	4	4	4	5	4	4	4
PANAMAX	1	1	1	1	2	3	4	4	2	2	2	2	2	3	2	2	3	1	1	1
MR 2	1	1	1	2	4	4	4	4	3	3	3	3	4	4	4	3	4	5	5	5
MR 1	6	6	6	6	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Fonte: o Autor

O modelo opta por trabalhar com uma frota menor nos três primeiros períodos, acompanhando a menor demanda. Outro ponto de destaque é que, nos primeiros dois anos do horizonte, o mercado VCP inicialmente baixo e as alterações nos destinos de exportação fazem com que o modelo altere bastante a composição da frota, priorizando a contratação de classes diferentes em momentos distintos. Não foi considerada frota inicial para o caso de produtos escuros. Os navios Panamax apresentam maior utilização no intervalo entre os períodos 6 e 8, se ajustando à menor demanda de exportação para Cingapura e aproveitando a previsão de menores fretes no início do horizonte analisado. Já a redução nos últimos períodos da utilização de Panamax em TCP, em conjunto com uma maior utilização de navios MR 2, está alinhada com o aumento das cotações dos *hires* de Panamax em comparação com a classe MR 2. No primeiro ano o modelo prioriza a utilização de navios MR1 na cabotagem, sendo os fluxos de longo curso atendidos por uma quantidade proporcionalmente maior de navios VCP.

A Tabela 16, a seguir, mostra a quantidade de viagens VCP realizadas em cada trimestre do horizonte analisado, para cada classe de navio e para cada cenário.

Tabela 16 – Frota VCP Utilizada em Cada Cenário – Produtos Escuros

Classe	Cen.	Período																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
AFRAMAX	(1, 1)	3,6	3,4	2,6	0,8	1,0	0,4			2,7	2,2	1,3	3,0	3,9	3,4	1,5	2,5	1,3	2,8	1,4	2,7
AFRAMAX	(1, 2)	3,6	3,4	2,6	0,8	1,0	0,4			2,7	2,2	1,3	3,0	3,9	3,4	1,5	2,5	1,3	2,8	1,4	2,7
AFRAMAX	(1, 3)	3,6	3,4	2,6	0,8	1,0	0,4			2,7	2,2	1,3	3,0	3,9	3,4	1,5	2,5	1,3	2,8	1,4	2,7
AFRAMAX	(2, 1)	3,6	0,7	0,3			0,4			0,2	0,2	0,3	0,3	0,8	0,7	0,4	0,2		0,4	0,4	0,2
AFRAMAX	(2, 2)	3,6	0,7	0,3			0,4			0,2	0,2	0,3	0,3	0,8	0,7	0,4	0,2		0,4	0,4	0,2
AFRAMAX	(2, 3)	3,6	0,7	0,3			0,4			0,2	0,2	0,3	0,3	0,8	0,7	0,4	0,2		0,4	0,4	0,2
PANAMAX	(1, 1)	10,5	0,3	0,5	0,4	0,6	2,8	2,3	1,8	0,5	0,6	0,2	0,6	0,6	1,2	0,4	0,3		3,1	2,3	1,3
PANAMAX	(1, 2)	10,5	0,3	0,5	0,4	0,6	2,8	2,3	1,8	0,5	0,6	0,2	0,6	0,6	0,7	0,4			3,1	2,3	1,3
PANAMAX	(1, 3)	10,5	0,3	0,2	0,4	0,6	2,8	2,3	1,8	0,5	0,6	0,2	0,6	0,6	0,7	0,4			1,8	1,7	1,3
PANAMAX	(2, 1)	10,5	6,2	5,0	2,9	3,8	2,8	2,3	1,8	1,8	6,7	2,8	2,1	3,1	4,3	4,6	4,3	3,7	6,1	4,6	4,0
PANAMAX	(2, 2)	10,5	6,2	2,2	2,9	3,8	2,8	2,3	1,8	1,8	4,4	2,3	2,1	3,1	4,3	4,6	2,9	2,8	5,2	4,6	4,0
PANAMAX	(2, 3)	10,5	6,2	2,2	2,9	3,8	2,8	2,3	1,8	1,8	4,4	2,8	2,1	3,1	4,3	4,6	2,9	1,1	5,2	4,6	4,0
MR 2	(1, 1)	0,3	0,7	0,4						0,4			0,3	0,1	0,2		0,4	0,0		0,4	
MR 2	(1, 2)	0,3	0,7	0,4						0,4			0,3	0,1			0,7	0,0		0,4	
MR 2	(1, 3)	0,3	0,7	0,4						0,4			0,3	0,1			0,7	0,0		0,4	
MR 2	(2, 1)	0,3			1,5	1,6				3,2		0,3	1,9	0,9	0,2	0,6	0,4	0,8		0,4	1,4
MR 2	(2, 2)	0,3		2,8	1,5	1,6				3,2	2,3	0,9	1,9	0,9	0,2	0,6	1,8	1,8	0,9	0,4	1,4
MR 2	(2, 3)	0,3		2,8	1,5	1,6				3,2	2,3	0,3	1,9	0,9	0,2	0,6	1,8	2,8	0,9	0,4	1,4

Fonte: o Autor

Cabe destacar a maior utilização de VCP no primeiro período, quando a frota TCP encontrava-se reduzida. Na Tabela 16, se evidencia que as variações entre os cenários de fluxos analisados (Cenário 1: maiores exportações para Cingapura e Cenário 2: Parte das exportações são deslocadas para Rotterdam) são atendidas com o uso da frota VCP, mesmo em uma situação em que as cotações dos *hires* TCP se encontram em valores inferiores aos TCE nas classes Aframax e Panamax.

Outro ponto notado na Tabela 16, ao se comparar diferentes cenários, é que há substituição entre as classes Panamax e MR 2 nas viagens de longo curso, em função das variações dos mercados de frete. Comparando-se as viagens VCP realizadas os períodos 3, 10 e 18, pode ser observada a substituição de viagens em Panamax no cenário (2,1) por viagens em MR 2 no cenário (2,2), no qual as cotações de TCE são mais baixas.

### 5.3.2.2. Utilização da Frota

Como no caso de produtos claros, serão utilizados indicadores para analisar aspectos qualitativos do resultado obtido na otimização.

A Tabela 17, a seguir, apresenta como a frota TCP está distribuída na cabotagem e no longo curso. O valor apresentado é a média dos cenários estocásticos. Os navios ociosos não estão representados nesses valores, embora seu custo esteja representado no custo total. Percebe-se que os navios Aframax e Panamax apesar de serem utilizados principalmente no longo curso, realizam eventuais viagens de cabotagem. Os navios MR 2 são utilizados em ambos os tipos de movimentação e o navio MR 1 é o principal navio utilizado na cabotagem.

Tabela 17 – Navios TCP Utilizados na Cabotagem e no Longo Curso – Produtos Escuros

Período	AFRAMAX		PANAMAX		MR 2		MR 1	
	LC	CAB	LC	CAB	LC	CAB	LC	CAB
1	0,0	0,0	0,7	0,3	0,3	1,2	2,2	3,1
2	2,6	0,3	0,8	0,2	0,5	0,5	1,9	3,5
3	2,6	0,2	0,9	0,0	0,5	0,5	2,0	3,6
4	5,0	0,3	0,8	0,1	1,3	0,6	2,0	3,5
5	5,0	0,2	1,8	0,0	2,5	1,3	1,5	2,4
6	1,8	0,4	3,0	0,0	2,6	1,3	1,5	2,5
7	2,6	0,3	3,9	0,1	3,0	0,9	1,4	2,6
8	2,6	0,3	3,9	0,0	3,5	0,5	1,2	2,6
9	3,4	0,2	1,7	0,2	2,1	0,9	1,7	2,9
10	3,4	0,2	1,8	0,2	1,9	1,1	1,6	3,4
11	3,0	0,2	1,8	0,1	2,3	0,5	1,6	3,3
12	3,4	0,4	1,7	0,2	1,5	1,0	1,7	3,2
13	2,6	0,3	1,8	0,2	2,7	1,1	1,5	3,1
14	3,4	0,4	2,5	0,5	2,5	1,4	1,5	3,0
15	3,0	0,3	1,9	0,0	2,9	1,0	1,7	3,3
16	3,4	0,2	1,7	0,3	2,3	0,7	1,6	3,2
17	4,6	0,2	2,8	0,2	2,9	1,0	1,7	3,2
18	3,4	0,3	1,0	0,0	3,3	1,6	1,6	3,2
19	3,0	0,3	0,9	0,0	3,5	1,5	1,5	3,3
20	3,4	0,3	0,9	0,0	3,8	1,2	1,7	3,3

Fonte: o Autor

Na Tabela 18, a seguir, assim como no caso de produtos claros, são apresentados três indicadores elaborados a partir do resultado obtido pelo modelo.

Tabela 18 – Indicadores de Utilização dos navios TCP – Produtos Escuros

Cen.	Tempo de Utilização				Volume Utilizado				Viagens com Carga			
	Afra.	Pana.	MR 2	MR 1	Afra.	Pana.	MR 2	MR 1	Afra.	Pana.	MR 2	MR 1
(1, 1)	93%	97%	95%	93%	65%	85%	65%	76%	54%	63%	80%	66%
(1, 2)	92%	97%	96%	93%	65%	85%	65%	76%	54%	63%	80%	66%
(1, 3)	93%	96%	96%	94%	64%	85%	65%	76%	54%	64%	80%	66%
(2, 1)	88%	98%	99%	98%	49%	83%	72%	76%	54%	65%	79%	66%
(2, 2)	88%	98%	99%	98%	49%	83%	71%	76%	54%	66%	79%	66%
(2, 3)	88%	98%	99%	99%	49%	83%	72%	76%	54%	65%	79%	66%

Fonte: o Autor

O indicador ‘Tempo de Utilização’ mostra o percentual do tempo em que os navios ficaram realizando viagens em contraposição ao tempo que os navios ficam ociosos. Os valores obtidos para todos os cenários foram altos, apesar de inferiores aos valores obtidos no caso dos produtos claros. A principal ociosidade está associada aos cenários em que o volume exportado para Cingapura é reduzido e os navios Aframax em TCP ficam sem utilização uma parcela maior do tempo.

O indicador ‘Volume Utilizado’ se refere à parcela do espaço disponível em um navio que é utilizado em determinada viagem. Os resultados mostram que, um número significativo de viagens é realizado sem o aproveitamento total da tonelage do navio. A classe Panamax apresentou o melhor desempenho nesta análise, seguida pela classe MR 1. Pode ser intuído que o navio comparativamente menor utilizado em viagens de longo curso e um comparativamente menor utilizado na cabotagem podem se adequar melhor às quantidades de movimentação de produtos previstas.

O indicador ‘Viagens com Carga’ se refere ao percentual do tempo que os navios dispõem em viagens com carga em relação ao tempo total de viagem e em contraposição ao tempo que realizam viagens em lastro. Em geral os valores resultantes devem se localizar acima de 50% pois o tempo de carga e descarga são considerados dentro do tempo da viagem com carga. Observa-se que os navios MR 2, em todos os cenários, têm um melhor aproveitamento das viagens de retorno, de forma a formar ciclos com uma menor navegação em lastro em relação ao total da viagem. Este resultado pode ser atribuído ao fato dos navios MR 2 serem possuírem uma utilização mais ampla, em uma gama maior de portos, tanto em viagens de longo curso quanto de cabotagem. Em contrapartida, os navios Aframax que estão

restritos a um conjunto menor de portos e tipos de viagem apresentam o pior resultado neste indicador.

Em suma, percebemos na Tabela 13, que o modelo utiliza VCP para responder às variações da demanda entre os dois cenários de movimentação de derivados considerados. Ainda assim, a quantidade de navios Aframac contratada em TCP é tal que, nos casos em que a exportação de óleo combustível para Cingapura é menor, ocorre ociosidade nos navios desta classe, como mostra a Tabela 18. Na comparação de cenários com mesmo perfil de movimentação de derivados, na Tabela 13, pode ser observado que as variações entre os cenários de fretes previstos podem afetar a indicação de quais classes de navios serão utilizadas nas viagens VCP.

#### **5.4. Comentários Sobre a Otimização**

Assim como retratado em problemas similares na literatura (Steffensen, 2012; Pantuso, 2016), a otimização do modelo desenvolvido se mostrou computacionalmente muito demandante. Contribuíram para isso o horizonte trabalhado, a condição de integralidade das viagens em TCP e o número de viagens distintas possíveis. Os casos analisados buscaram retratar a situação real de tomada de decisão na empresa analisada, considerando, por isso, um grande número de terminais e movimentações de produtos.

Por conta do tamanho do problema, não foi obtida solução ótima para os casos analisados, sendo a duração da otimização o principal critério de parada para as rodadas de otimização realizadas. Para os casos de claros e de escuros foram realizadas rodadas de 8 horas. Testes com durações mais longas não apresentaram melhoras significativas, além de demandar uma grande quantidade de memória (mais que 40 *gigabytes* em alguns casos). O *gap* de otimalidade atingido variou de acordo com as características do problema, como será comentado a seguir.

O problema considerou dois tipos de variáveis inteiras, a contratação de navios,  $z^{CP}$ , e a realização de viagens com carga,  $x^C$ . Quando qualquer um dos dois tipos de variável foi “congelado” o solver conseguiu, com facilidade, atingir uma

solução ótima. É a atuação conjunta dessas variáveis que torna o processo de otimização oneroso.

As variáveis  $z^{CP}$  ocorrem em menor quantidade, totalizando algumas dezenas ou poucas centenas. As variáveis  $x^C$  ocorrem em grandes números – milhares a dezenas de milhares – pois representam as viagens para diversos arcos, em diversos períodos e em diversos cenários probabilísticos. Para uma frota definida, a realização de uma viagem pode ser avaliada considerando cada par de período e cenário isoladamente. Quando as viagens realizadas e a contratação da frota são avaliadas em conjunto, a realização de uma viagem pode afetar a frota contratada de um navio, que por sua vez pode gerar impactos nas contratações de outros navios, assim como em viagens realizadas em outros períodos e em outros cenários.

A capacidade de o modelo se aproximar de uma solução ótima se mostrou particularmente sensível a variações na quantidade de tipos de navios analisados, o que representa um aumento no número de variáveis  $z^{CP}$ . O caso de produtos escuros, mesmo possuindo um número menor de portos, de movimentações previstas e um número total de variáveis inteiras menor, obteve um *gap* de otimalidade maior do que o caso de produtos claros.

## **5.5. Avaliação do Ganho da Solução Estocástica**

Como descrito no Capítulo 2, Kall & Wallace (1994) e Birge e Louveaux (2011) nos fornecem ferramentas para avaliar o desempenho do modelo estocástico desenvolvido.

Em adição à solução do RP (*Recourse Problem*), o modelo estocástico desenvolvido, foram também calculadas as soluções para o WS (*Wait and See*) e EEV (*Expected Value of Expected Solution*) para os dois casos analisados. O WS e o EEV são problemas matemáticos mais simples que o RP, uma vez que não consideram múltiplos cenários possíveis simultaneamente na otimização. Os resultados são apresentados na Tabela 19:

Tabela 19 – RP, WS e EEV para os casos analisados

	WS	RP		EEV		
	US\$	US\$	% WS	US\$	%RP	% WS
Caso Claros	3.926.612.387	3.940.764.319	0,36%	3.940.551.172	-0,01%	0,35%
Caso Escuros	869.546.020	881.960.722	1,43%	887.964.106	0,68%	2,12%

Fonte: o Autor

Pode ser observado, com base nos percentuais que comparam a solução do RP com a do WS, que o EVPI, *Expected Value of Perfect Information*, é baixo em ambos os casos. O mesmo ocorre na comparação do EEV com o RP, que nos leva a concluir que o VSS, *Value of Stochastic Solution* é baixo. Na verdade, o resultado obtido para o caso de produtos claros aparenta desrespeitar o sistema de inequações apresentado por Birge e Louveaux (2011), como visto na Seção 2.4. Tais inequações determinam que o resultado da solução do WS deverá possuir um valor inferior ao da solução do RP. A solução RP, por sua vez, deverá ter uma solução de menor valor que a solução EEV.

O que ocorre neste caso é que as inequações são válidas para as soluções ótimas de cada problema. Aqui, devido ao tamanho do problema analisado, as soluções ótimas não foram obtidas para os RP, WS e EEV calculados. Em ambos os casos, o intervalo definido pelo WS e o EEV tem dimensão inferior ao GAP de otimalidade encontrado no RP (GAP de 2% para o caso de claros e de 3,9 para o caso de escuros).

Para o caso da movimentação de produtos claros, o pequeno efeito da aleatoriedade no problema e a baixa expectativa de ganho com a adoção da solução estocástica podem ser explicados por: (i) os fretes VCP e TCP estavam em patamares próximos na maior parte do horizonte avaliado, segundo a premissa de previsão de mercado adotada, de forma que a alteração entre modalidades contratuais produz pouco impacto no resultado. (ii) O caso considerou um número pequeno de classes de navios dentre as quais utilizar no transporte de produtos, o que restringiu as possibilidades de composição da frota e com isso a quantidade de soluções possíveis. (iii) na geração das previsões de movimentação de produtos, as sensibilidades de +2% e de 2% no mercado nacional de derivados gerou flutuação menor do que o esperado nos fluxos de cabotagem. A cabotagem tende a afetar mais o resultado pois estes fluxos só podem ser atendidos por navios TCP.

Para o caso dos produtos escuros, o intervalo entre as soluções WS e EEV ainda é pequeno, principalmente se comparado com o GAP, contudo foi possível observar VSS positivo, na ordem de US\$ 6,0 milhões. A alteração do destino de parte da exportação do óleo combustível, individualmente, significa um grande impacto definição da frota, contudo, como os demais fluxos de cabotagem e de longo curso permaneceram inalterados, o impacto da aleatoriedade no problema como um todo foi menos expressivo.

Este trabalho evidencia uma situação em que o uso das soluções WS e EEV, que são menos demandantes computacionalmente, pode ser utilizado para avaliar o ganho do cálculo da solução RP.

## 6 Conclusão

O dimensionamento da frota marítima é de grande importância para a indústria de óleo e gás. A frota controlada pode ser entendida como um conjunto de navios, cujos contratos possuem datas de início e término distintas. O planejamento da renovação da frota deve contemplar quais tipos de navios serão contratados ao longo do horizonte analisado, assim como as durações e custos destes contratos.

O modelo de otimização estocástica proposto é capaz de fornecer tais indicações de contratação. O modelo foi desenvolvido com base do trabalho de Santos et al. (2017). As otimizações foram rodadas em um computador com processador *Intel(R) Core (TM) i5-7400 CPU @ 3.00GHz* com memória *RAM* de 16 GB. O solver utilizado foi o CPLEX 12.6.2. Não foi obtida solução ótima nos casos avaliados, sendo que foram alcançados GAPs de 2% e 3,9%. Os casos estudados buscaram representar o problema real experimentado pela empresa avaliada, resultando em casos grandes, com uma quantidade de variáveis superior a encontrada em problemas similares na literatura. Como melhoria no modelo, o uso de heurísticas e de métodos de decomposição podem ser utilizados como forma de se obter melhores resultados (Higle, 2005).

O benefício da utilização de um modelo estocástico em relação a uma abordagem determinística foi pequeno e só pode ser observado em um dos casos analisados. Este trabalho evidencia uma situação em que o uso das soluções WS e EEV, que são menos demandantes computacionalmente, pode ser utilizado para avaliar o ganho do cálculo da solução RP.

Com relação à solução adotada na empresa estudada, o modelo aqui proposto fornece uma alternativa para considerar, no dimensionamento da frota, tanto as incertezas associadas à volatilidade inerente ao mercado de fretes marítimos quanto as incertezas na previsão dos volumes movimentados. Os casos analisados consideraram um horizonte de tempo maior que o praticado atualmente pela empresa, permitindo melhor avaliação dos impactos da adoção de contratos de duração mais longa nos custos esperados. O horizonte estudado e o número de

períodos considerado se situam dentre os maiores observados na literatura (Arslan & Papageorgiou, 2017).

## **6.1. Trabalhos futuros**

Uma avaliação futura mais detalhada, considerando perfis diferentes de fluxos e mercado de fretes poderá determinar em que condições os parâmetros do modelo proporcionariam maior valor para a solução estocástica. O modelo pode ser enriquecido com a incorporação de velocidades de navegação distintas, uma vez que a velocidade de navegação impacta o consumo de combustível e esta despesa representou uma parcela significativa dos custos totais nos casos estudados.

Ainda, como forma de reduzir o tempo de computação e melhorar a qualidade das soluções encontradas cabe considerar a utilização de heurísticas e métodos de decomposição. Em particular, dado o impacto computacional, na otimização, da utilização simultânea de variáveis representando as decisões de composição de frota e variáveis representando decisões de alocação de navios em viagens, cabe recomendar pesquisa futura que considere estas duas decisões, mas que os trabalhe de forma separada na otimização.

## **6.2. Implicações práticas**

O modelo apresentado oferece mecanismos para suportar as decisões de contratação de navios e de composição de frota em situações de incerteza das premissas. Ao considerar diferentes cenários, é possível chegar a recomendações de contratação diferentes daquelas que seriam obtidas considerando apenas um problema determinístico. Recomenda-se, contudo, a consideração da diferença entre as soluções WS e EEV como forma de definir limites superiores para o ganho a ser obtido com a utilização de modelos estocásticos para o dimensionamento da frota.

Ainda, a avaliação da solução estocástica obtida pode permitir a identificação das principais fontes de risco que impactam a solução obtida no problema de composição da frota.

## Referências bibliográficas

ALVAREZ, J. F.; TSILINGIRIS, P.; ENGBRETHSEN, E. S.; & KAKALIS, N. M. Robust Fleet Sizing and Deployment for Industrial and Independent Bulk Ocean Shipping Companies. **INFOR: Information Systems and Operational Research**. v. 49, n. 2, p. 93–107, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ), **Resolução no 1.811/2010**, 2010. Disponível em: <[http://sophia.antaq.gov.br/asp/download.asp?codigo=20647&tipo\\_midia=2&IndexSrv=1&Usuario=0&obra=6836&tipo=2&Banner=0&Idioma=0](http://sophia.antaq.gov.br/asp/download.asp?codigo=20647&tipo_midia=2&IndexSrv=1&Usuario=0&obra=6836&tipo=2&Banner=0&Idioma=0)> Acesso em 21 jan. 2019.

ARNESEN, M. J.; GJESTVANG, M.; WANG, X.; FAGERHOLT, K.; THUN, K.; RAKKE, J. G. A traveling salesman problem with pickups and deliveries, time windows and draft limits: Case study from chemical shipping. **Computers & Operations Research**, v. 77, p. 20-31, 2017.

ARSLAN, A.N.; PAPAGEORGIU, D.J. Bulk ship fleet renewal and deployment under uncertainty: A multi-stage stochastic programming approach. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**. v. 97, 2017.

BAKKEHAUG, R.; EIDEM, E. S.; FAGERHOLT, K.; HVATTUM, L. M. A stochastic programming formulation for strategic fleet renewal in shipping. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**. v. 72, p. 60–76, 2014.

BIRGE, J.R.; LOUVEAUX, F. **Introduction to stochastic programming**. [s.l.]:Springer Science & Business Media, 2011.

BRASIL. Lei nº 9.432, de 8 de janeiro de 1997. Dispõe sobre a ordenação do transporte aquaviário e dá outras providências. **Diário Oficial da União** - Seção 1 - 9 jan. 1997, p. 4. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9432.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9432.htm)>. Acesso em 26 nov. 2017.

BRITISH PETROLEUM (BP), **BP Statistical Review Of World Energy** 2018. London: [s.n.], 2018.

CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K.; NYGREEN, B.; RONEN, D. Chapter 4 Maritime Transportation. **Handbooks in Operations Research and Management Science**. [s.l.]: North Holland, 2007. p. 189-284.

CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K.; NYGREEN, B.; RONEN, D. Ship routing and scheduling in the new millennium, **European Journal of Operational Research**. v. 228, n. 3, p. 467–483, 2013.

DIZ, G. S. dos S.; DO CARMO, L. F. R. R. S.; ROCHA, R. Proposta de um sistema de suporte à decisão para programação de navios baseado em otimização: um caso prático. **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. p. 2126–2137. Rio de Janeiro, 2012.

EHLERS, S.; PACHE, H.; VON BOCK UND POLACH, F.; JOHNSEN, T. A Fleet Efficiency Factor for fleet size and mix problems using particle swarm optimisation. **Ship Technology Research**. v. 66, n. 2, p. 106–116, 2018.

FAGERHOLT, K., Optimal fleet design in a ship routing problem. **International Transactions in Operational Research**. v. 6, n. 5, p. 453–464, 1999.

FAGERHOLT, K.; CHRISTIANSEN, M.; HVATTUM, L. M.; JOHNSEN, T. A.; VABØ, T. J. A decision support methodology for strategic planning in maritime transportation. **Omega**. v. 38, n. 6, p. 465–474, 2010.

FERNANDES, P. C.; LEITÃO, W. de S. **Contratos de afretamento à luz dos direitos inglês e brasileiro**. Rio de Janeiro: Renovar, 2007. 276 p.

FULLER, D. B.; ARRUDA, E. F. de; FERREIRA FILHO, V. J. M. Determinação de frota ótima de aliviadores para um conjunto de plataformas. **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. p. 2614–2624, 2013.

GUNDEGJERDE, C.; HALVORSEN, I. B.; HALVORSEN-WEARE, E. E.; HVATTUM, L. M.; NONÅS, L. M. A stochastic fleet size and mix model for maintenance operations at offshore wind farms. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. v. 52, n. 0314, p. 74–92, 2015.

HALVORSEN-WEARE, E. E.; FAGERHOLT, K. Robust supply vessel planning. **Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)**. v. 6701 LNCS, p. 559–573, 2011.

HALVORSEN-WEARE, E. E.; FAGERHOLT, K.; NONÅS, L. M.; ASBJØRNSLETT, B. E. Optimal fleet composition and periodic routing of offshore supply vessels. **European Journal of Operational Research**. v. 223, n. 2, p. 508–517, 2012.

HIGLE, J. Stochastic Programming: Optimization When Uncertainty Matters. **Emerging Theory, Methods, and Applications**. pp.30-53, 2005.

HOFF, A.; ANDERSSON, H.; CHRISTIANSEN, M.; HASLE, G.; LØKKETANGEN, A. Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing. **Computers & Operations Research**. v. 37, n. 12, p. 2041-2061, 2010.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2018**, Paris: IEA, 2018.

KALL, P.; WALLACE, S. W. **Stochastic Programming**. Chichester: John Wiley & Sons, 1994.

LAAKE, J.; ZHANG, A. Joint optimization of strategic fleet planning and contract analysis in tramp shipping. **Applied Economics**. v. 48, n. 3, p. 203–211, 2016.

MENG, Q.; WANG, T. A chance constrained programming model for short-term liner ship fleet planning problems. **Maritime Policy and Management**. v. 37, n. 4, p. 329–346, 2010.

MENG, Q.; WANG, T.; WANG, S. Short-term liner ship fleet planning with container transshipment and uncertain container shipment demand. **European Journal of Operational Research**. v. 223, n. 1, p. 96–105, 2012.

PANTUSO, G.; FAGERHOLT, K.; HVATTUM, L. M. A survey on maritime fleet size and mix problems. **European Journal of Operational Research**. v. 235, n. 2, p. 341-349, 2014.

PANTUSO, G.; FAGERHOLT, K.; WALLACE, S.W. Uncertainty in Fleet Renewal: A Case from Maritime Transportation. **Transportation Science**. v. 50, n. 2, p. 390-407, 2015.

PELIZARO, C. **Dimensionamento de frota em uma empresa de petróleo integrada**. Rio de Janeiro, 2008. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

PLUM, C. E. M.; PISINGER, D.; SIGURD, M. M. A service flow model for the liner shipping network design problem. **European Journal of Operational Research**. v. 235, n. 2, p. 378-386, 2014.

POLAT, O.; GÜNTHER, H. O.; KULAK, O. The feeder network design problem: Application to container services in the Black Sea region. **Maritime Economics and Logistics**. v. 16, n. 3, p. 343–369, 2014.

SANTOS, I. M.; HAMACHER, S.; MOAH, D. Modelo de Otimização Estocástica para Dimensionamento da Frota de Petroleiros. In **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, XLIX. Blumenau, 2017.

SARACENI, P. P. **Transporte Marítimo de Petróleo e Derivados**. 2. ed. [s.l.]: Interciência, 2012.

SHYSHOU, A.; GRIBKOVSKAIA, I.; BARCELÓ, J. A simulation study of the fleet sizing problem arising in offshore anchor handling operations. **European Journal of Operational Research**, v. 203, n. 1, p. 230-240, 2010.

STEFFENSEN, M. A. **Maritime fleet size and mix problems**. Trondheim, 2012. 83 f. Master Thesis (Mestrado em Marine Technology) - Norwegian University of Science and Technology.

STOPFORD, M. **Maritime Economics**. 3. ed. London: Routledge, 2009. 840 p.

THOMAS, J.E. (Org.) **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. 271 p.

UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT (UNCTAD). **Review of Maritime Transport 2018**. [s.l.: s.n.], 2018. Disponível em: <[https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2018\\_en.pdf](https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2018_en.pdf)> Acesso em 19 ago. 2019.

VIEIRA, A. A. S. **Dimensionamento da frota de navios de derivados claros para cabotagem : proposta de modelo de otimização**. Rio de Janeiro, 2014. 59 f. Dissertação (Mestrado) –Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial.

WANG, X; FAGERHOLT, K.; WALLACE, S. W. Planning for charters: A stochastic maritime fleet composition and deployment problem. **Omega**. v. 79, n. September, p. 54–66, 2018.

XIE, X.; WANG, T.; CHEN, D. A dynamic model and algorithm for fleet planning. **Maritime Policy and Management**. v. 27, n. 1, p. 53–63, 2000.

YERGIN, D. **The prize: The epic quest for oil, money & power**. New York: Simon & Schuster, 1991.

ZENG, Q.; YANG, Z. Model integrating fleet design and ship routing problems for coal shipping. **Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)**. v. 4489 LNCS, n. PART 3, p. 1000–1003, 2007.