

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS
NÍVEL DOUTORADO

MARCELO OLIVEIRA DE SOUZA

**COMPOSIÇÃO DE CONTRATOS DE AFRETAMENTO PARA RENOVAÇÃO DE
FROTA DE EMBARCAÇÕES DE APOIO MARÍTIMO:
Um método de otimização sob incertezas**

São Leopoldo

2019

MARCELO OLIVEIRA DE SOUZA

**COMPOSIÇÃO DE CONTRATOS DE AFRETAMENTO PARA RENOVAÇÃO DE
FROTA DE EMBARCAÇÕES DE APOIO MARÍTIMO:
Um método de otimização sob incertezas**

Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção e Sistemas, pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

São Leopoldo

2019

S729 Souza, Marcelo Oliveira de

Composição de contratos de afretamento para renovação de frota de embarcações de apoio marítimo: um método de otimização sob incertezas. / Marcelo Oliveira de Souza. – São Leopoldo, 2019.

151f.: il.;30cm.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Tese (Doutorado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, São Leopoldo, 2019.

Inclui Bibliografia: f.141-149

Inclui Apêndice

1. Afretamento marítimo. 2 Logística offshore. 3. Programação linear. 4. Programação estocástica. 5. Análise de valor. I. Rocha, Luiz Alberto Oliveira. II. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. III. Título.

CDD: 387.544

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do COMPARTILHADO/CST/SID/SBI

Bibliotecária responsável: Andrea Bueno Aniola (CRB7-5306)

*“Dedico este trabalho
aos meus pais, José Luiz e Elza,
À minha esposa, Roberta, e
À minha filha, Jéssica”*

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

Ao professor Luiz Alberto Oliveira Rocha pela orientação deste trabalho. Aos professores Miguel Afonso Sellitto, André Luis Korzenowski, Leonardo Dagnino Chiwiacowsky e Gabriel Vidor por aceitarem o convite para compor a banca examinadora.

À UNISINOS, professores, funcionários e colegas, pelo conhecimento, pela experiência e pela amizade. Em especial, a Tana Cassia Malacarne e Liliam Amorim.

À PETROBRAS pelo apoio e disponibilização de recursos para a realização das disciplinas e demais atividades acadêmicas e para a conclusão deste trabalho de tese.

Aos colegas da gerência de Logística e Otimização e da antiga Distribuição, Logística e Transporte do CENPES que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial, ao Gabriel, ao Luiz Claudio, ao Victor, ao Paulo Cesar e ao Reynaldo pelo incentivo, pelas sugestões e pelo apoio.

Às áreas de Logística, Manutenção e Suporte às Operações e de Suprimento de Bens e Serviços da PETROBRAS. Em especial, ao Pedro, à Thalita, ao Miguel, ao Bernardo e ao Celso Alexandre.

À minha família, fundamental em todos os momentos. À minha esposa, Roberta, e à minha filha, Jéssica, meus amores, pelo apoio, dedicação, carinho e paciência em todos os momentos. Aos meus pais, José Luiz e Elza, pelo amor, exemplo e dedicação. Aos meus irmãos, Marcos, Carina e Rodrigo, pela amizade e companheirismo.

A Deus, por tudo.

RESUMO

Este trabalho de tese desenvolve um método para análise e apoio à decisão no processo de renovação de frota de embarcações afretadas, dedicadas ao suprimento de unidades marítimas (UM's) de exploração e produção de petróleo e gás natural. O objetivo do método é determinar a composição mais adequada de contratos de afretamento, considerando as incertezas relacionadas à demanda e aos preços de afretamento, a fim de manter o atendimento pleno das necessidades das UM's, ao menor custo possível. Para cumprir este objetivo foi desenvolvido um método de análise e solução para o problema, que envolve: exame das informações disponíveis, modelagem do problema, estudo e implementação de estratégias de otimização sob incertezas, análise de valor e avaliação de resultados. O método foi aplicado em um problema real de uma grande empresa de petróleo e gás, que atua no Brasil, onde foram avaliados diferentes cenários de demanda e preços para se chegar ao *plano ótimo de afretamento*. A análise dos resultados obtidos mostra que as técnicas de otimização que consideram simultaneamente as incertezas na modelagem matemática do problema são as mais adequadas para a resolução de problemas como o apresentado.

Palavras-chave: Logística *Offshore*, Afretamento Marítimo; Otimização sob Incertezas; Programação Linear Inteira; Programação Estocástica; e Análise de Valor.

ABSTRACT

This thesis develops a method for analysis and decision support in the process of fleet renewal of chartered vessels, dedicated to the supply of maritime units (MU's) for oil and natural gas exploration and production. The purpose of the method is to determine the most appropriate composition of charter contracts, considering the uncertainties related to demand and chartering prices, in order to maintain complete fulfillment of MU's needs at the lowest possible cost. To perform this objective a problem analysis and solution method was developed, which involves: investigation of available information, problem modeling, study and implementation of optimization strategies under uncertainties, value analysis and results evaluation. The method was applied to a real problem of a large oil and gas company operating in Brazil, where different demand and price scenarios were evaluated to arrive at the *optimal chartering plan*. Results analysis shows that optimization techniques that simultaneously consider uncertainties in the problem mathematical modeling are the most appropriate for solving optimization problems under uncertainties.

Keywords: Offshore Logistics, Maritime Chartering; Optimization under Uncertainties; Integer Linear Programming; Stochastic Linear Programming; and Value Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Definição do problema de composição do mix de contratos de afretamento marítimo	19
Figura 2: Fluxo esquemático dos fatores mais importantes para a elaboração do plano de afretamento.....	27
Figura 3: Fluxo de materiais da cadeia de apoio offshore de uma empresa de óleo e gás	28
Figura 4: Platform Supply Vessels (PSV)	30
Figura 5: Terminal Alfandegado de Imbetiba – Macaé, RJ.....	33
Figura 6: Blocos exploratórios das Bacias do Espírito Santo, de Campos e de Santos.....	44
Figura 7: Valores médios anuais das taxas diárias de frete marítimo a termo (TCP)	48
Figura 8: Modelagem e solução do problema.....	86
Figura 9: Necessidade de novas embarcações e cobertura dos contratos de afretamento	88

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Demanda semanal por área de deck de uma unidade de produção na Bacia de Campos.....	37
Gráfico 2: Demanda semanal por área de deck de uma unidade de perfuração na Bacia de Campos.....	37
Gráfico 3: Quantidade de embarcações por tipo de embarcação	45
Gráfico 4: Quantidade de embarcações de bandeiras brasileira e estrangeira por tipo de embarcação.....	45
Gráfico 5: Número de contratos <i>spot</i> de afretamento de PSV e AHTS no Brasil	46
Gráfico 6: Valores médios mensais das taxas diárias de frete marítimo <i>spot</i> no Brasil – 2015 a 2018.....	47
Gráfico 7: Contratos de afretamento versus o “túnel de risco” de demanda.....	90
Gráfico 8: Taxas de afretamento por tipo de contrato no cenário 1	101
Gráfico 9: Taxas de afretamento por tipo de contrato no cenário 2	101
Gráfico 10: Taxas de afretamento por tipo de contrato no cenário 3	102
Gráfico 11: Evolução da demanda e das embarcações vigentes no tempo – Estratégia 1	123
Gráfico 12: Evolução da demanda e das embarcações vigentes no tempo– Estratégia 2.....	128
Gráfico 13: Evolução da demanda e das embarcações vigentes no tempo– Estratégia 3	132
Gráfico 14: Evolução da demanda e das embarcações (sem contratos <i>Spot</i>) – Estratégia 3 ..	133

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características, produtos transportáveis e uso típicos de embarcações de apoio <i>offshore</i>	35
Quadro 2: Restrições impostas por alguns países às práticas de cabotagem	39
Quadro 3: Cinco maiores empresas de navegação de apoio <i>offshore</i>	46
Quadro 4: Pesquisa bibliográfica: afretamento, afretamento marítimo e subtemas relacionados a abordagens de solução.....	54
Quadro 5: Pesquisa bibliográfica: frete marítimo e subtemas relacionados a abordagens de solução	54
Quadro 6: Número de publicações por aspecto desejado (linha) e abordagem de solução (coluna)	72
Quadro 7: Pseudocódigo da rotina de geração de cenários para os parâmetros estocásticos – Estratégia 2.....	104
Quadro 8: Pseudocódigo da rotina de cálculo das probabilidades de ocorrência dos cenários estocásticos.....	105
Quadro 9: Pseudocódigo da rotina de geração dos parâmetros estocásticos de cada cenário	105
Quadro 10: Estrutura básica dos modelos computacionais desenvolvidos	106
Quadro 11: Pseudocódigo da rotina de criação do vetor de embarcações existentes $U[t]$	108
Quadro 12: Pseudocódigo da rotina de cálculo dos valores esperados – Estratégia 1	109
Quadro 13: Pseudocódigo do módulo de otimização – Estratégia 1	110
Quadro 14: Pseudocódigo da rotina que executa o modelo de PLI para cada cenário –.....	112
Quadro 15: Pseudocódigo do módulo de otimização – Estratégia 2	112
Quadro 16: Pseudocódigo da rotina de atualização da solução – Estratégia 2	113
Quadro 17: Pseudocódigo da heurística de combinação – Estratégia 2	114
Quadro 18: Pseudocódigo do módulo de otimização – Estratégia 3	117
Quadro 19: Pseudocódigo da rotina de cálculo dos valores esperados da solução obtida para os contratos <i>spot</i> – Estratégia 2.....	118
Quadro 20: Pseudocódigo da rotina de obtenção da solução “espere e veja” (WS).....	118
Quadro 21: Resultados gerados pelo solver Gurobi – Estratégia 1	121
Quadro 22: Solução ótima obtida – Estratégia 1	122
Quadro 23: Resultados gerados pelo solver Gurobi – Estratégia 2	125
Quadro 24: Solução ótima obtida – Estratégia 2	127
Quadro 25: Resultados gerados pelo solver Gurobi – Estratégia 3	129

Quadro 26: Solução ótima obtida – Estratégia 3	131
--	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Aspectos relevantes versus publicações	67
Tabela 2: Abordagens de solução versus publicações	69
Tabela 3: Frota de embarcações PSV no Brasil.....	98
Tabela 4: Frota de embarcações PSV da empresa	99
Tabela 5: Probabilidades de ocorrência dos parâmetros estocásticos	99
Tabela 6: Demandas por embarcações	100
Tabela 7: Extrato dos valores das vars. de decisão S por cenário – Estratégia 3.....	130
Tabela 8: Esperança das soluções (FO) obtidas para cada cenário estocástico	134
Tabela 9: Cálculo do EVPI.....	134
Tabela 10: Cálculo do VSS.....	134
Tabela 11: Cálculo do VSS em relação à estratégia de solução 2	135
Tabela 12: Comparação dos resultados obtidos nas estratégias de solução	135

LISTA DE SIGLAS

ABEAM	Associação Brasileira das Empresas de Apoio Marítimo
ABEPRO	Associação Brasileira de Engenharia de Produção
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AHTS	<i>Anchor Handling and Tug Supply</i>
ANP	Agência Nacional de Petróleo e Gás Natural
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
B&B	<i>Branch-and-Bound</i>
CB	<i>Crewboat</i>
CC	Contrato por Chamada
CNUDM	Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar
CSV	Comma-Separated-Values
CVaR	<i>Conditional Value-at-Risk</i>
DSV	<i>Diving Support Vessels</i>
E&P	Exploração e Produção de petróleo e gás natural
EBN	Empresa Brasileira de Navegação
EEV	<i>Expected Result of Using the EV Solution</i>
EV	<i>Expected Value Problem</i>
EVPI	<i>Expected Value of Perfect Information</i>
FO	Função Objetivo
FPC	<i>Final Process Cost</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
LESTA	Lei da Segurança do Tráfego Aquaviário
LH	<i>Line Handling</i>
MAVCM	<i>Internet Virtual Chartering Markets</i>
MFSMP	<i>Fleet Size and Mix Problem</i>
NAIADE	<i>Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environments</i>
O&G	Óleo (petróleo) e Gás Natural
OSRV	<i>Oil Spill Response Vessel</i>
OSV	<i>Offshore Support Vessels</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PL	Programação Linear
PLE	Programação Linear Estocástica

PLI	Programação Linear Inteira
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PLV	<i>Pipe Laying Vessels</i>
PNLI	Programação Não-Linear Inteira
PNLIM	Programação Não-Linear Inteira Mista
PSV	<i>Platform Supply Vessel</i>
RLESTA	Artigo 3º do Decreto nº 2.596/98
RP	<i>Recourse Problem</i>
RV	<i>Research Vessel</i>
TCP	<i>Time Charter Party</i>
TPB	Toneladas de Porte Bruto
UEP	Unidades Estacionárias de Produção
UM	Unidade Marítima
UT	<i>Utility Boat</i>
UT	<i>Utility Boat</i>
VaR	<i>Value-at-Risk</i>
VCP	<i>Voyage Charter Party</i>
VLCC	<i>Very Large Crude Carrier</i>
VSS	<i>Value of the Stochastic Solution</i>
WEO	<i>World Energy Outlook</i>
WS	<i>Wait and See</i>
WSV	<i>Well Stimulation Vessel</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	18
1.2	OBJETIVOS.....	21
1.3	DELIMITAÇÃO	22
1.4	JUSTIFICATIVA.....	23
1.5	CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA.....	24
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	25
2	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	27
2.1	LOGÍSTICA DE APOIO ÀS UNIDADES MARÍTIMAS.....	28
2.1.1	Unidades marítimas	29
2.1.2	Embarcações de apoio	29
2.1.3	Produtos transportados	32
2.1.4	Terminais marítimos	33
2.2	DEMANDA A SER ATENDIDA.....	33
2.2.1	Demanda primária	34
2.2.2	Demanda secundária	35
2.2.3	Demanda terciária	35
2.3	REGULAMENTAÇÃO DO TRANSPORTE MARÍTIMO.....	38
2.3.1	Modalidades de navegação	38
2.3.2	Afretamento marítimo	39
2.4	PREÇOS DE AFRETAMENTO.....	42
2.5	MERCADO DE FRETE NO BRASIL.....	44
3	MÉTODO DE PESQUISA	49
3.1	ENQUADRAMENTO DA PESQUISA.....	49
3.2	DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	49
3.2.1	Formulação e análise do problema	49
3.2.2	Desenvolvimento do modelo conceitual	51
3.2.3	Desenvolvimento do modelo matemático	52
3.2.4	Definição do método de análise e solução do problema	52
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	56
4.1	PROBLEMAS DE AFRETAMENTO MARÍTIMO	56
4.2	SOLUÇÃO DE OTIMIZAÇÃO PARA PROBLEMAS SEMELHANTES	60

4.3	OUTRAS ABORDAGENS DE SOLUÇÃO PARA PROBLEMAS SEMELHANTES	63
4.4	ABORDAGENS DE SOLUÇÃO CORRELATAS	65
4.5	SÍNTESE E DISCUSSÃO	67
5	OTIMIZAÇÃO SOB INCERTEZAS.....	76
5.1	RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO	76
5.1.1	Complexidade dos modelos	76
5.1.2	Heurísticas e metaheurísticas	77
5.1.3	Programação matemática	77
5.2	RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA.....	78
5.3	MODELOS MATEMÁTICOS	79
5.3.1	Modelos determinísticos	79
5.3.2	Modelos estocásticos	80
5.4	O VALOR DA INFORMAÇÃO E DA SOLUÇÃO ESTOCÁSTICA.....	82
5.4.1	Valor Esperado da Informação Perfeita.....	82
5.4.2	Valor da Solução Estocástica	83
6	MÉTODO DE ANÁLISE E SOLUÇÃO DO PROBLEMA.....	85
6.1	ESPECIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....	86
6.2	MODELO CONCEITUAL	87
6.2.1	Parâmetros determinísticos	89
6.2.2	Parâmetros estocásticos.....	89
6.3	MODELO MATEMÁTICO.....	92
6.3.1	Modelo determinístico	94
6.3.2	Modelo estocástico	96
6.4	MÉTODO DE SOLUÇÃO.....	98
6.4.1	Análise dos dados	98
6.4.2	Geração de cenários.....	102
6.4.3	Otimização do problema	106
6.4.4	Análise de valor	118
6.5	EXPERIMENTOS.....	119
6.5.1	Modelo determinístico com valores esperados dos parâmetros estocásticos	121
6.5.2	Modelo determinístico com geração de cenários para os parâmetros estocásticos e combinação heurística dos resultados	124
6.5.3	Modelo estocástico	128

6.5.4	Análise de valor	133
6.6	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	135
7	CONCLUSÃO.....	138
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	140
	REFERÊNCIAS.....	141
	ANEXO I DISTRIBUIÇÃO DA FROTA DE EMBARCAÇÕES DE APOIO MARÍTIMO NO BRASIL.....	150
	ANEXO II CONTRATOS DE MÉDIO E LONGO PRAZOS ASSINADOS OU COM PREVISÃO DE ASSINATURA EM 2017.....	151
	APÊNDICE I ARTIGO PUBLICADO.....	152

1 INTRODUÇÃO

A principal fonte energética do mundo ainda é o petróleo, e continuará sendo, pelo menos, pelos próximos 20 a 40 anos. Segundo o World Energy Outlook 2013 (WEO), publicação anual da International Energy Agency (IEA) (IEA, 2013), a participação atual de combustíveis fósseis na matriz energética global é de 82% e, mesmo com o aumento da participação das fontes renováveis, a previsão é de que, no ano de 2035, tal percentual se reduza apenas para 75%. (Arpini, 2015; Schutz et al., 2013).

A exploração e produção de petróleo e gás (*upstream*) constituem a base da chamada indústria do petróleo. Recursos da ordem de US\$ 1,7 trilhão são investidos anualmente nessa indústria, em desenvolvimento tecnológico, na ampliação do conhecimento geológico e na formação de uma cadeia de bens e serviços que lhe dê suporte (ANP, 2018c; IEA, 2017). Se, por um lado, os volumes produzidos e movimentados neste segmento geram receitas da ordem de dezenas de bilhões de dólares anuais, por outro, os custos envolvidos também são bilionários. Em países como Brasil e Noruega, a maior parte das reservas de petróleo e gás se encontra em campos marítimos, gerando custos comparativamente maiores de produção em relação a países com reservas em solo firme, como Venezuela e Arábia Saudita. Somente o aluguel de uma sonda marítima, equipamento usado para identificar pontos de extração de petróleo no mar, custa cerca de US\$ 200 mil por dia, mas pode chegar a US\$ 500 mil por dia (IHS Markit, 2017). Em adição, para a exploração e produção em um campo marítimo, são necessárias várias dessas unidades marítimas. Como ilustração, na costa do Brasil, em julho de 2017, existiam 20 poços exploratórios concluídos e 15 poços exploratórios em atividade¹ e estavam em operação 143 Unidades Estacionárias de Produção (UEP's), dessas 62 somente na bacia de Campos (ANP, 2018b). Como evidenciado, uma unidade marítima parada significa uma perda financeira considerável, manter as unidades marítimas, funcionando e produtivas, é vital para a competitividade das empresas do setor.

Para suportar esse objetivo organizacional, a logística de suprimento das plataformas de exploração e produção de petróleo (E&P) tem papel fundamental. Os suprimentos que permitem o bom funcionamento das unidades marítimas (equipamentos, materiais, rancho,

¹ Nos poços concluídos, as atividades de exploração para determinar a existência de óleo e gás e sua viabilidade de produção já foram concluídas; nos poços em atividade, ainda não.

água, combustível, etc.) precisam estar disponíveis no tempo certo e nas quantidades necessárias.

Na logística de suprimento, o transporte marítimo merece atenção especial por parte dos tomadores de decisão, não apenas porque representa até 80% do custo total² da cadeia (Ares, 2013), mas, sobretudo, devido à complexidade das atividades e decisões envolvidas. A primeira decisão importante diz respeito à formação da frota para suprir as unidades marítimas de E&P. É preciso decidir sobre: os tipos de embarcações e as quantidades necessárias de cada uma; se os navios serão próprios ou afretados; e, se afretados, que tipos de contratos e por quais horizontes de tempo serão realizados.

Entretanto, devido aos altos custos envolvidos, empresas produtoras de óleo e gás desejam ter a menor frota possível para atender adequadamente às necessidades de suprimento de suas unidades marítimas de E&P, baseando a estratégia logística em contratos de afretamento, que podem ter durações e preços diferentes, conforme as variáveis do mercado no momento da decisão. A demanda por embarcações depende do número de unidades marítimas em atividade e do perfil de consumo de suprimentos de cada uma. Já a quantidade de unidades marítimas depende dos campos de produção e de exploração existentes ou que se deseja adquirir no futuro. Além disso, as classes e as quantidades de embarcações requeridas podem variar ao longo do tempo, em função dos atores e tecnologias disponíveis no mercado. Assim, visando garantir a manutenção dos níveis de serviço às unidades marítimas com o menor custo possível, a frota precisa ser flexível e essa flexibilidade pode ser obtida pela composição adequada de contratos de afretamento marítimo.

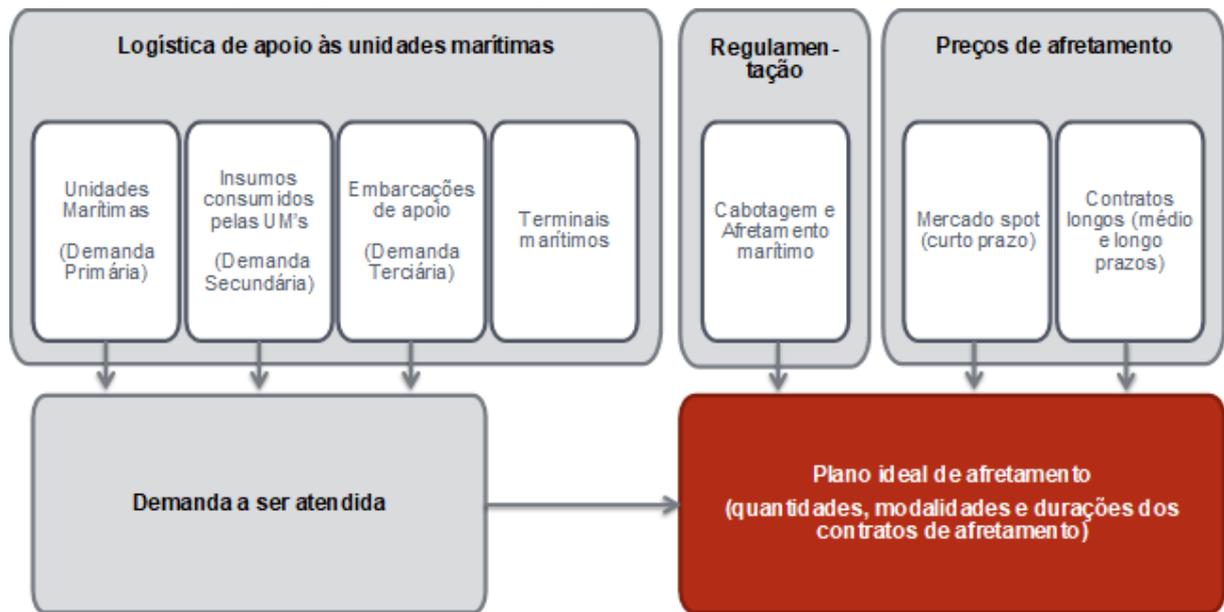
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O problema pesquisado consiste em determinar a composição mais adequada de contratos de afretamento para o processo contínuo de renovação de uma determinada frota de embarcações dedicada ao suprimento de unidades *offshore* de exploração e produção de petróleo. O mix de contratos deve atender aos requisitos de demanda e apresentar o menor custo possível.

² O aluguel diário de um *Platform Supply Vessel* (PSV) fica entre US\$ 15 mil e US\$ 43 mil (IHS ENERGY, 2015), dependendo do porte bruto de capacidade.

Para a definição do melhor conjunto de contratos de afretamento – as modalidades e os tempos de duração de contrato de cada navio da frota – muitos fatores precisam ser considerados. Dentre os fatores mais importantes, segundo Leite (2012), Lopes (2011) e especialistas consultados ³, destacam-se: (i) Logística de apoio *offshore*; (ii) Demanda a ser atendida; (iii) Preços de afretamento; e (iv) Legislação e regulamentação do transporte marítimo. A Figura 1 apresenta a relação entre estes quatro fatores na definição do problema.

Figura 1: Definição do problema de composição do mix de contratos de afretamento marítimo



Fonte: Elaborado pelo autor

As operações apoio *offshore* consistem nas atividades de transporte e armazenagem de cargas realizadas por embarcações de apoio aos serviços de exploração e produção (E&P) nas plataformas *offshore* (unidades marítimas – UM's). Do ponto de vista logístico, as operações de apoio *offshore* abrangem a movimentação de cargas de pesos, formatos e tipos variados, assim como o planejamento de embarcações com diferentes especialidades, regras de atendimento e restrições operacionais. (Aguiar, 2013; Arpini, 2015). Conforme se observa na Figura 1, a logística de apoio às unidades marítimas, ou logística de apoio *offshore*, é composta por quatro elementos básicos: unidades marítimas, insumos (e serviços) consumidos pelas UM's, embarcações de apoio, e terminais marítimos.

Para a realização do planejamento de embarcações é necessário conhecer o comportamento da demanda, que pode ser desmembrada em: demanda por UM's (primária),

³ Durante o desenvolvimento do trabalho foram consultados diversos especialistas da empresa onde o trabalho foi aplicado, do mercado de afretamento e de entidades reguladoras.

demanda por suprimentos de cada UM (secundária) e demanda por embarcações (terciária). Os três níveis de demanda correspondem aos três primeiros elementos da logística de apoio mostrados na Figura 1.

A demanda primária – os tipos e as quantidades de UM's – depende dos planos de exploração e produção de petróleo e gás da empresa. Quanto às classes de unidades marítimas, as três básicas são: sondas de perfuração, unidades estacionárias de produção, e barcos especiais (Lopes, 2011).

A demanda secundária corresponde ao perfil de consumo de cada classe de UM's. Os principais insumos demandados pelas UM's são: rancho (alimento para a tripulação); carga geral comum (armazenada em contêineres), tubos de perfuração e de produção, produtos químicos, água potável, óleo diesel, fluido de perfuração e cimento (Arpini, 2015).

Já a demanda terciária é a demanda por embarcações propriamente dita. Conforme a classe de insumos a ser transportada, um determinado tipo de embarcação é requisitado. A embarcação mais utilizada é do tipo *Platform Supply Vessels* (PSV), com diferentes portes de capacidade e que pode transportar diversos tipos de insumo. Mas, além do PSV, existem outros tipos de embarcação: o *Utility Boat* (UT), que se trata de um supridor de pequeno porte, que, por ser mais veloz que o PSV, é usado para efetuar entrega de cargas rápidas; o *Anchor Handling and Tug Supply* (AHTS), que é usado principalmente para rebocar e posicionar plataformas, mas também pode ser utilizado no transporte de suprimentos; o *Crewboat* (CB), que transporta tripulantes para as plataformas para efetuar trocas de turmas; e o *Oil Spill Response Vessel* (OSRV), que é usado no combate ao derramamento de óleo. Outros tipos de embarcação podem ainda ser utilizados em situações específicas (ABEAM, 2019a; Arpini, 2015).

Por fim, além das características e especificidades das operações de apoio *offshore* e da demanda a ser atendida, a formação da frota de navios afretados também é fortemente impactada pelos preços de afretamento de curto (mercado *spot*), médio e longo prazos, assim como pela legislação e regulamentação do transporte marítimo vigente no país. Contratos de longo prazo tendem a ser mais baratos que os de curto prazo, mas uma grande quantidade de contratos de longo prazo torna a frota inflexível a flutuações da demanda de E&P de petróleo e gás, reduzindo a competitividade da empresa petrolífera. Além disso, há regras e restrições que devem ser observadas. No Brasil, de acordo com a Resolução Normativa nº01/2015 da Agência

Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2015), o transporte aquaviário de carga, na navegação de cabotagem, deve ser realizado por empresa brasileira de navegação de cabotagem utilizando embarcação de bandeira brasileira. As exceções estão previstas naquela norma. Essa exigência impacta de forma significativa as decisões de contratação, como será detalhado no próximo capítulo.

As incertezas relacionadas à demanda e aos preços de afretamento também precisam ser consideradas no problema. A empresa precisa ter a sua disposição uma frota de embarcações suficiente para atender às demandas das unidades marítimas. Devido à constante mudança de cenários – em virtude das variações de demanda e dos preços de afretamento, da regulamentação e dos próprios objetivos da empresa –, a frota precisa ser flexível, sob a pena de incorrer em custos incompatíveis com as receitas. Entretanto, outros atores também atuam no mercado, buscando contratar embarcações de acordo com suas estratégias. Como consequência, em certas condições, a oferta pode se tornar escassa, resultando em incrementos significantes dos valores de contrato das embarcações. Portanto, definir e gerir o mix de contratos de afretamento é tarefa fundamental para a competitividade de uma empresa petrolífera. Desenvolver uma abordagem robusta para o suporte a essa tomada de decisão é um problema que ainda requer estudo e proposição de soluções metodologicamente sustentadas no método científico, apresentando relevância acadêmica e aplicada. O problema alinha-se, portanto, à função fim da pesquisa em Engenharia de Produção. Entre as subáreas de conhecimento tipicamente afetas à Engenharia de Produção está a Pesquisa Operacional, que se refere à resolução de problemas reais envolvendo situações de tomada de decisão, através de modelos matemáticos habitualmente processados computacionalmente (ABEPRO, 2019).

1.2 OBJETIVOS

Apesar de sua importância, o problema de otimização do mix de contratos de afretamento marítimo ainda é tratado de forma secundária, tanto na literatura quanto pelas empresas, como será detalhado mais adiante. A questão de pesquisa consiste, portanto, em encontrar um método eficaz, fundamentado em bases científicas, para determinar o mix ideal de contratos de afretamento de embarcações de apoio *offshore* que minimize o custo total de afretamento e atenda aos requisitos apresentados na seção anterior.

Assim, o principal objetivo deste trabalho é desenvolver um método para determinar a composição ótima de contratos de afretamento de embarcações para suprir as necessidades das

unidades marítimas de exploração e produção de petróleo em um determinado horizonte de tempo, considerando as incertezas relacionadas à demanda e aos preços de afretamento.

Para a obtenção do objetivo principal, os seguintes objetivos específicos devem ser buscados:

- i. Conhecer os processos de suprimento das unidades marítimas por classe de embarcação;
- ii. Conhecer os processos relacionados ao afretamento de embarcações de apoio às unidades marítimas;
- iii. Conhecer a legislação vigente e seus possíveis impactos na contratação das embarcações;
- iv. Conhecer as características do mercado nacional de frete de embarcações de apoio *offshore*;
- v. Entender as fontes de variação da demanda por embarcações e dos preços de afretamento de curto, médio e longo prazo;
- vi. Buscar soluções para o problema apresentado ou para problemas semelhantes.

1.3 DELIMITAÇÃO

O método desenvolvido envolve a modelagem do problema visando a análise e implementação de uma solução de otimização sob incertezas, aplicada em um problema real de uma grande empresa de petróleo e gás, que atua no Brasil. A aplicação do método deve resultar em um *Plano de Afretamento*. Além do modelo computacional, o método contempla uma fase preliminar de planejamento, que tem por objetivo definir os parâmetros de análise e preparar os dados de entrada do modelo; e uma fase posterior para a análise dos resultados gerados pelo modelo. O dimensionamento da frota não faz parte do escopo do trabalho: a quantidade necessária de embarcações (demanda terciária) é obtida a partir de ferramenta já existente na empresa. Também não faz parte do escopo deste trabalho a predição dos preços de afretamento: foram definidos três cenários de preços com base nas informações obtidas.

1.4 JUSTIFICATIVA

A relevância prática deste trabalho foi demonstrada anteriormente com a apresentação dos elevados custos para uma empresa do setor de Óleo e Gás (O&G) relacionados à operação e aluguel das UM's de E&P e ao transporte de suprimentos para tais unidades (que é realizado por de embarcações afretadas). Por um lado, além dos prejuízos ocasionados pela interrupção da produção de petróleo e gás devido à parada de uma UM de produção (UEP), o aluguel de uma sonda de exploração pode chegar a US\$ 500 mil por dia. Ou seja, uma UM parada gera grandes perdas para a empresa. Por outro lado, o custo de afretamento de um PSV, embarcação mais utilizada para o suprimento das UM's, já esteve na casa dos US\$ 43 mil por dia, conforme as informações apresentadas. Portanto, o mix de contratos de afretamento de embarcações precisa ser cuidadosamente determinado de forma que não falte embarcações para o suprimento das UM's e que não haja excesso de embarcações ao longo do tempo.

Do ponto de vista acadêmico, a otimização de mix é um problema identificado na literatura de Engenharia de Produção em contextos de logística interna e de logística externa (ABEPRO, 2019; Slack et al., 1997). Mais que considerar demandas independentes e dependentes, o problema trata de otimizar informações sobre 'qual', 'quando', 'quanto', e 'onde' um determinado item deve ser produzido ou disponibilizado para melhor atender a uma função-objetivo (FO) previamente definida. Em problemas reais, adicionam-se fontes de variabilidade significantes sobre as variáveis ou as condições de contorno, tornando o processo de modelagem e otimização laborioso e complexo (Caramia & Dell'Olmo, 2008; Hoff et al., 2010).

O problema de otimização do mix de contratos de afretamento marítimo, como encontrado na maioria dos trabalhos da literatura e do meio empresarial, ou é tratado de forma secundária (como nos trabalhos associados a roteamento e dimensionamento de frota), ou é abordado de forma simplificada, desconsiderando-se as peculiaridades do mercado local e as incertezas inerentes à demanda e aos preços de afretamento. Por isso, do ponto de vista prático, os resultados obtidos geralmente são insatisfatórios, não retratando a realidade. Essa dificuldade não é nova, já tendo sido discutida na literatura: "As maiores críticas às pesquisas atuais em problemas de roteamento e composição de frota são: (...) a tendência de se descrever os problemas muito idealizados, longe dos requisitos do mundo real; e, relacionada à primeira, a falta de tratamento dos aspectos estocásticos. Acreditamos que isto será mais bem tratado em pesquisas futuras (tradução própria do texto original em inglês)" (Hoff et al., 2010). Encontrar

uma solução robusta e eficaz para este tipo de problema ainda permanece um trabalho desafiador e de grande interesse (Meng & Wang, 2011; Sawik, 2018).

Na literatura é possível encontrar trabalhos acadêmicos relacionados ao transporte e ao afretamento marítimo. Pantuso, Fagerholt e Wallace (2016) abordaram o problema da renovação da frota e, particularmente, o tratamento da incerteza no caso marítimo. Sua principal contribuição é avaliar se a utilização da otimização estocástica traz, de fato, resultados melhores que modelos determinísticos. Arpini (2015) estudou o planejamento da logística de suprimento de plataformas *offshore*, focando nos problemas de roteamento das embarcações e de carregamento dos suprimentos no convés. Jong et al. (2016) discutiram os aspectos a serem considerados em modelos nacionais de afretamento e como esses devem ser utilizados para determinar e aumentar a confiança nos modelos de decisão gerados. Siddiqui e Verma (2017) tratam do problema do ajuste periódico (tático) de uma frota de petroleiros de baixa capacidade pela utilização de uma combinação de diferentes tipos de contratos de afretamento. Como esses, há outros trabalhos relacionados, parcialmente, ao problema e aos objetivos desta tese, que serão abordados e discutidos no capítulo de revisão da literatura. Entretanto, existem lacunas a serem preenchidas: não foram encontrados, até o momento da realização da pesquisa, trabalhos que abordassem especificamente o problema de otimização do mix de contratos de afretamento sob incertezas como proposto neste trabalho. As características do problema abordado – minimização dos custos de afretamento e tratamento adequado das incertezas – demanda métodos de análise e otimização mais eficazes, conforme explicado antes.

1.5 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

Dentre as contribuições deste trabalho, destacam-se as seguintes:

1. Descrição e contextualização do problema de afretamento marítimo sob incertezas, abrangendo aspectos fundamentais para a sua correta especificação e modelagem: a logística de apoio às unidades marítimas, o detalhamento da demanda a ser atendida, a regulamentação do transporte marítimo no país e o mercado brasileiro de frete marítimo.
2. Revisão e análise da literatura visando: entender quais são os problemas mais importantes para o setor de afretamento marítimo e como o problema proposto se insere neste contexto; identificar trabalhos já realizados sobre o tema da tese; e

encontrar soluções para problemas semelhantes ao problema de tese. A revisão da literatura resultou na publicação de um artigo em revista.

3. Desenvolvimento de um modelo determinístico de programação linear inteira para o problema de minimização do custo de afretamento ao longo do período de planejamento que atende aos requisitos de demanda, de preços de afretamento e de disponibilidade de embarcações no mercado.
4. Análise de uma abordagem alternativa para a otimização do problema, que envolve a simulação de cenários amostrais para os parâmetros estocásticos, a execução do modelo determinístico para os cenários gerados e a combinação heurística dos resultados para a obtenção da solução.
5. Desenvolvimento de um modelo de programação linear estocástica de dois estágios para o mesmo problema de minimização do custo de afretamento, atendendo aos mesmos requisitos, porém considerando, intrinsecamente ao modelo, as incertezas relacionadas à demanda e aos preços de afretamento. O modelo se caracteriza por apresentar na função objetivo todas as variáveis de decisão – de primeiro e de segundo estágio – relacionadas a coeficientes estocásticos. Esta é a contribuição mais importante deste trabalho de tese. Não foram encontrados, na literatura, trabalhos de otimização sob incertezas resolvidos por programação estocástica, cuja modelagem do problema apresentasse na função objetivo variáveis de decisão de primeiro estágio com coeficientes estocásticos. Esta modelagem reflete bem o problema do tomador de decisão que necessita tomar a decisão de primeiro momento, baseando-se em informações incertas.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este volume está organizado em sete capítulos, incluindo este, de caráter introdutório. No segundo capítulo, o problema é contextualizado. São descritos: os processos referentes à logística de apoio às unidades marítimas; a demanda a ser atendida; os principais aspectos e a regulamentação do transporte marítimo no país; a lógica de formação e o comportamento dos preços de afretamento. A opção por essa apresentação detalhada no Capítulo 2 visa a dar maior familiaridade para o leitor sobre o problema, de modo a melhor compreender o referencial da pesquisa.

O terceiro capítulo aborda o método de pesquisa: o enquadramento da pesquisa e as etapas de desenvolvimento do método de pesquisa escolhido.

A revisão da literatura é desenvolvida no quarto capítulo. Primeiro, busca-se por abordagens de solução relacionadas ao afretamento marítimo, com ênfase nas soluções de otimização. Posteriormente, são analisadas outras abordagens de solução aplicadas em problemas semelhantes ao problema de tese. As técnicas de otimização sob incertezas e os conceitos relacionados são abordados no quinto capítulo.

No sexto capítulo, são desenvolvidas: a modelagem do problema; a definição do método de suporte à decisão, produto principal desta tese; a realização de experimentos com o método proposto; e a análise dos resultados obtidos.

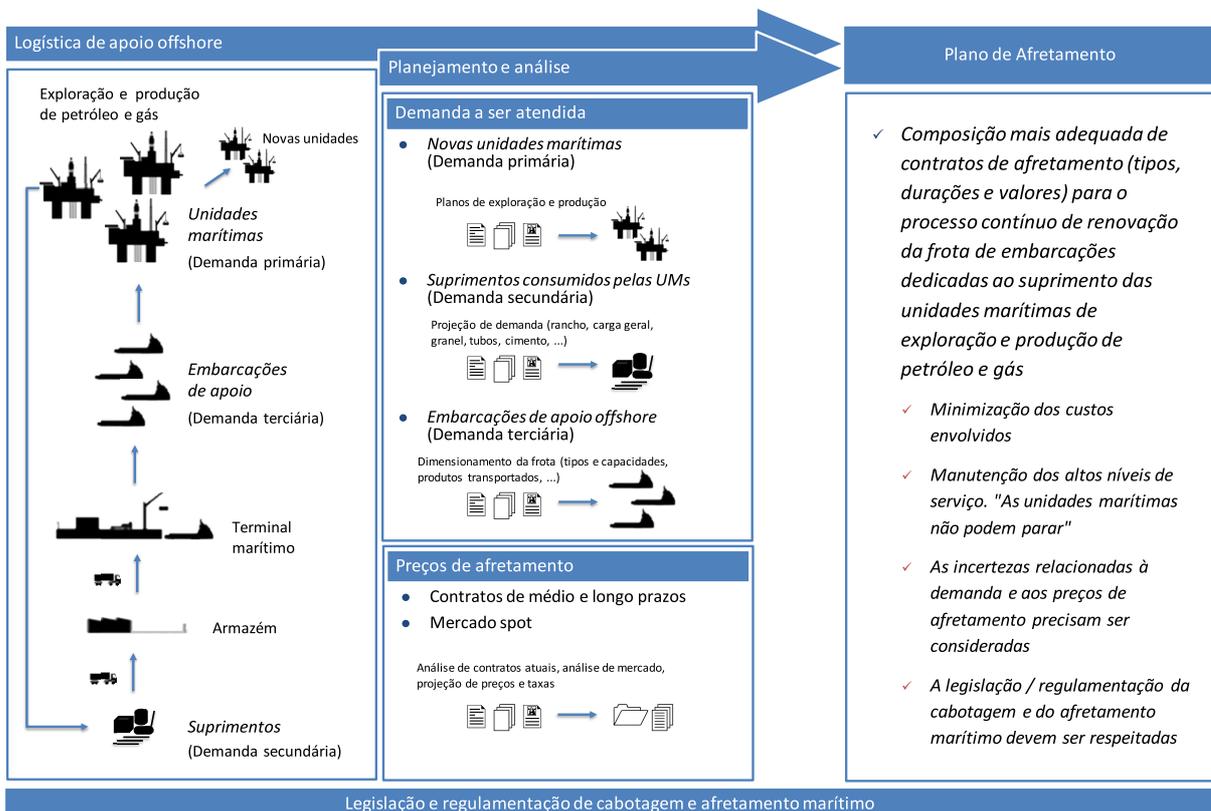
Finalmente, no sétimo capítulo, são apresentadas as conclusões sobre o trabalho.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Neste capítulo são descritos os principais processos e conceitos relacionados ao problema objeto deste trabalho. A primeira seção aborda a logística de apoio *offshore*, onde são descritos os elementos relacionados aos processos de suprimento das unidades marítimas. Na segunda seção, a demanda a ser atendida é apresentada em seus três níveis de análise. Na terceira, são descritas as principais características e os aspectos legais do transporte marítimo, destacando-se as particularidades da cabotagem no país. Por fim, a lógica de formação e o comportamento dos preços de afretamento são analisados na quarta seção do capítulo.

Conforme apresentado no primeiro capítulo, o problema consiste em determinar a composição ótima de contratos de afretamento para o processo contínuo de renovação de uma determinada frota de embarcações dedicada ao suprimento de unidades *offshore* de exploração e produção de petróleo, considerando as incertezas relacionadas à demanda e aos preços de afretamento. Com o objetivo de facilitar o seu entendimento, a Figura 2 apresenta uma visão sistêmica dos processos envolvidos. Os elementos apresentados na figura são descritos nas seções que compõem este capítulo.

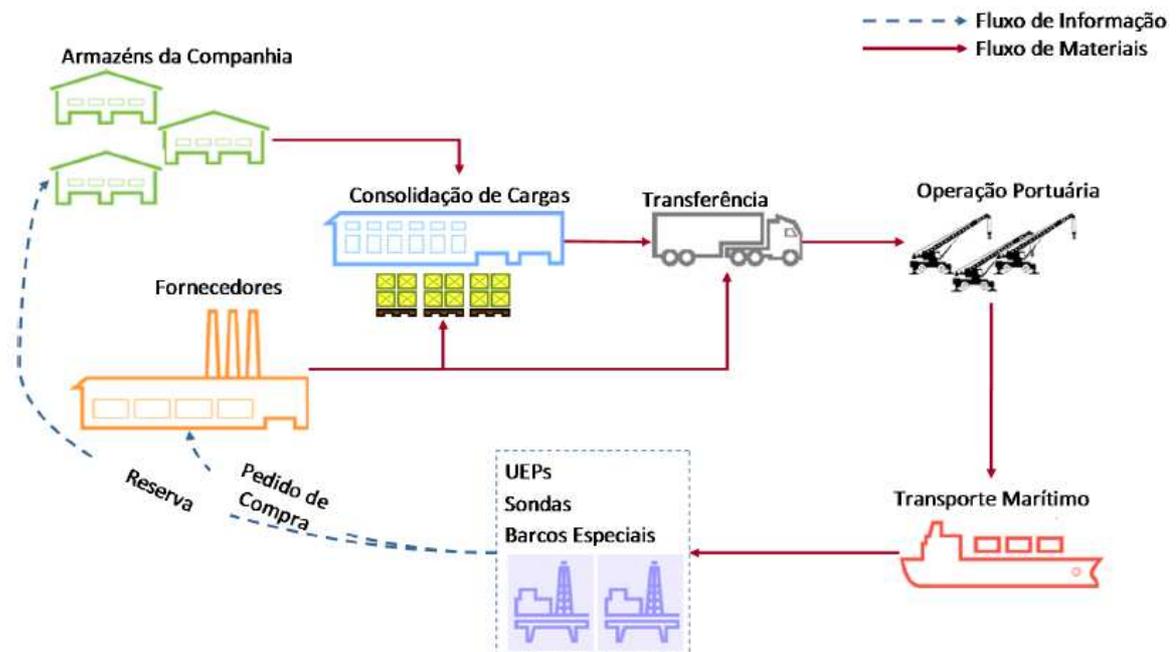
Figura 2: Fluxo esquemático dos fatores mais importantes para a elaboração do plano de afretamento



2.1 LOGÍSTICA DE APOIO ÀS UNIDADES MARÍTIMAS

A logística de apoio *offshore* abrange as atividades de transporte e armazenagem de cargas realizadas por embarcações de apoio para suprir e executar serviços para as plataformas *offshore* (ou UM's) de exploração e produção de petróleo e gás natural (Aguiar, 2013; Arpini, 2015). O sistema logístico de apoio às UM's pode ser definido como o fluxo de materiais e informações que começa com os fornecedores nacionais e internacionais, passa pelos armazéns e terminais portuários e termina com o atendimento às unidades marítimas (Lopes, 2011), conforme mostra o fluxo esquemático da Figura 3. Este fluxo esquemático representa a cadeia de suprimento das unidades marítimas de uma empresa do setor de óleo e gás do Brasil.

Figura 3: Fluxo de materiais da cadeia de apoio offshore de uma empresa de óleo e gás



Fonte: Lopes (2011)

O problema sob análise envolve o elo do transporte marítimo, mais claramente sua especificação em termos de quantidade e disponibilidade de diferentes embarcações para suprir a operação das UM's (na Figura 3, representadas por UEPS – Unidades de Estacionárias de Produção – Sondas e Barcos Especiais). Essas embarcações serão as responsáveis pelo suprimento de diferentes produtos às UM's, assegurando sua adequada operação, conforme previsto no plano de exploração e produção, e descrito no plano de afretamento da empresa.

2.1.1 Unidades marítimas

As unidades marítimas atendidas pela Logística de Apoio podem ser agrupadas em três classes, cada uma com necessidades distintas em termos de tipo de carga, urgência e incerteza na demanda (Arpini, 2015; Lopes, 2011):

a) Sondas de Perfuração – são unidades destinadas a perfurar e completar poços de exploração ou de produção de petróleo. Para a atividade de perfuração, citam-se alguns insumos essenciais como os fluidos e os tubos de perfuração, a salmoura, a baritina e a bentonita, que serão detalhados mais à frente. Possuem capacidade de armazenagem pequena e estão sempre em movimento para explorar áreas potenciais. Sua demanda apresenta grande incerteza e, por isso, efetuam um grande número de pedidos de emergência. São as mais caras entre todas as unidades marítimas, por isso um atraso na entrega de um insumo essencial às suas operações impacta fortemente os custos.

b) Unidades Estacionárias de Produção – são unidades posicionadas em campos já descobertos para a extração de petróleo e/ou gás natural. O padrão de consumo varia com a idade da unidade: plataformas em início de operação (com até 6 meses de idade) podem demandar grande quantidade de recursos para suprir eventuais serviços de construção e montagem; no outro extremo, unidades antigas (com mais de 10 anos) demandam muita manutenção. Mas, com exceção desses casos, caracterizam-se por possuir um padrão de demanda previsível e estável uma vez que, normalmente, possuem localização fixa ao longo da vida útil dos campos associados. Os insumos mais demandados são rancho e produtos químicos.

c) Barcos Especiais – são embarcações de apoio para a realização de serviços auxiliares para a instalação e manutenção de sistemas produtivos offshore. Assim como as sondas de perfuração, estão sempre em movimento e são supridas pelas embarcações de apoio marítimo. Como exemplo de barcos especiais pode-se citar (ABEAM, 2019a): Embarcações de Apoio ao Mergulho (*Diving Support Vessels – DSV*), Embarcações de Lançamento de Linhas (*Pipe Laying Vessels – PLV*), Navio de Estimulação de Poços de Petróleo (*Well Stimulation Vessel – WSV*) e Navio de Pesquisa Sísmica (*Research Vessel – RV*).

2.1.2 Embarcações de apoio

Conceitualmente a Navegação de Apoio Marítimo confere o apoio logístico para embarcações e instalações em águas territoriais nacionais e na Zona Econômica Exclusiva, que

atuem nas atividades de pesquisa e lavra de minerais e hidrocarbonetos (ABEAM, 2019a). A Zona Econômica Exclusiva é uma faixa situada para além das águas territoriais, sobre a qual cada país costeiro tem prioridade para a utilização dos recursos naturais do mar, tanto vivos como não-vivos, e responsabilidade na sua gestão ambiental. Estabelecida pela Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM), também conhecida como Convenção de Montego Bay, a Zona Econômica Exclusiva se estende por até 200 milhas náuticas - o equivalente à 370 km (Eco, 2018; ONU, 1982).

Devido às restrições de espaço e de estabilidade, as UM's têm pouca ou nenhuma capacidade de estocar os suprimentos requeridos. Por isso, o transporte de suprimentos precisa ser realizado regularmente, a partir de uma base de apoio, por embarcações de diferentes tipos e características operacionais: área de convés, velocidade, capacidade de carga (Arpini, 2015).

Conforme a classe de suprimento a ser transportado, um determinado tipo de embarcação é requisitado. A embarcação mais utilizada é do tipo *Platform Supply Vessels* (PSV), que são embarcações de transporte multipropósito cuja porte pode chegar a 6000 toneladas de porte bruto (TPB). Os mais comuns são PSV 1000, PSV 3000 e PSV 4500 TPB. Quanto maior o porte do PSV, maior a sua capacidade de armazenagem, tanto em número de tanques (e silos) quanto em área de convés, e maior o consumo de combustível (Arpini, 2015; Lopes, 2011). A Figura 4 ilustra um tipo de PSV.

Figura 4: Platform Supply Vessels (PSV)



Fonte: KAMAR TRADING (2018)

Os navios do tipo PSV são especializados no apoio às unidades de perfuração, produção e outras unidades marítimas. Sua principal função é transportar suprimentos para as unidades marítimas. Uma importante característica desse tipo de navio é a grande variedade de carga que pode abrigar, o que o torna bastante versátil. Necessitam de alta capacidade de manobra próximo às unidades marítimas. Devido às possíveis condições climáticas adversas nas operações de carga e descarga, os PSVs normalmente são dotados de sistemas de posicionamento dinâmico (ABEAM, 2019a).

Além dos PSVs, existem outros tipos de embarcações de apoio à logística *offshore* com características específicas. A *Mini Supply Vessel* (SV), por exemplo, é uma versão reduzida das embarcações do tipo PSV, com característica de mini supridores às plataformas de petróleo.

Os navios do tipo *Oil Spill Response Vessel* (OSRV) são embarcações de suporte as atividades de contingência de derramamento de óleo. Possuem características necessárias a dar uma resposta rápida, mitigando os efeitos de um incidente deste tipo. Dotados de sistemas elétricos blindados para evitar a produção de faíscas, os cascos são muito similares aos cascos de PSVs. Possuem tanques específicos para armazenamento e segregação do óleo recolhido, além de equipamentos de alta tecnologia que podem detectar eventuais manchas de óleo (ABEAM, 2019a).

A *Utility Boat* (UT) é uma embarcação de pequeno porte com velocidade de serviço que pode chegar a 30 nós. É significativamente mais rápida que o PSV, cuja velocidade é de 10 nós. Possui menor resistência do piso o que implica que não pode levar cargas pesadas. A UT não pode levar tubos nem produtos químicos, por exemplo. Seu objetivo é, portanto, suprir as unidades marítimas de carga geral de pequeno porte (ferramentas, equipamentos) que sejam urgentes e impactem diretamente na operação das unidades (Lopes, 2011).

As embarcações do tipo AHTS (*Anchor Handling Tug Supply*) atuam com a função básica de rebocador de plataformas de petróleo e operações de manuseio de âncoras. Possuem configuração com popa aberta para permitir a amarração de âncoras. Geralmente são navios que apresentam alta potência de motor. A atividade de reboque é uma operação que exige muita potência da embarcação e, portanto, seu sistema propulsivo deve ser projetado para que atinja uma condição de reboque estático conhecido como *Bollard Pull* (ABEAM, 2019a).

A *Line Handling* (LH) é uma embarcação que opera no descarregamento do óleo das instalações de produção e armazenamento (FPSO e FSO) para os navios tanque e dos navios tanque para as monoboias. Tem como atividade principal o manuseio de linhas e amarrações de navios tanque em monoboias, fazendo a transferência das linhas até as boias de amarração.

Auxiliam os navios tanque enquanto eles são carregados em sistemas de atracação e participam de trabalhos de manutenção de mangotes flexíveis flutuantes.

Por fim, a *Crewboat* (CB) é uma embarcação de alta velocidade especializada no transporte de pessoal de apoio *offshore* e tripulações para embarcações envolvidas em operações *offshore* (ABEAM, 2019a).

2.1.3 Produtos transportados

Diversos insumos são demandados pelas unidades marítimas para a realização de suas operações, dentre os quais se citam (Arpini, 2015; Lopes, 2011):

a) Carga Geral – consiste em toda carga carregada no convés das embarcações. Pode ser classificada em quatro tipos principais: rancho, que constitui o alimento para a tripulação; tubos de perfuração e produção; produtos químicos; e carga geral comum, como contêineres. As operações realizadas no convés envolvem carga e descarga e são feitas por guindastes das plataformas ou das embarcações.

b) Granéis Líquidos – abrange as cargas cuja armazenagem é feita nos tanques no porão das embarcações. Os principais tipos transportados são: água potável, usada para consumo e higiene da tripulação da plataforma a ser suprida; óleo diesel, usado como combustível para motores e equipamentos elétricos das plataformas; fluido ou lama de perfuração, utilizada no interior do tubo de perfuração para lubrificar o sistema; e salmoura.

c) Granéis Sólidos – também são armazenados nos tanques e silos das embarcações. Os principais tipos de granéis sólidos transportados para as unidades marítimas são: cimento, baritina e bentonita.

Além dos produtos transportados para as unidades marítimas, existe um grande volume de carga que retorna das unidades para os terminais de apoio, chamado de *backload*. O *backload* é composto tanto por cargas descartáveis – por exemplo, lixo, sucata e resíduos químicos – quanto por produtos e equipamentos que podem ser reaproveitados no futuro, como tanques e contentores vazios, tubos usados e fluidos de poço. Essas cargas são bastante representativas na forma de carga geral e granel líquido movimentado: correspondem a cerca de 45% de toda a carga geral; e 70% do fluido de poço volta para ser reprocessado (Lopes, 2011).

2.1.4 Terminais marítimos

Os terminais marítimos são as bases de apoio para o suprimento das unidades marítimas. Nas bases, as embarcações realizam as operações de carregamento dos suprimentos para atender as UM's e as operações de descarregamento do *backload* (Arpini, 2015; Lopes, 2011).

A capacidade operacional de um terminal marítimo está relacionada a diversos fatores, dentre os quais destacamos: o número de berços para receber os navios, área de pré-embarque, área de *backload*, estacionamento para os caminhões que trazem os produtos e programação dos pedidos. Além da capacidade física e de infraestrutura, a eficiência operacional do terminal depende de sua organização, planejamento e correta execução de suas atividades.

A Figura 5 mostra o Terminal Alfandegado de Imbetiba, a maior base de apoio marítimo do Brasil, localizado em Macaé, RJ. Esta base abastece toda a Bacia de Campos, onde se localiza a maior parte dos campos de petróleo e gás em atividade do país.

Figura 5: Terminal Alfandegado de Imbetiba – Macaé, RJ



Fonte: PORTAL NAVAL (2018)

2.2 DEMANDA A SER ATENDIDA

No problema de otimização do mix de afretamento, conhecer o comportamento da demanda é fundamental para planejar a frota de embarcações para atender às unidades

marítimas. A demanda pode ser analisada em três níveis: demanda por UM's (primária), demanda por suprimentos de cada unidade marítima (secundária) e demanda por embarcações (terciária). A determinação ótima do nível de serviço para cada demanda constitui um problema de complexidade e temporalidade específica. Enquanto o atendimento da demanda primária é alinhado ao posicionamento estratégico de cada empresa produtora de petróleo e gás e reflete-se no plano de exploração e produção (Figura 2, apresentada anteriormente), o atendimento da demanda secundária pode ser definido por meio de técnicas de planejamento de produção adaptadas para o contexto específico em estudo. Entretanto, a realização do atendimento a essas demandas depende da definição do afretamento de embarcações (demanda terciária), problema foco desta tese e que é sujeito a riscos que podem resultar em economias ou perdas de consideráveis somas.

2.2.1 Demanda primária

O primeiro nível de demanda a ser verificado para a formação ou reformulação da frota de embarcações é a demanda por UM's: sondas de perfuração, UEPs e barcos especiais. Como problema de decisão, neste nível, é necessário definir as quantidades necessárias de cada tipo de UM para a realização dos planos de exploração e produção de óleo e gás da empresa para o futuro. Trata-se de uma decisão de cunho estratégico e alinhada ao posicionamento desejado pela empresa.

As quantidades de sondas de perfuração e de UEPs estão relacionadas diretamente à decisão estratégica da empresa, podendo essa ser, até mesmo, independente dos dados históricos de unidades utilizadas até o presente: depende do que a empresa pretende realizar no futuro em termos de exploração de novos poços e de produção dos poços existentes. Já a quantidade de barcos especiais, que, de forma geral, dão suporte nos processos de instalação e manutenção dos outros dois tipos de unidades marítimas, depende das quantidades existentes e planejadas de cada uma dessas unidades para o futuro.

Para a determinação da demanda primária, são informações relevantes: (i) as reservas existentes e curvas de produção de petróleo e gás; (ii) o número de concessões obtidas nos últimos anos para a exploração de óleo e gás (O&G); (iii) a participação em novas concessões; (iv) a localização das reservas; e (v) o perfil dos campos (distância da costa, águas rasas ou profundas, pré-sal ou pós-sal e qualidade do petróleo). Essas informações dão indicação das

UM's necessárias e subsidiam a empresa na elaboração dos planos de exploração e produção para o futuro.

2.2.2 Demanda secundária

A demanda secundária corresponde ao perfil de consumo dos insumos pelas UM's. Uma vez que se tenham os tipos e as quantidades de UM's necessárias, este problema de decisão foca-se em definir o plano mestre de atendimento logístico de suprimentos, a partir do conhecimento do perfil de consumo de insumos em cada UM. Como apresentado anteriormente, os principais produtos demandados pelas UM's são: rancho (alimento para a tripulação), carga geral comum (armazenada normalmente em contêineres de pequeno porte), tubos de perfuração e de produção, produtos químicos, água potável, óleo diesel, fluido de perfuração e cimento.

A demanda secundária é tipicamente definida a partir de dados históricos de consumo desses produtos pelas UM's. Por se tratar de um problema menos sujeito à flutuações e incertezas, métodos de planejamento de suprimentos apresentam soluções tipicamente adequadas ao atendimento desse tipo de demanda.

2.2.3 Demanda terciária

Por fim, demanda terciária é a demanda por embarcações propriamente dita, é dependente das demandas secundária (diretamente) e primária (indiretamente). Conforme apresentado anteriormente, dependendo da classe de insumos a ser transportada, um determinado tipo de embarcação é requisitado. O Quadro 1 apresenta uma descrição relacionando o tipo de demanda e o tipo de embarcação utilizados no contexto deste problema.

Quadro 1: Características, produtos transportáveis e uso típicos de embarcações de apoio offshore

Embarcação de apoio	Características principais	Produtos transportáveis	Uso típico
PSV	<ul style="list-style-type: none"> - Diversidade de cargas - Portes diversos: de 1000 a 6000 TPB - Área de deck: até 1110 m² - Capacidade de tanque: até 2400 m³ 	<ul style="list-style-type: none"> - Carga geral (rancho, tubos, produtos químicos e containers) - Granéis líquidos (água, diesel e fluido de perfuração) - Granéis sólidos (cimento, baritina e bentonita) 	<ul style="list-style-type: none"> - Principal tipo de embarcação no transporte de materiais
UT e SV	<ul style="list-style-type: none"> - Mais veloz que PSV - Pequeno porte 	<ul style="list-style-type: none"> - Carga geral de pequeno porte (ferramentas, equipamentos) 	<ul style="list-style-type: none"> - Cargas rápidas

AHTS	- Possuem configuração com popa aberta para permitir a amarração de âncoras	- Material de ancoragem - Carga geral de pequeno porte	- Rebocar plataformas - Operações de manuseio de âncoras
LH	- Possui configuração para manuseio de linhas e amarrações de navios tanque em monoboias	- Tubos - Equipamentos para manuseio e amarração	- Descarregamento do óleo das UM's para navios tanque e dos navios tanque para as monoboias
CB	- Embarcação de alta velocidade	- Transporte de pessoas	- Transporte de pessoal de apoio <i>offshore</i> e tripulações para outras embarcações
OSRV	- Dotados de sistemas elétricos blindados para evitar a produção de faíscas	- Óleo recolhido	- Suporte as atividades de contingência de derramamento de óleo

Fonte: o autor com base em ABEAM (2019) e LOPES (2011)

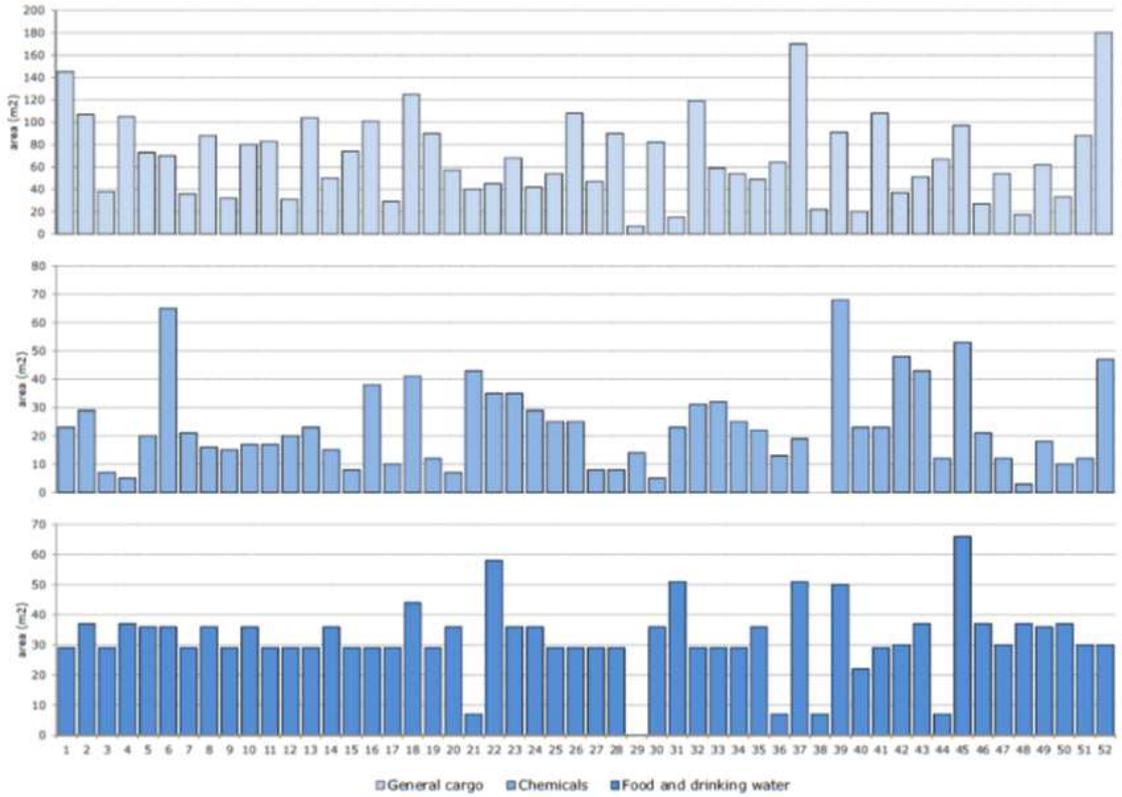
Sob o ponto de vista conceitual, o atendimento da demanda terciária corresponde ao planejamento fino de produção (Slack et al., 1997), na medida em que deve definir quais, quando, quanto e onde os recursos (embarcações de diferentes classes) devem ser alocados para operacionalizar o serviço logístico de suporte às UM's. Nesse sentido, pode ainda ser dividido em dois subproblemas: (i) determinar o mix ótimo de afretamento; e (ii) determinar a necessidade de replanejamento de recursos em função de fatores externos ao problema, tais como fontes de variabilidade, indisponibilidade momentânea de recursos de determinada classe, ou mudanças necessárias no plano de exploração e produção.

De acordo com Leite (2012), uma das principais características da logística *offshore* é a incerteza da demanda. Para ilustrar tal característica, ele apresenta dois conjuntos de gráficos relativos à demanda semanal por área de *deck*⁴ em uma embarcação, entre abril de 2011 e março de 2012 (eixo horizontal, semanas numeradas de 1 a 52): o primeiro conjunto trata da demanda de uma unidade de produção de petróleo e gás (Gráfico 1) e o segundo de uma unidade de perfuração (Gráfico 2). Ambas as unidades estão situadas na Bacia de Campos. Como se pode observar nos gráficos, há uma grande variação na demanda de carga geral e de químicos entre uma semana e outra. A demanda por água potável e comida é quase constante e pode ser facilmente prevista. Mas, em algumas semanas, provavelmente devido às condições de tempo, não é possível embarcar a comida e ela é postergada para a semana seguinte. O mesmo acontece com o transporte de tubos e *risers*⁵ para as sondas de perfuração.

⁴ Área de *deck* é a área ocupada pelo produto na embarcação

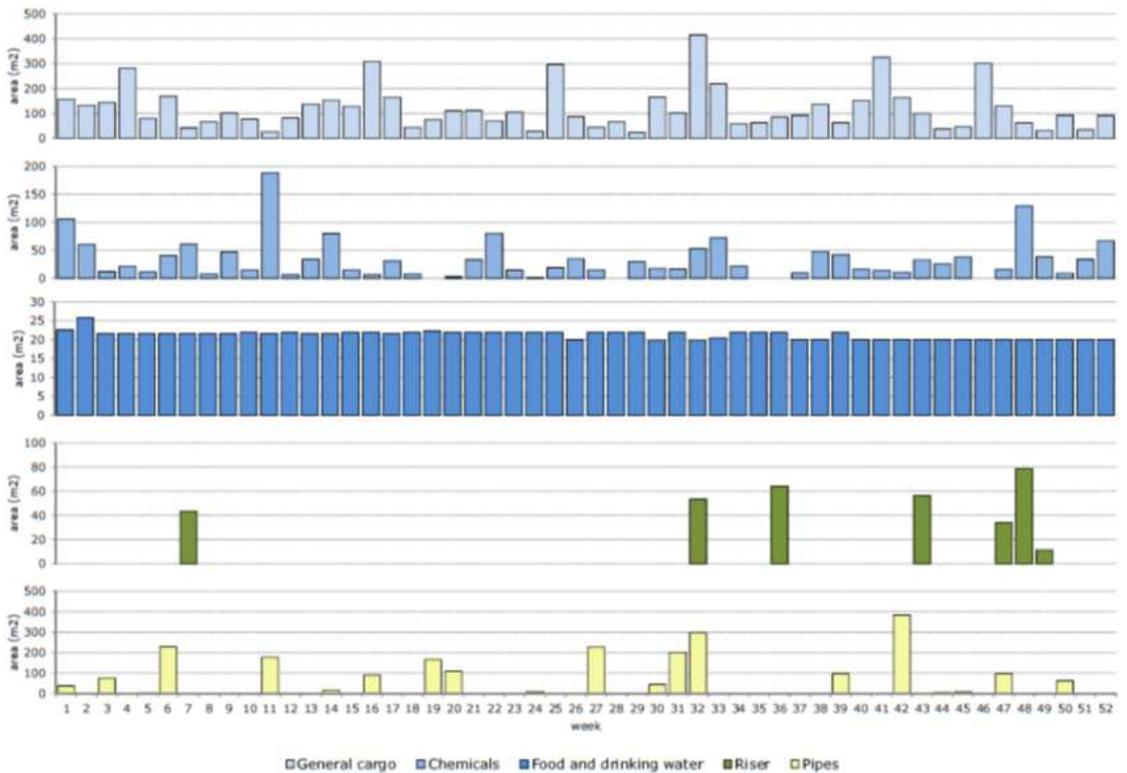
⁵ *Riser* é um tubo que liga uma estrutura de produção *offshore* flutuante, ou uma plataforma de perfuração, a um sistema submarino para fins de exploração ou produção de petróleo e gás.

Gráfico 1: Demanda semanal por área de deck de uma unidade de produção na Bacia de Campos



Fonte: Leite (2012)

Gráfico 2: Demanda semanal por área de deck de uma unidade de perfuração na Bacia de Campos



Fonte: Leite (2012)

2.3 REGULAMENTAÇÃO DO TRANSPORTE MARÍTIMO

Nesta seção, são abordadas as características e os aspectos legais que afetam o planejamento da frota e os custos das atividades relacionadas ao transporte de pessoas e de produtos no país.

Na Constituição Federal, Art. 178:

A lei disporá sobre a ordenação dos transportes aéreo, aquático e terrestre, devendo, quanto à ordenação do transporte internacional, observar os acordos firmados pela União, atendido o princípio da reciprocidade.

Parágrafo único. Na ordenação do transporte aquático, a lei estabelecerá as condições em que o transporte de mercadorias na cabotagem e a navegação interior poderão ser feitos por embarcações estrangeiras.

A Lei nº 9.432, de 08 de janeiro de 1997, dispõe sobre a ordenação do transporte aquaviário e dá outras providências. Em 05 de junho de 2001, a Lei nº 10.233 cria a Agência Nacional de Transportes Aquaviários – ANTAQ, responsável por regular, supervisionar e fiscalizar as atividades de prestação de serviços de transporte aquaviário e de exploração da infraestrutura portuária e aquaviária no país (ANTAQ, 2019).

2.3.1 Modalidades de navegação

De acordo com o Artigo 3º do Decreto nº 2.596/98, conhecido por RLESTA, pois regula a Lei da Segurança do Tráfego Aquaviário – LESTA (Lei nº 9.537/97), a navegação pode ser classificada em: mar aberto ou interior, sendo que a primeira modalidade se divide ainda entre navegação de longo curso, cabotagem e apoio marítimo (Santos, 2014).

A navegação em mar aberto é aquela realizada em águas marítimas consideradas desabrigadas. No caso da navegação de longo curso, os portos de origem e destino localizam-se em países distintos. A cabotagem é a modalidade de navegação entre portos ou pontos do território de um mesmo país, utilizando a via marítima ou esta e as vias navegáveis interiores. E a navegação de apoio marítimo é aquela para apoio logístico a embarcações e instalações em águas territoriais nacionais e na Zona Econômica Exclusiva, que atuem nas atividades de pesquisa e lavra de minerais e hidrocarbonetos.

A navegação de interior é, segundo a RLESTA, a realizada em hidrovias interiores, assim considerados rios, lagos, canais, lagoas, baías, angras, enseadas e áreas marítimas consideradas abrigadas.

2.3.2 Afretamento marítimo

Os contratos de afretamento já eram celebrados na idade média através da "carta partita" ou "charta partita" ou "charter party", um documento escrito em duplicata, porém em apenas um pedaço de papel e, posteriormente, cortado (ou rasgado) no meio, ficando cada parte contratante com um pedaço do acordo. Escrito na língua inglesa tem-se notícia de contrato de afretamento por viagem (Voyage Charter Party) datado de 03 de julho de 1531, do navio Cheritie (Salgues, 2003).

Existem diversas modalidades de contrato de afretamento, que são regulamentados por acordos internacionais e pela legislação vigente nos países onde o transporte é realizado. Os dois tipos mais comuns são: o *Time Charter Party* (TCP), por tempo, e *Voyage Charter Party* (VCP), por viagem. A escolha da modalidade de contrato de afretamento depende de diversos fatores, tais como: a demanda nos seus diversos níveis, os valores de frete praticados e a legislação e regulamentação do país.

De todos os fatores, a regulamentação talvez seja o mais crítico, pois é restritiva e, por isso, pode tornar o processo de afretamento mais lento e dispendioso. O Quadro 2 apresenta a relação dos países mais restritivos do mundo e as respectivas restrições impostas.

Quadro 2: Restrições impostas por alguns países às práticas de cabotagem

	Restrições de propriedade	Provisão doméstica na construção	Restrições de mudança de bandeira	Exigências sobre a tripulação
<i>Brasil</i>	✓	✓	✓	✓
<i>Indonésia</i>	✓	✓	✓	✓
<i>EUA</i>	✓	✓	✓	✓
<i>Peru</i>	✓	✓	✓	✓
<i>Chile</i>	✓		✓	✓
<i>Tailândia</i>	✓		✓	✓
<i>Venezuela</i>	✓		✓	✓
<i>Argentina</i>	✓		✓	✓
<i>Canadá</i>			✓	✓
<i>Grécia</i>	✓		✓	✓
✓	Mudança de bandeira permitida, mas controlada			

Fonte: Cole (2010)

A regulamentação de cabotagem no Brasil está entre as mais rígidas no mundo. No Brasil, o transporte de cabotagem deve ser realizado, prioritariamente, por empresa com bandeira brasileira. O afretamento de embarcação estrangeira é permitido apenas por Empresa

Brasileira de Navegação – EBN e só pode ser realizado nas seguintes condições: (i) não existir embarcação de bandeira brasileira; (ii) ser realizado nas modalidades *Time Charter Party* (TCP) e *Voyage Charter Party* (VCP), por tempo ou por viagem, respectivamente; (iii) ser realizado a casco nu limitado à metade da capacidade em tonelagem existente ou o dobro do que estiver construindo no Brasil; (iv) caso permaneça na cabotagem, a partir de 90 dias, 1/5 da tripulação deve ser composta por cidadãos brasileiros; e (v) a partir de 180 dias, esta proporção sobe para 1/3 (Lei 9.432/1997 e resoluções ANTAQ, RN 72/2006 do CNIg).

A Resolução Normativa Nº 01 da ANTAQ, de 13/02/2015, estabelece os Critério para Afretamento por EBN na navegação de Apoio Marítimo (ANTAQ, 2015). O grande número de condições e restrições exigidas faz com que os processos de contratação de afretamento sejam demorados e dispendiosos no país. Os contratos de afretamento vigentes no Brasil foram estabelecidos pelo Art. 2º da Lei 9.432/1997:

2.3.2.1 *Afretamento a Casco Nu*

Contrato em virtude do qual o afretador tem a posse, o uso e o controle da embarcação, por tempo determinado, incluindo o direito de designar o comandante e a tripulação. O proprietário freta a embarcação com todos os seus equipamentos funcionando, cabendo ao afretador tripulá-la e provisioná-la, de tal forma que possa operá-la de fato.

Esta modalidade de afretamento é empregada por empresas de navegação e normalmente utilizada em ocasiões onde o custo de construção encontra-se elevado, ocasião em que os armadores podem decidir-se por afretar a casco nu embarcações imediatamente disponíveis para suprir suas necessidades, reduzindo, assim, o custo de capital necessário. (Santos, 2014)

2.3.2.2 *Afretamento por Tempo*

Contrato em virtude do qual o afretador recebe a embarcação armada e tripulada, ou parte dela, para operá-la por tempo determinado. Normalmente se utiliza a sigla TCP para denominar contratos desse tipo, que corresponde às iniciais da denominação na língua inglesa: *Time Charter Party*. O fretador deve manter a embarcação tripulada e com todos os equipamentos em perfeito funcionamento, garantindo assim a sua plena operacionalidade. Ao afretador, cabe o pagamento do aluguel da embarcação, bem como todas as despesas relativas às viagens realizadas, tais como: despesas de praticagem, rebocadores, combustível, óleo

lubrificante, aguada e todas as despesas que se relacionam com a carga, inclusive taxas portuárias (Santos, 2014).

Esta modalidade de contrato é normalmente utilizada quando existe, por parte do afretador, uma certeza da necessidade de transporte por um determinado período de tempo. No afretamento por tempo, o afretador tem a garantia do custo durante todo o tempo de contrato. Isso pode ser interessante em momentos de alta do mercado, mas pode significar grandes perdas se o mercado estiver em baixa (Santos, 2014).

2.3.2.3 *Afretamento por Viagem*

Contrato em virtude do qual o fretador se obriga a colocar o todo ou parte de uma embarcação, com tripulação, à disposição do afretador para efetuar transporte em uma ou mais viagens. Utiliza-se a sigla VCP (*Voyage Charter Party*) para denominar este tipo de contrato. No afretamento por viagem o afretador não interfere na operação da embarcação. Esta permanecerá sobre total controle do fretador (armador), que será responsável por todas as despesas referentes à embarcação. As únicas despesas que ficam sob a responsabilidade do afretador são as taxas que incidem sobre o frete e sobre a carga transportada pela embarcação. Essas taxas variam de acordo com a legislação de cada país (Santos, 2014).

2.3.2.4 *Contratos de Opção*

Além dos tipos de contratos de afretamento estabelecidos na legislação brasileira (Art. 2º da Lei 9.432/1997), existe a modalidade de Contrato de Opção, que pode ser exercido ou não pelo afretador. Neste tipo de contrato, qualquer das modalidades de afretamento citadas anteriormente pode ser contratada. Mas, em geral, como observa-se em Siddiqui and Verma (2017), a modalidade de afretamento mais utilizada em contratos de opção é o Afretamento por Tempo (TCP).

Ao longo da vigência do Contrato de Opção, o afretador pode exercer a opção de afretamento conforme as condições estabelecidas no contrato. Esta modalidade é utilizada como um seguro contra as incertezas do mercado (Hellermann et al., 2013).

No mercado brasileiro de embarcações de apoio marítimo, este tipo de contrato ainda não é utilizado. O que algumas vezes acontece é a inclusão, em contratos de afretamento por tempo determinado, de uma opção (ou cláusula) de renovação por um tempo pré-definido (de até igual período). Vale ressaltar que esta prática é completamente diferente dos contratos de opção citados anteriormente. As cláusulas de prorrogação têm como principal objetivo diminuir

o tempo de contratação e são praticadas por empresas cujos processos de contratação são muito longos.

2.4 PREÇOS DE AFRETAMENTO

A previsão do comportamento do mercado de fretes é de fundamental importância para as decisões relativas à forma e ao tempo dos contratos de afretamento dos navios de apoio *offshore*. Portanto, a formação da frota de navios afretados, além das especificidades das operações de apoio *offshore*, da demanda a ser atendida e da regulamentação do transporte marítimo vigente no país, é fortemente impactada pelo comportamento dos preços de afretamento.

De acordo com Adland, Cariou e Wolff (2017), diferentemente do mercado financeiro, onde o volume de transações é grande e os ativos relacionados são homogêneos, permitindo a derivação direta e quase contínua dos índices que medem os movimentos dos preços, no mercado de frete marítimo, as transações são heterogêneas ocorrendo em intervalos de tempo irregulares e com baixa frequência. Cada contrato firmado é tipicamente diferente do último, uma vez que as especificações técnicas e a rota de cada navio podem ser substancialmente diferentes. Por isso, a construção dos índices de mercado é feita por especialistas – *shipbrokers* (corretores de navios) – que atuam como intermediários entre compradores e vendedores de transporte marítimo.

O mercado de navios de apoio *offshore* – em inglês, *Offshore Support Vessels* (OSV) – é muito diferente do mercado tradicional de navegação de longas distâncias. Este tipo de embarcação, como mostrado anteriormente, suporta atividades logísticas cruciais para a exploração e produção de petróleo e gás; os mercados *spot* OSV são de curto prazo, altamente dependente do clima e da natureza local, gerando alta volatilidade; os navios são bastante heterogêneos em termos de especificação técnica, podendo transportar ao mesmo tempo diferentes tipos de carga (por exemplo, líquidos, químicos e carga geral). Essas características peculiares dificultam a criação de índices objetivos de preço para o mercado e tornam a análise de formação de preços para contratos individuais uma tarefa ainda mais importante (Adland et al., 2017). As restrições impostas pela regulamentação de cabotagem de alguns países, como apresentado anteriormente, restringem essa atividade, impondo condições que se refletem na oferta, nos custos e nos tempos de realização dos processos de compra dos contratos.

A análise de preços do mercado de frete marítimo é realizada por diferentes atores, que emitem sistematicamente publicações técnicas sobre o contexto, as tendências e as incertezas desse mercado. Entre as principais, podem-se citar: Clarkson Research (Clarkson, 2019), Drewry Shipping Consultants (Drewry, 2019) e McQuilling Partners (McQuilling, 2019). No Brasil, informações sobre este mercado também podem ser encontradas na Brazilship/Scanbrasil Comércio Marítimo (Brazilship / Scanbrasil, 2017).

Fatos relacionados à exploração e produção de O&G afetam diretamente e de forma quase imediata o mercado de frete marítimo de uma determinada região. Mas além destes, existem outros fatores que devem ser observados pelas empresas. Fatores macroeconômicos, como as taxas de câmbio, o PIB, os preços do petróleo (que afetam a demanda por transporte) e do ferro/aço (que afetam a construção de novos navios); geopolíticos, como guerras e crises políticas em países produtores de insumos ou demandantes por transporte marítimo; ou ambientais, como vazamentos de petróleo ou catástrofes naturais de grandes proporções.

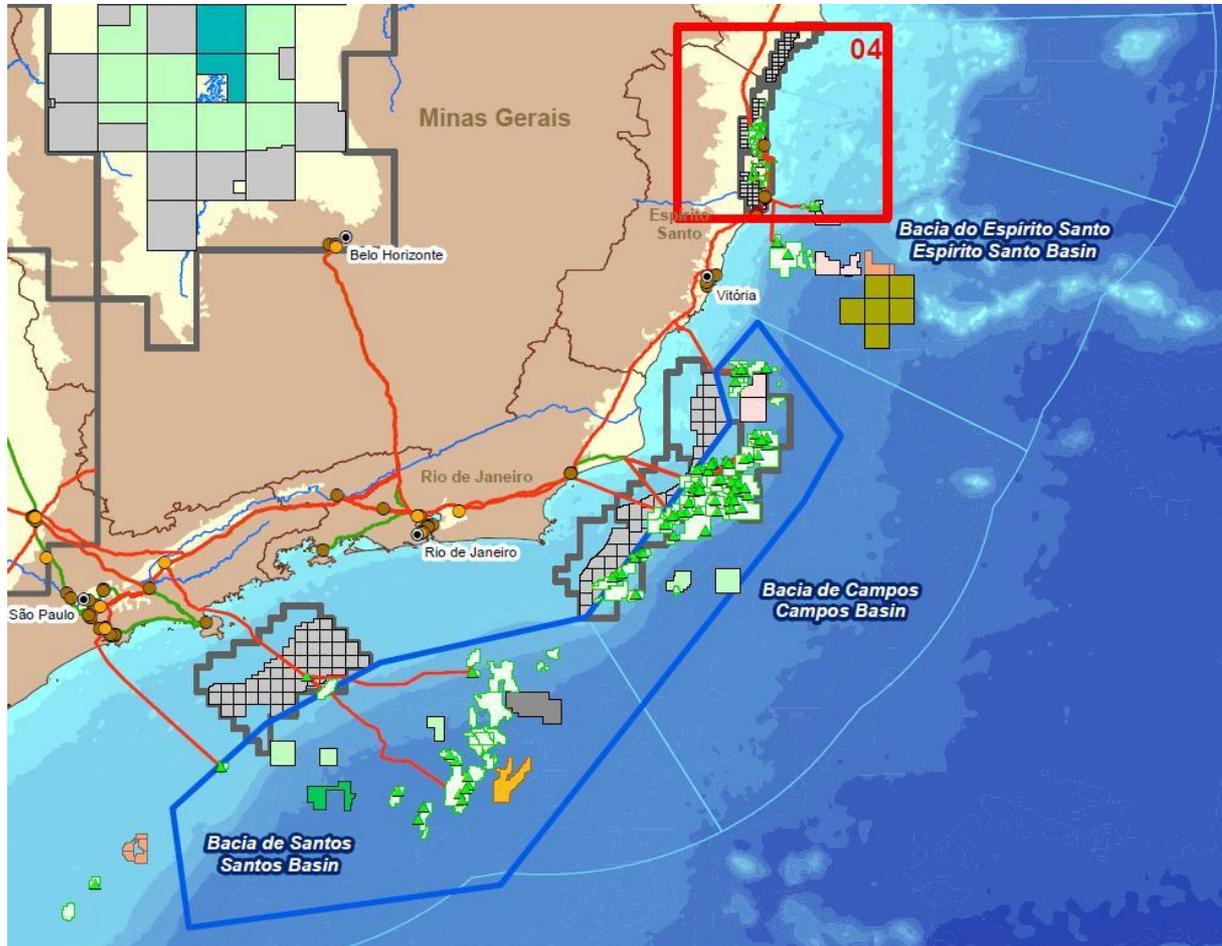
No caso do mercado de OSV, um fator que merece atenção especial é a realização de concessões de áreas de exploração de petróleo e gás. A perspectiva de novas áreas de exploração em um determinado país ou região aquece o mercado de frete deste tipo de navio. Por outro lado, a retirada de concessões ou a sinalização por parte de governos de que as atividades exploração e produção de O&G serão reduzidas nos próximos anos afetam a demanda no médio e longo prazo.

No seu relatório de outubro de 2017, a Brazilship/Scanbrasil (Brazilship / Scanbrasil, 2017), antes de apresentar os valores atualizados do mercado de frete no Brasil, informa sobre a 14ª Rodada de Concessão e sobre a 2ª e a 3ª rodadas do Pré-Sal. Destaca que a Exxon voltou como operadora no Brasil vencendo dois dos 13 blocos concedidos na Bacia de Campos; e que a Petrobras ficou com seis blocos. No Pré-Sal, a segunda rodada teve Shell e Statoil apresentando-se como operadores de Gato do Mato Sul e Carcará Norte, respectivamente, em áreas próximas de concessões anteriores obtidas; e Petrobras ficando com um bloco da Área de Sapinhoá. Na terceira rodada, Petrobras venceu em dois blocos e Shell em um bloco, como operadores. Estes fatos geraram a realização de novos contratos de afretamento para a Statoil Brasil e para a Petrobras.

O mapa apresentado na Figura 6 mostra uma visão geral dos blocos exploratórios das Bacias do Espírito Santo, de Campos e de Santos. O mapa completo das regiões exploratórias

do Brasil e mapas de blocos específicos são encontrados na página da ANP na internet (ANP, 2018a).

Figura 6: Blocos exploratórios das Bacias do Espírito Santo, de Campos e de Santos



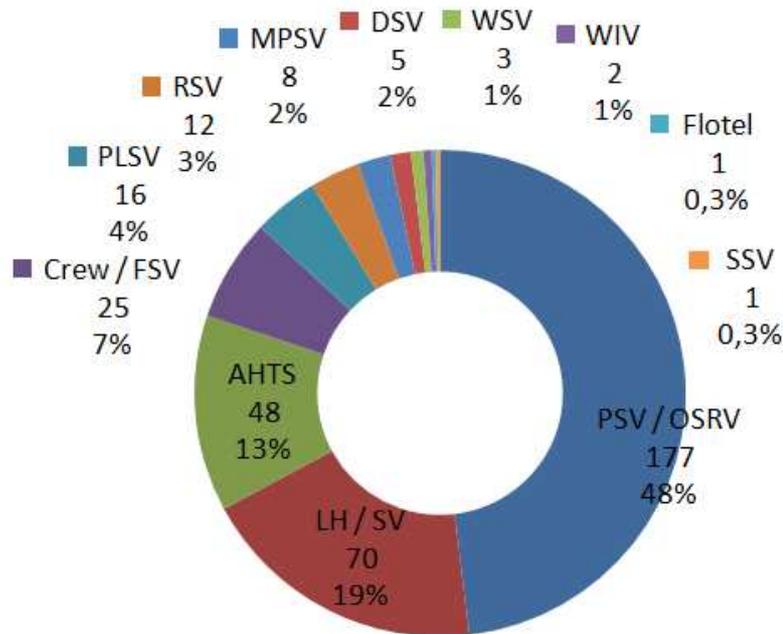
Fonte: ANP (2018c)

2.5 MERCADO DE FRETE NO BRASIL

O mercado de frete de navios de apoio *offshore* no Brasil tem como principais demandantes empresas produtoras de petróleo e gás natural que atuam na costa brasileira, em especial nas bacias de Campos, de Santos e do Espírito Santo e nas regiões do Pré-Sal. Conforme o relatório de março de 2019 da Frota de Embarcações de Apoio Marítimo no Brasil, emitido pela Associação Brasileira das Empresas de Apoio Marítimo (ABEAM, 2019a), a frota de apoio marítimo em águas brasileiras totalizava, ao final de março daquele ano, 368 embarcações, sendo 329 (89%) de bandeira brasileira e 39 (11%) de bandeira estrangeira. Comparativamente a março de 2015, foram desmobilizadas 140 embarcações de bandeira estrangeira e acrescentadas 76 de bandeira brasileira. Cerca de trinta e três embarcações, originalmente de bandeira estrangeira, tiveram suas bandeiras trocadas para bandeira brasileira.

Segundo esse mesmo relatório, o maior número de embarcações existentes no Brasil era do tipo *Platform Supply Vessels (PSV) / Oil Spill Response Vessel (OSRV)*, com 177 embarcações (48%); seguidas por *Line Handling (LH) / Mini Suplly Vessel (SV)*, com 70 (19%) e *Anchor Handling Tug Supply (AHTS)*, com 48 (13%). O Gráfico 3 mostra a distribuição das embarcações por tipo de embarcação.

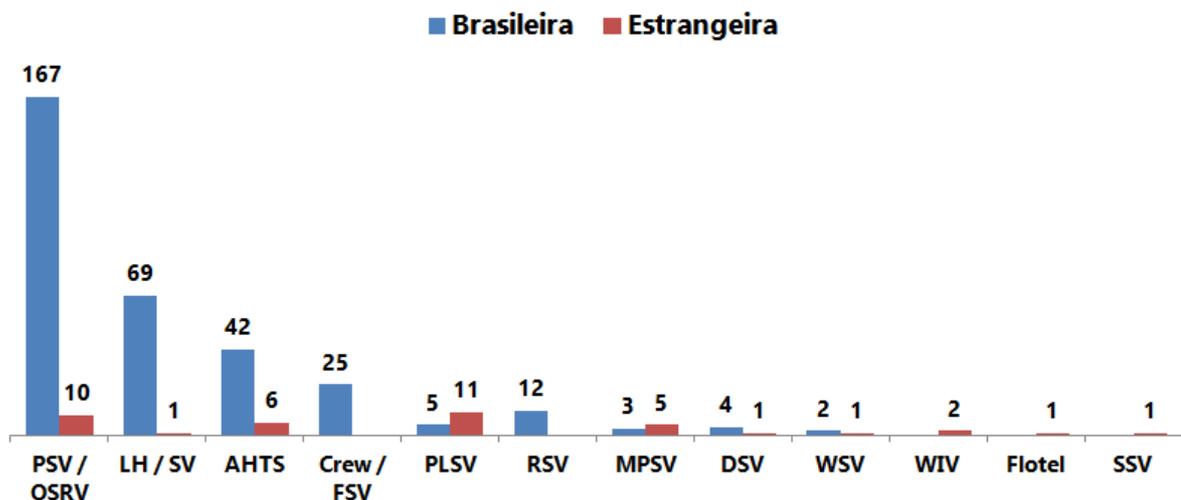
Gráfico 3: Quantidade de embarcações por tipo de embarcação



Fonte: ABEAM (2019)

As quantidades de embarcações de bandeiras brasileira e estrangeira, por tipo de embarcação, são apresentadas no Gráfico 4.

Gráfico 4: Quantidade de embarcações de bandeiras brasileira e estrangeira por tipo de embarcação



Fonte: ABEAM (2019)

As cinco maiores empresas de navegação de apoio *offshore* atuando no Brasil, segundo a ABEAM, (2019), são apresentadas no Quadro 3. A tabela completa da distribuição frota por empresa é apresentada no Anexo I.

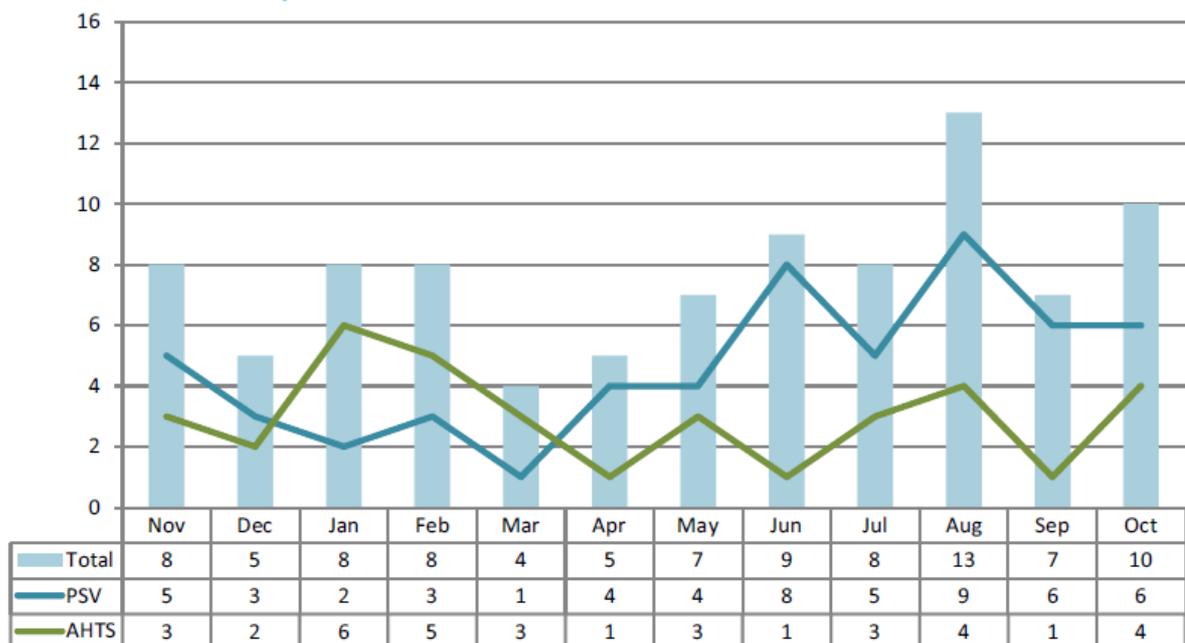
Quadro 3: Cinco maiores empresas de navegação de apoio *offshore*

Empresa	Status	Bandeira		Total
		Brasileira	Estrangeira	
BRAM / ALFANAVE	ABEAM	50	2	52
CBO / OCEANA	ABEAM	33		33
STARNAV	ABEAM	32		32
DOF / NORSKAN	ABEAM	19	5	24
WSUT	ABEAM	23		23

Fonte: ABEAM (2019)

A realização das novas rodadas de concessão ocorridas a partir de 2017, tanto na bacia de Campos quanto nas áreas do Pré-Sal, trouxe novas perspectivas para o mercado. No mês de outubro de 2017, foram realizados 10 novos contratos de curto prazo, sendo seis de PSV e quatro de AHTS (Brazilship / Scanbrasil, 2017). O Gráfico 5 mostra, mês a mês, o número de contratos de curto prazo de PSV e AHTS realizados entre Nov/2016 e Out/2017.

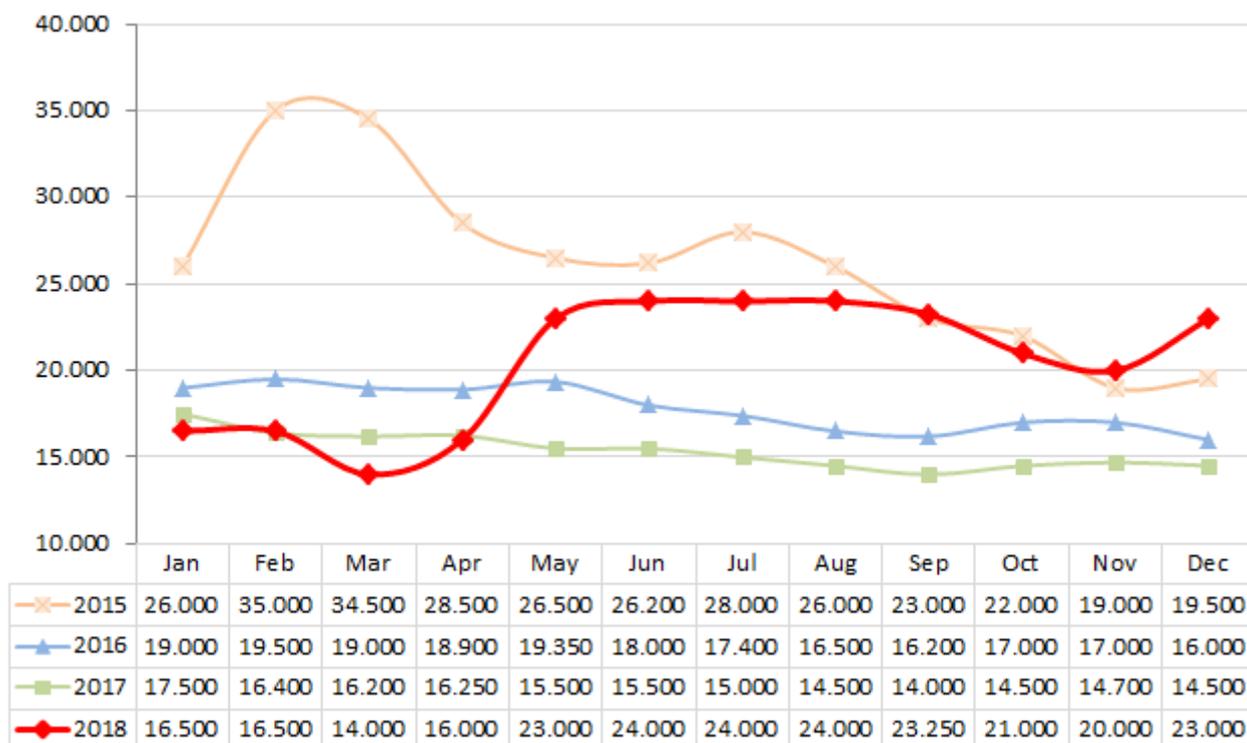
Gráfico 5: Número de contratos *spot* de afretamento de PSV e AHTS no Brasil



Fonte: BRAZILSHIP / SCANBRASIL (2017)

As evoluções dos valores médios mensais das taxas diárias de frete no mercado de curto prazo (*Spot*) no Brasil nos anos de 2015 a 2018 são apresentadas no Gráfico 6. Já os valores médios anuais das taxas diárias de frete de contratos de longo prazo podem estar na Figura 7.

Gráfico 6: Valores médios mensais das taxas diárias de frete marítimo *spot* no Brasil – 2015 a 2018



Fonte: BRAZILSHIP / SCANBRASIL (2019)

Observando-se o Gráfico 6, nota-se que as taxas *spot* oscilaram no ano de 2015, apresentando queda acentuada a partir da segunda metade, passando de US\$28 mil/dia para US\$19,5 mil/dia. Em 2016 e 2017, as taxas tiveram um comportamento semelhante de queda, chegando ao último mês a US\$14,5 mil/dia. Já o ano de 2018 começou com um aumento e, em seguida, uma queda de fevereiro para março, mas, a partir daí, apresentou um grande aumento, fechando o ano com a taxa de US\$ 23 mil/dia.

De acordo com a Brazilship/Scanbrasil, as taxas diárias caíram nos anos de 2015 a 2017 devido ao excesso de tonelagem no mercado. A baixa utilização e a redução das taxas diárias levaram vários proprietários a recolher seus navios para o estaleiro. Como consequência, há poucos navios disponíveis no mercado *spot*, pressionando as taxas diárias para cima.

Figura 7: Valores médios anuais das taxas diárias de frete marítimo a termo (TCP)

	Large PSV
■ 2014	\$35.700,00
■ 2015	\$25.600,00
■ 2016	\$17.900,00
■ 2017	\$15.500,00
■ 2018	\$16.200,00

Fonte: BRAZILSHIP / SCANBRASIL (2019)

As taxas de contratos de afretamento por tempo (TCP), como pode-se observar na Figura 7, apresentam uma trajetória decrescente de 2014 a 2017, com uma queda acentuada de 2015 para 2016, chegando ao menor valor em 2017. Essa tendência é interrompida em 2018, quando as taxas voltam a subir. Segundo o relatório da Brazilship/Scan Brasil de 2019 (Brazilship / Scanbrasil, 2019), esses níveis devem permanecer em 2019/2020, mas com uma leve tendência de crescimento, principalmente em PSVs de alta tecnologia devido à exploração de concessões da região do Pré-Sal com requisitos de qualidade mais altos.

O relatório da Brazilship/Scan Brasil de 2017 apresenta alguns contratos de médio prazo (entre 2 e 3 anos) e longo prazo (mais de 3 anos) já assinados ou com previsão de assinatura ainda no ano de 2017. Vide Anexo II.

3 MÉTODO DE PESQUISA

3.1 ENQUADRAMENTO DA PESQUISA

O método de pesquisa escolhido para o desenvolvimento deste trabalho de tese é a *Modelagem*. Como método de pesquisa, a modelagem apoia os investigadores para o melhor entendimento dos problemas, uma vez que os modelos são representações simplificadas da realidade e permitem uma compreensão do ambiente que está sendo estudado (Dresch et al., 2015). A modelagem de um sistema permite a observação de seu comportamento sob determinadas condições, de forma a, cientificamente, estudá-los e entendê-los (P J de Freitas Filho, 2008).

A modelagem pode ser dividida em duas abordagens: (i) *hard*, fundamentada em bases matemáticas, indicada para problemas bem estruturados e compreendidos; e (ii) *soft*, que considera todo o contexto do problema, recomendada quando é necessário considerar questões comportamentais e contextuais (Dresch et al., 2015; Pidd, 1998).

Pelas características do problema de pesquisa, a abordagem de modelagem mais indicada é a *hard*. Entre as técnicas abrangidas por esta abordagem, estão: programação matemática (métodos de otimização), heurísticas e meta-heurísticas e simulação.

3.2 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

O desenvolvimento deste trabalho de pesquisa segue os passos apontados pela maioria dos trabalhos envolvendo modelagem de sistemas. Entre as fontes sobre o assunto estão os textos clássicos de Banks, Carson e Nelson (1984), Pegden, Sadowski e Shannon (1995), Pidd (1998), Law e Kelton (2000) e Hillier e Lieberman (2010).

3.2.1 Formulação e análise do problema

Uma vez identificado o problema real, ele precisa ser claramente definido, especificado e analisado para fins de modelagem. Nesta etapa se definem as questões que se espera responder: *Que repostas pretende-se obter com o estudo? Qual o escopo do estudo? Quais são as premissas e informações de entrada do modelo?*

Esta etapa da pesquisa foi realizada através de entrevistas e busca de informações na indústria, em instituições governamentais e na literatura.

O problema foi identificado em uma grande empresa do setor de óleo e gás, onde foi realizada uma série de reuniões visando a sua definição e especificação. Ao longo das reuniões, foram feitas as seguintes questões:

- (1) *De forma geral, do que se trata o problema?* – foi solicitado que o entrevistado definisse o problema de forma sucinta e clara;
- (2) *Por que este problema é importante?* – o objetivo desta questão foi conhecer a relevância do problema para a empresa e para indústria como um todo;
- (3) *Quais são os atores e processos de negócio envolvidos?* – teve por objetivo contextualizar o problema;
- (4) *Quais são os critérios para avaliação de desempenho do sistema?* – foco em definir as métricas e indicadores para avaliação de desempenho do método;
- (5) *Quais são as dificuldades e restrições do problema?* – identificar os limites de realização e definir escopo do trabalho;
- (6) *Existe solução para o problema?* – verificar a relevância acadêmica e as dificuldades relacionadas à busca de solução.

O complemento às respostas fornecidas pelos profissionais da empresa foi buscado na literatura e em instituições dos setores público e privado. A análise das respostas gerou novas dúvidas e questionamentos sobre o mercado e sobre a legislação e regulamentação do transporte marítimo e afretamento no país. As informações e respostas obtidas foram compiladas e organizadas para subsidiar o desenvolvimento do primeiro e do segundo capítulo; e para desenvolver a especificação técnica do problema para fins de modelagem.

Para a especificação técnica do problema, foram respondidas as seguintes questões (Paulo José Freitas Filho, 2008; Hillier & Lieberman, 2010; Law & Kelton, 2000; Pidd, 1998):

- (7) *Que respostas pretende-se obter com o estudo?* – esta questão visa a definir os objetivos que se pretende alcançar com o método de suporte à decisão. É necessário definir o objetivo principal do método, os objetivos secundários, as informações que serão geradas pelo modelo computacional e as análises que se pretende fazer;

- (8) *Qual o escopo do estudo?* – determinar os limites do estudo, a abrangência do método: os elementos do sistema que serão considerados, o horizonte de tempo da análise etc.
- (9) *Quais são as premissas e informações do modelo?* – definir os pressupostos e simplificações que serão considerados no modelo, as informações que são relevantes para alimentar o modelo e como essas informações serão utilizadas: valores médios, percentis, variáveis estocásticas etc.
- (10) *Que recursos serão necessários?* – horas de trabalho, equipamentos, assinatura de publicações, recursos computacionais: *hardware* e *softwares* etc.

3.2.2 Desenvolvimento do modelo conceitual

Nesta etapa, é desenvolvida a estrutura conceitual do modelo, incluindo eventos e elementos fundamentais. O sistema modelado deve ser cuidadosamente descrito. A utilização de recursos gráficos (fluxogramas, desenhos e croquis) é útil para refletir o detalhamento do modelo e para a compreensão de fluxos de informações, entidades e recursos no sistema.

Para o desenvolvimento do modelo conceitual, foram respondidas as seguintes questões (Paulo José Freitas Filho, 2008; Hillier & Lieberman, 2010; Law & Kelton, 2000; Pidd, 1998):

- (11) *Qual a estratégia de modelagem?* – definir se a modelagem será discreta, contínua ou uma combinação delas;
- (12) *Que quantidade de detalhes deve ser incorporada?* – depende das respostas às questões (8), (9) e (10). Quanto maior o nível de detalhes, maior o tempo de processamento;
- (13) *Que nível de agregação dos processos deve ser implementada?* – da mesma forma, depende das respostas às questões (8), (9) e (10);
- (14) *Como o modelo reportará os resultados?* – depende da definição das abordagens e técnicas que serão utilizadas no método de análise e solução. Os resultados podem ser apresentados após a execução do modelo computacional e/ou durante a sua execução, por meio de animações.;
- (15) *Como os dados serão inseridos no modelo?* – os dados podem ser inseridos manualmente, através de leitura de arquivo externo ou de ambas as formas.

3.2.3 Desenvolvimento do modelo matemático

Como o problema envolve um processo de otimização – minimização de uma função de custo –, a modelagem matemática do problema se mostra indicada. Portanto, é necessário estabelecer relações (lineares ou não lineares) entre as variáveis de interesse. O modelo matemático deve ser conciso, preciso e computável.

Um modelo de otimização envolve: parâmetros (não controláveis), variáveis de decisão (controláveis), restrições (expressas por meio de equações), objetivos (funções de maximização ou minimização), medidas de performance e variáveis de saída (receitas, custos, tempo etc.) (Gomide, 2007).

Foram respondidas as seguintes questões para a modelagem do problema (Bonnans, 2006; Hillier & Lieberman, 2010):

- (16) *Qual o objetivo do modelo?* – pode ser maximizar ou minimizar uma determinada métrica baseada em variáveis de decisão;
- (17) *Quais são os parâmetros do modelo?* – representam informações que serão inseridas no modelo;
- (18) *Quais são as variáveis de decisão do modelo?* – variáveis que serão controladas pelo modelo para determinar a solução ótima;
- (19) *Quais são as variáveis de saída do modelo?* – variáveis que serão utilizadas para a tomada de decisão;
- (20) *Qual(is) a(s) função(ões) objetivo(s) do modelo?* – funções que serão maximizadas ou minimizadas;
- (21) *Quais são as restrições do modelo?* – limites do problema expressos por meio de equações e inequações;
- (22) *Como se classifica o modelo de otimização?* – as principais classificações da otimização são: linear ou não-linear; determinístico ou estocástico; contínuo ou discreto; real, inteira ou mista; com uma ou mais (multiobjetivo) funções objetivo.

3.2.4 Definição do método de análise e solução do problema

Esta etapa da pesquisa começa com a pesquisa bibliográfica, cujo resultado se encontra no quarto capítulo.

3.2.4.1 Pesquisa bibliográfica

Nesta etapa, é realizada a pesquisa bibliográfica para o capítulo de revisão da literatura.

As questões para o desenvolvimento da pesquisa bibliográfica são as seguintes:

- (23) *Qual o tema mais amplo relacionado ao problema?* – definir as palavras-chave relacionadas ao tema;
- (24) *Quais são os subtemas de interesse (abordagens de solução) relacionados ao tema mais amplo?* – definir as palavras-chave relacionadas aos subtemas;
- (25) *Quais são os critérios de pesquisa?* – definir o horizonte da pesquisa e em que campos as palavras-chave serão pesquisadas (título, resumo, palavras-chave ou uma combinação destes);
- (26) *Em que bases de dados a pesquisa será feita?*

A pesquisa bibliográfica começa pelo tema mais amplo do problema. O objetivo é verificar na literatura quais são os tipos de problema de maior interesse relacionados ao tema e aos subtemas de interesse. Então, depois de compreender o que a literatura apresenta sobre o tema, procura-se identificar dentre os trabalhos encontrados aqueles que mais se assemelham ao problema em análise. Nesta primeira varredura, busca-se ter uma visão geral sobre as possibilidades de caminhos para a busca da melhor solução.

A primeira etapa da pesquisa começa pelos temas: afretamento (em inglês, *chartering* ou *affreightment*), e frete (*freight*). As pesquisas foram feitas pelos termos em inglês nos campos de títulos, resumos e palavras-chaves, publicados nos últimos 10 anos, nas bases Mendeley, Science Direct e Scopus.

Nos dois conjuntos encontrados, foram separadas as publicações (artigos e livros) referentes ao subtema marítimo (*maritime, sea, shipping*) e, depois, sobre alguns temas relacionados a possíveis abordagens de solução para o problema: modelagem (*model, modeling, modelling*); otimização (*optimization, optimizing, optimisation, optimise, optimal*); simulação (*simulation*) sistema baseados em agentes (*agent based, multi agent*); análise multicritério (*multiple criteria, multi criteria, multicriteria*); contrato de suprimento com opções (*supply contract with options, flexible supply options, supply chain and option contract*); e teoria constructal (*constructal theory*). Verificou-se também a existência de publicações que contivessem alguma forma de revisão da literatura (*literature review*).

Com base nos procedimentos de coleta de referências e nos critérios apresentados anteriormente, as palavras-chave pesquisadas resultaram nos quadros 4 e 5. O Quadro 4 apresenta a busca usando como referência o termo afretamento. Até o momento da pesquisa, foram encontradas 354 publicações, com 111 publicações repetidas em pelo menos duas das bases, totalizando 243 publicações. O Quadro 5 representa o resultado a partir do termo frete marítimo. Foram encontradas 293 publicações, com 60 repetidas em pelo menos duas das bases, totalizando 233 publicações.

Quadro 4: Pesquisa bibliográfica: afretamento, afretamento marítimo e subtemas relacionados a abordagens de solução

		Mendeley	Science Direct	Scopus	Total	Não repetidas	
<i>Afretamento (Chartering)</i>		149	27	178	354	243	
<i>Revisão da literatura</i>		6	3	3	12	7	
Afretamento (Chartering)	<i>Modelagem</i>	<i>Modelagem</i>	46	12	57	115	82
		<i>Otimização</i>	20	8	18	46	25
	<i>Simulação</i>	8	2	15	25	17	
	<i>Sistema baseado em agentes</i>	2	0	3	5	3	
	<i>Análise multicritério</i>	4	0	3	7	4	
	<i>Marítimo</i>	<i>Marítimo</i>	38	14	70	122	79
<i>Revisão da literatura</i>		2	3	2	7	3	
<i>Modelagem</i>		<i>Modelagem</i>	21	8	38	67	43
		<i>Otimização</i>	15	5	20	40	23
<i>Simulação</i>		3	1	3	7	4	
	<i>S. agentes</i>	2	0	2	4	2	

Fonte: Elaborado pelo autor

Já para frete, as pesquisas resultaram em uma quantidade excessiva de publicações: somente na base Scopus, foram encontradas mais de 10 mil publicações. Por isso, são analisadas apenas as do subconjunto frete marítimo. Foram encontradas 293 publicações, com 60 repetidas em pelo menos duas das bases, totalizando 233 publicações.

Quadro 5: Pesquisa bibliográfica: frete marítimo e subtemas relacionados a abordagens de solução

		Mendeley	Science Direct	Scopus	Total	Não repetidas	
<i>Frete marítimo</i>		105	25	163	293	233	
<i>Revisão da literatura</i>		5	3	3	11	7	
Frete marítimo (Maritime Freight)	<i>Modelagem</i>	<i>Modelagem</i>	52	15	81	148	95
		<i>Otimização</i>	11	3	14	28	19
		<i>Simulação</i>	10	2	13	25	17
		<i>S. agentes</i>	1	0	0	1	1
	<i>Análise multicritério</i>	5	3	21	29	28	

Fonte: Elaborado pelo autor

O objetivo desta pesquisa bibliográfica foi encontrar possíveis soluções para problemas similares ou trabalhos correlatos ao tema. As principais publicações dos subconjuntos definido

acima foram selecionadas para compor o capítulo de revisão bibliográfica, onde elas são analisadas visando subsidiar a escolha das abordagens e técnicas que farão parte do método de análise e solução do problema.

3.2.4.2 *Definição do método*

A partir da revisão bibliográfica e das características do problema, nesta etapa, são analisadas as abordagens e técnicas de solução para compor o método de análise e solução do problema.

As seguintes questões foram respondidas para a análise e avaliação das abordagens:

- (27) *Que características da abordagem de solução podem contribuir para a solução do problema?*
- (28) *A abordagem já foi utilizada em problemas semelhantes?*
- (29) *A abordagem exige esforço computacional?*
- (30) *Os dados disponíveis permitem a utilização da abordagem?*
- (31) *A combinação da abordagem com outras potencializa a obtenção de resultados?*

O método definido para a análise e solução do problema de tese é apresentado no sexto capítulo.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é resultado da pesquisa bibliográfica realizada visando encontrar soluções para problemas semelhantes ao problema de tese, que faz parte do método de pesquisa apresentado no capítulo anterior.

O trabalho de revisão da literatura realizado gerou o artigo: *Optimum Composition of Charter Contracts for the Renewal of the Fleet of Offshore Support Vessels Considering Uncertainties: A Literature Review*, publicado na revista *International Journal of Heat and Technology*. O artigo se encontra no Apêndice I.

A pesquisa bibliográfica foi organizada em quatro categorias de publicações. Para a primeira categoria, buscou-se por trabalhos diretamente relacionados a afretamento marítimo, que fornecessem uma visão sobre quais são os problemas mais importantes para o setor e como o problema proposto se insere neste contexto. A formação e o comportamento dos preços de afretamento se destacam como um importante fator para a escolha dos tipos de contrato de afretamento. Por isso, este tema é abordado como uma subcategoria dentro dos problemas de afretamento marítimo. As três últimas categorias dizem respeito especificamente à busca de abordagens de solução para o problema. Verificou-se que os métodos de otimização são os mais utilizados em problemas de transporte e afretamento. Por isso, a segunda categoria de artigos corresponde às soluções de otimização encontradas em problemas deste tipo, que podem ser diretamente aplicadas ao problema apresentado. Já a terceira categoria de artigos engloba outras abordagens de solução aplicadas em problemas de transporte e afretamento. Por fim, a quarta categoria diz respeito a abordagens de solução aplicadas a outros tipos de problema que, contudo, apresentam alguma correlação com o problema proposto. Por exemplo, um dos artigos apresentados aborda o problema da seleção de uma aeronave, que pode ser correlacionado ao problema de seleção de tipos de afretamento.

4.1 PROBLEMAS DE AFRETAMENTO MARÍTIMO

Esta seção tem por objetivo fornecer uma visão geral sobre os problemas mais proeminentes para o setor de afretamento marítimo e verificar como o problema da renovação de frota de apoio *offshore* através do afretamento se insere neste contexto. São analisados aspectos importantes, tanto do ponto de vista do fornecedor de serviços e transporte marítimo, quanto das empresas que afretam as embarcações para utilizá-las nas suas atividades logísticas.

Devido à grande relevância para a indústria, a formação e o comportamento dos preços de afretamento são abordados com destaque ao final desta seção, em uma subseção intitulada *o mercado de frete marítimo*.

Ozer e Cetin (2012) analisaram a escolha de tipo de afretamento por armadores turcos de carga geral e granel seco e os critérios que afetam e determinam essa escolha. A metodologia utilizada abrange uma revisão da literatura, entrevistas e pesquisa aprofundada sobre o tema. O estudo revela que o tipo de frete preferido por armadores turcos é o frete por viagem (VCP) e que os armadores consideram o risco na seleção do tipo de afretamento, a confiabilidade do afretador e as condições de operação do navio os fatores mais importantes para a decisão sobre os tipos de afretamento.

Ainda pelo lado dos armadores, Álvarez-Sanjaime et al. (2013a), analisam a integração vertical e exclusividades no frete de transporte marítimo. Os autores procuram mostrar as vantagens estratégicas que um fornecedor de transporte marítimo pode obter ao construir seu próprio terminal marítimo. Na mesma edição da revista, esses autores publicaram outro artigo (Álvarez-Sanjaime et al., 2013a), este sobre competição e integração horizontal no transporte marítimo. O artigo modela a competição pelo frete de mercadorias entre os setores rodoviário e marítimo. No modelo com integração horizontal apresentado no artigo, os operadores oferecem serviços diferenciados e, através de oligopólio, se valem de economias de escala no setor como vantagem competitiva.

Pantuso et al. (2014) apresentam uma pesquisa bibliográfica sobre o problema de mix e dimensionamento de frota no transporte marítimo, ou em inglês, *fleet size and mix problem (MFSMP)*, também com foco em empresas de navegação. Destacam que as flutuações de mercado e as incompatibilidades frequentes entre as capacidades e as demandas por embarcação evidenciam a relevância do problema e a necessidade de ferramentas e métodos mais precisos para o suporte à tomada de decisão. Depois de analisar a literatura relacionada ao problema e suas variantes e extensões, o artigo procura resumir o estado da arte sobre o tema, destacando as principais contribuições de pesquisas anteriores. O trabalho também procura identificar aspectos importantes que não foram captados nas pesquisas anteriores. Segundo os autores, a maior parte dos trabalhos de pesquisa tem focado na composição inicial da frota e não considera a volatilidade do mercado. Afirmam que pesquisas futuras devem focar mais na renovação da frota, que precisa se adaptar continuamente às mudanças do mercado. As incertezas relacionadas ao mercado precisam ser consideradas em trabalhos futuros.

Já pelo lado do afretador, a revisão bibliográfica realizada por Siddiqui e Verma (2017) cobre duas grandes áreas: gestão da frota e contratos de afretamento e opções. Segundo os autores, no nível estratégico de gestão da frota, Dantzig e Fulkerson (1954) foram os primeiros a considerar tanto os custos fixos de aquisição de frota quanto os custos variáveis de transporte; Jin e Kite-Powell (2000) propuseram um modelo baseado em teorias de controle ótimo para tratar da programação de reposição e utilização de navios; Meng e Wang (2011) apresentaram um modelo de programação dinâmica com geração de cenários para o problema de desenvolvimento e implantação de frota multi-períodos; Fagerholt et al. (2010) consideraram a incerteza no planejamento e desenvolveram uma metodologia de suporte à decisão que combinava simulação de Monte Carlo para a estimação dos parâmetros e um modelo de otimização para aplicações no transporte marítimo. No nível tático, os autores citam Sherali, Al-Yakoob e Hassan (1999), que avaliaram contratos de afretamento para facilitar o roteamento e a programação de uma frota de embarcações heterogêneas, e indicam a leitura das revisões feitas por Christiansen, Fagerholt e Ronen (2004) e Christiansen, Fagerholt, Nygreen e Ronen (2007, cap. 4). Siddiqui e Verma (2017) também destacam que, embora boa parte dos trabalhos sobre o tema indiquem contratos *spot* em decisões de ajuste de frotas, contratos complexos diversos e suas opções também vêm sendo utilizados para este fim.

Dinwoodie et al. (2013) procuram sintetizar a percepção de especialistas marítimos sobre a mudança dos padrões de frete marítimo para o transporte de mercadorias até 2050, através de um estudo clássico de Delphi. O debate abrange os fluxos marítimos de petróleo divulgados globalmente; e fatores relacionados a fluxos marítimos futuros, incluindo o crescimento econômico, as mudanças no mercado de frete e os períodos de transporte. De forma resumida, as percepções indicam uma redução gradual do frete marítimo de longa distância do petróleo, devido principalmente à crescente intolerância aos combustíveis fósseis e a fontes locais de suprimento de petróleo. Esta tendência, se confirmada, poderia afetar o mercado de suprimento de petróleo no mundo e, conseqüentemente, o frete de embarcações de apoio *offshore*.

O mercado de frete marítimo

De acordo com Adland et al. (2017), diferentemente do mercado financeiro, onde o volume de transações é grande e os ativos relacionados são homogêneos, permitindo a derivação direta e quase contínua dos índices que medem os movimentos dos preços, no mercado de frete marítimo, as transações são heterogêneas ocorrendo em intervalos de tempo

irregulares e com baixa frequência. Cada contrato firmado é tipicamente diferente do último, uma vez que as especificações técnicas e a rota de cada navio podem ser substancialmente diferentes. Por isso, a construção dos índices de mercado geralmente é feita por especialistas – *shipbrokers* (corretores de navios) – que atuam como intermediários entre compradores e vendedores de transporte marítimo. Apesar das dificuldades, é possível encontrar na literatura alguns trabalhos sobre predição e construção de índices de preços de afretamento marítimo.

Nomikos et al. (2013) discutem uma extensão da representação tradicional lognormal do risco neutro da dinâmica das taxas de frete *spot* para um modelo de difusão com saltos de magnitudes e chegadas aleatórias. Em seguida, desenvolvem uma estrutura de avaliação de opções sobre a taxa média de frete *spot*, que são comumente negociadas no mercado de derivativos de frete. Ao explorar a eficiência computacional do esquema de precificação proposto, calibram o modelo de difusão de saltos usando cotações do mercado de opções sobre os índices médios de afretamento das rotas Baltic Capesize, Panamax e Supramax. Mostram que a configuração estendida de saltos produz importantes melhorias de modelo em relação à configuração lognormal básica.

Kavussanos et al. (2014) investigam excedentes econômicos entre os mercados derivativos de commodities e de frete. A relação econômica testada relaciona o preço derivativo da commodity transportada com o preço derivativo da taxa de frete. Os dados de alta frequência sobre commodities são sincronizados com os dados de frete e as taxas de frete de diferentes embarcações são combinadas com carteiras (cestas) de mercadorias que esses navios carregam. A investigação de vários tipos de commodities transportados sob diferentes tipos de contratos de frete revela que, na maioria dos casos, a nova informação aparece primeiro nos retornos e volatilidades dos mercados de commodities futuros, antes de se espalhar nos mercados derivativos de frete. Os resultados podem ajudar a melhorar a compreensão dos mecanismos de transmissão de informações entre os mercados de commodities e de frete.

No setor de transporte de petróleo, conforme Siddiqui e Verma (2017), uma variedade de contratos de afretamento de curto e médio prazo – tais como contratos por viagem no mercado *spot* e contratos de balcão à prazo – e de contratos futuros de frete são negociados em bolsas específicas. Os autores ressaltam, no entanto, que, devido à menor eficiência de *hedge* e à dificuldade do mercado de lidar com a demanda por contratos de rotas específicas, os contratos futuros acabaram sendo substituídos por contratos diretos entre as partes (Kavussanos et al., 2004; Koekebakker et al., 2007).

Adland et al. (2016) propõem um modelo de formação de taxa de frete em contratos individuais que incorpora a heterogeneidade do afretador e do proprietário e os efeitos correspondentes da relação proprietário-afretador, para o mercado de VLCC e Capesize. Estimam regressões de efeito fixo e implementam uma decomposição de variância para 2863 navios VLCC e 1789 Capesize, entre 2011 e 2014. Embora as condições de mercado e as rotas permaneçam como as covariáveis mais influentes, as características dos afretadores, dos proprietários e de suas equivalências também são determinantes microeconômicos significativos do nível da taxa de frete.

O mercado de navios de apoio *offshore* – em inglês, *Offshore Support Vessels* (OSV) – é muito diferente do mercado tradicional de navegação de longas distâncias. Este tipo de embarcação suporta atividades logísticas cruciais para a exploração e produção de petróleo e gás; os mercados *spot* OSV são altamente dependentes do clima e da natureza local, gerando alta volatilidade; os navios são bastante heterogêneos em termos de especificação técnica, podendo transportar ao mesmo tempo diferentes tipos de carga (por exemplo, líquidos, químicos e carga geral). Essas características peculiares dificultam a criação de índices objetivos de preço para o mercado e tornam a análise de formação de preços para contratos individuais uma tarefa ainda mais complexa (Adland et al., 2017). As restrições impostas pela regulamentação de cabotagem de alguns países restringem essa atividade, impondo condições que se refletem em oferta, custo ou tempo de fechamento de contratos.

No seu último artigo, Adland et al. (2017) discutem a construção de índices de preço para o mercado de OSV. Neste trabalho, os autores estimam uma regressão hedônica de preços para gerar um índice a partir de dados heterogêneos do mercado de frete de OSV no Mar do Norte. Conforme os resultados obtidos pela aplicação do método em um conjunto de dados com mais de 30.000 transações, as taxas de frete *spot* aumentam com a potência e a capacidade de transporte das embarcações. O índice de volatilidade do mercado é sazonal e positivamente correlacionado com os preços do petróleo e os volumes de produção.

4.2 SOLUÇÃO DE OTIMIZAÇÃO PARA PROBLEMAS SEMELHANTES

Os métodos de otimização foram os métodos mais frequentes nos trabalhos encontrados sobre transporte marítimo e afretamento, semelhantes ao problema proposto neste trabalho. Nesta seção, são apresentados alguns destes trabalhos.

Caramia e Dell’Olmo (2008) abordam *métodos de otimização*, aplicados sobre sistemas de transporte de mercadorias, com foco específico na modelagem multi-objetivo. O propósito do livro é, conforme seus autores, fornecer aos tomadores de decisão métodos e ferramentas para implementar *modelos de otimização multi-objetivos* em logística, combinando aspectos teóricos com aplicações específicas. O livro apresenta um capítulo sobre transporte marítimo, mas não trata especificamente sobre afretamento marítimo.

Meng e Wang (2011) propõem um problema de planejamento multi-período de frota de navios para uma empresa de transporte de contêineres mais realista do que os estudos já realizados na literatura. Segundo os autores, este tipo de problema vem sendo estudado há algumas décadas, mas, devido às simplificações exigidas pelas abordagens de solução empregadas, as modelagens do problema se distanciam da realidade. O problema proposto é formulado como um *modelo de programação dinâmica com geração de cenários*, consistindo em uma série de formulações de programação linear inteira para cada período de planejamento único; e o modelo pode ser resolvido de forma eficiente por um algoritmo de caminho mais curto em uma rede acíclica. Os resultados obtidos em exemplos numéricos mostram que o afretamento de navios nem sempre é a melhor política para um horizonte de planejamento de longo prazo, embora seja muito mais barato do que comprar navios no curto prazo. A compra de navios parece ser um investimento mais rentável no longo prazo.

Özpeynirci et al. (2014) apresentam um *modelo matemático* que busca pelo plano ideal de transporte multimodal por afretamento para empresas de manufatura para um determinado horizonte de planejamento. O modelo considera as opções de transporte rodoviário e marítimo. O transporte marítimo exige o afretamento de pelo menos um navio entre os navios candidatos. Os navios fretados operam em várias rotas predefinidas durante o horizonte de planejamento. O modelo matemático é aplicado a uma empresa que entrega seus produtos aos clientes pelo modal rodoviário, e está considerando a opção de usar o transporte multimodal. A empresa planeja afretar navios anualmente e operá-los entre portos nacionais. Foram utilizados dados reais sobre os navios (capacidade, velocidade, arrumação, custos), portos (capacidades, taxas de carga / descarga, custos de manutenção) e caminhões (custos). Os autores fizeram uma análise de sensibilidade sobre vários casos e observaram que o plano proposto não muda para variações moderadas nos dados.

Bakkehaug et al. (2014) propõem uma nova formulação de *programação estocástica de vários estágios* para a renovação estratégica da frota de embarcações para empresas de

navegação. A nova formulação trata explicitamente a incerteza em parâmetros como demanda futura, taxas de frete e preços de embarcações. Testes computacionais são realizados, comparando discretizações diferentes das variáveis estocásticas e diferentes tamanhos de horizonte de planejamento. Mostra-se que resultados significativamente melhores são obtidos quando se considera as incertezas de parâmetros futuros, em comparação com o uso de valores esperados.

Com o objetivo de analisar e melhorar o plano de frete de mercadorias considerando o transporte multimodal, Tokcaer e Özpeynirci (2016) desenvolvem um *modelo matemático biobjetivo*, cujos objetivos são minimizar o custo total e o número de operações de manuseio (um indicador de dificuldade operacional). O modelo decide sobre o plano de transporte multimodal ideal, incluindo o frete de navio e decisões sobre a forma de transporte. Para obter uma visão sobre os trade-offs na mudança do mix de transporte, foi gerada a Fronteira de Pareto. O modelo foi testado em uma instância de um problema real de uma petroquímica turca produtora de etileno.

Pantuso et al. (2016) abordaram o problema da renovação da frota e, particularmente, o tratamento da incerteza no caso marítimo. Sua principal contribuição é avaliar se a utilização da *otimização estocástica* traz, de fato, resultados melhores que modelos determinísticos. A avaliação foi realizada sobre o caso da Wallenius Wilhelmsen Logistics, uma das maiores empresas de navegação do mundo.

Wang et al. (2018) também apresentam um problema de afretamento que envolve a composição e a implantação de frota marítima, considerando as incertezas do mercado. Os autores propõem um *modelo de programação estocástica de dois estágios* e apresentam um estudo computacional baseado no caso de Odfjell, uma empresa de transporte de produtos químicos líder em Bergen, na Noruega. Os autores procuram mostrar como os planos de afretamento produzidos podem mudar em função das diferentes opções de modelagem; e também por que e como diferentes planos de afretamento afetam o desempenho da empresa como um todo.

Siddiqui e Verma (2017) tratam do planejamento tático de uma frota de petroleiros. Este artigo apresenta um problema parecido com o problema proposto. Produtores de petróleo geralmente atendem à demanda intercontinental através de uma frota de petroleiros oceânicos, que não só possuem custos fixos e operacionais muito altos, mas também apresentam riscos

financeiros consideráveis devido à volatilidade da demanda de petróleo e dos mercados de frete local. Assim, a maioria dos fornecedores de petróleo mantém uma frota de baixa capacidade e gerencia requisitos adicionais ao ajustar periodicamente uma combinação de vários contratos de afretamento e / ou suas opções de compra. Para o problema de ajuste periódico da frota, o artigo propõe uma metodologia baseada no valor condicional do risco para proteção contra perdas extremas. Mais especificamente, desenvolve um *modelo de programação não-linear inteira mista*, onde os parâmetros são estimados através de *simulação de Monte-Carlo*, para minimizar os custos de afretamento e os riscos financeiros associados. A metodologia proposta foi aplicada a várias instâncias do problema (geradas usando a rede de transporte marítimo de um importante produtor de petróleo). Observou-se, ainda, que: o uso total da combinação de contratos de afretamento e suas opções de compra reduzem significativamente os riscos de mercado (risco financeiro devido à volatilidade do mercado *spot* de frete), enquanto, por outro lado, aumentam substancialmente os riscos específicos da empresa (risco financeiro devido às incertezas das demandas de petróleo e de navios petroleiros).

4.3 OUTRAS ABORDAGENS DE SOLUÇÃO PARA PROBLEMAS SEMELHANTES

Esta seção apresenta outras abordagens de solução encontradas em problemas de transporte e afretamento, que podem ser aplicadas diretamente ao problema proposto.

Maisiuk e Gribkovskaia (2014) abordam um problema de planejamento de embarcações de suprimento às instalações *offshore* de petróleo e gás por meio da *simulação por eventos discretos*. A execução das programações semanais de suprimento às instalações *offshore* durante o ano é afetada pelas condições climáticas, que influenciam o tempo de navegação e a duração dos serviços às instalações. Quando o navio contratado não pode completar uma viagem antes do início da próxima viagem planejada, um navio do mercado *spot* precisa ser contratado para executá-lo. O problema consiste em avaliar configurações alternativas de tamanho de frota, levando-se em conta as incertezas nas condições climáticas e nas taxas futuras do mercado *spot* das embarcações de apoio.

Caramia e Dell’Olmo (2008) citam o uso de abordagens multiagentes na modelagem de problemas logísticos. Segundo os autores, há diversas experiências documentadas sobre a implementação de *sistemas multiagentes* para solucionar problemas logísticos de transporte, tais como Bergkvist et al. (2005), Buchheit et al., (1992) e Bürckert et al. (2000). No entanto, como apontado também por Davidsson et al. (2005), a maioria dessas experiências se refere à

experimentação em pequena escala, conduzida sem usar dados de problemas provenientes do mundo real.

Di Febraro et al. (2016) propõem estrutura de modelos para a cooperação em cadeias de frete de mercadorias intermodais como *sistemas multiagentes*. Neste contexto, o problema da otimização do transporte de mercadorias é decomposto em um conjunto adequado de subproblemas, cada qual representando as operações de um ator que se conecta usando um esquema de negociação. Um *modelo a eventos discretos* é desenvolvido para simular o sistema em uma base de horizonte contínuo para explicar a dinâmica das operações de frete de mercadorias intermodais. Esta estrutura permite um planejamento de cadeias de transporte intermodais orientado por eventos de curto/médio prazo. A metodologia é avaliada utilizando um estudo de caso realista, e os resultados são comparados com a estratégia *First-Come-First-Served*, destacando o significado da cooperação em sistemas que operam perto da capacidade.

Sardis et al. (2009) propõem um sistema de frete eletrônico (*e-chartering*) semiautomático em mercados marítimos. Utilizando um *sistema multiagente* distribuído para o Mercado de Afretamento Virtual pela Internet (*Internet Virtual Chartering Markets - MAVCM*) em cada porto marítimo e informações de satélite dos navios que participam, oferecem um mecanismo para o controle semi-automático e criação de serviços de afretamento e contratos. O sistema proposto baseia-se nos contratos marítimos entre armadores e afretadores através da infraestrutura MAVCM, serviços e monitoramento por satélite dos navios.

Parthibaraj et al. (2018) se propõem a desenvolver um modelo de decisão sustentável para alocação da capacidade do navio para satisfazer a demanda de frete e gerar um plano de rotas. O trabalho utiliza modelagem de *sistemas multiagentes* e um mecanismo de leilão combinatório iterativo com pagamentos Vickrey-Clarke-Groves ⁶ para inserir navios a preços economicamente efetivos na era dos sistemas de troca de informações. Para abordar a complexidade computacional do modelo de sistema multiagente com mecanismo de leilão, o artigo propõe um algoritmo de pesquisa enumerativa.

⁶ Leilão Vickrey-Clarke-Groves é um tipo de leilão de itens fechados, onde os participantes enviam lances para os itens sem conhecer os lances dos outros.

4.4 ABORDAGENS DE SOLUÇÃO CORRELATAS

Os artigos desta seção apresentam abordagens de solução aplicadas a outros tipos de problemas que, no entanto, têm alguma correlação com o problema proposto, ou seja, que podem ser aplicados a partes similares do problema.

Chou et al. (2010) formularam um modelo combinado de tomada de *decisão multicritério fuzzy* e otimização para resolver o problema de divisão de demanda de transporte de contêineres. Existem dois estágios neste modelo combinado: na primeira fase, é calculada a taxa de divisão da demanda de transporte de contêiner usando o método MCDM (método de decisão multicritério fuzzy); enquanto que na segunda fase, um modelo de rede de programação matemática é proposto para determinar a origem/destino (O-D) para importação/exportação de contêineres. A utilização do modelo proposto é demonstrada em um estudo de caso de portos taiwaneses.

Gomes et al. (2014) abordam o problema de suporte à decisão para a seleção de uma aeronave, enfrentado por uma companhia aérea que está investindo em fretamento de voos regionais no Brasil. O problema tem oito alternativas a serem avaliadas sob 11 critérios diferentes, cujas medidas podem ser exatas, estocásticas ou difusas. A técnica escolhida para analisar e, em seguida, encontrar uma solução para o problema é o *método multicritério de suporte à decisão*, chamado, em inglês, NAIADE (*Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environments*). O método utilizado permite abordar os problemas trabalhando com critérios quantitativos e qualitativos sob incerteza e imprecisão. Outra vantagem considerável da NAIADE em relação a outros métodos multicritérios está nas suas características de não exigir uma definição prévia dos pesos pelo tomador de decisão.

Também sobre transporte aéreo, Ozdemir e Basligil (2016) estudam a compra de aeronaves em uma companhia aérea turca usando números difusos (*fuzzy numbers*). Técnicas de *decisão multicritérios*, métodos integrais Fuzzy ANP e Choquet são usados para a avaliação e os resultados de ambos os algoritmos são comparados utilizando-se Fuzzy AHP. A principal contribuição do trabalho, segundo os autores, é determinar a interdependência entre os principais critérios e subcritérios, a relação não linear entre eles e as incertezas ambientais.

Gomez_Padilla et al. (2009) analisam o impacto de um *contrato de opção* para duas empresas de uma cadeia de suprimentos: um varejista e um fornecedor. Com um contrato de

opção, o varejista pede uma quantidade de unidades e tem o direito de modificar seu pedido, caso necessário. O trabalho apresenta um modelo para calcular o desempenho de um contrato de opção em termos de valor do contrato para as duas empresas envolvidas. São analisados dois casos: múltiplos fornecedores e um varejista; e um fornecedor e um varejista. A melhoria de desempenho obtida utilizando este tipo de contrato é comparada por simulação.

Utilizando o modelo de estágio de Stackelberg, que é estabelecido com base no pressuposto de que os expedidores de frete são avessos ao risco, Lei e Zhou (2010) analisam o preço ótimo do fornecimento de frete aéreo, a quantidade ideal de *pedidos de opção* e a quantidade de *opções compradas* do intermediário. A análise mostra que a indústria de carga aérea avessa ao risco, aplicando contratos de opção, pode efetivamente evitar os riscos do aumento de custos e da subida do preço *spot*; além de aumentar a receita de todo o sistema e ainda alcançar o ótimo de Pareto da sociedade.

Hellermann et al. (2013) propõem a utilização de *contratos de opções* para melhorar a lucratividade das companhias aéreas de carga, que se depara com elevados custos dos ativos e incertezas substanciais na demanda. O modelo proposto procura capturar as principais características do comércio de carga entre uma companhia aérea e um expedidor de frete e, então, obter uma política de reservas de transporte ideal. O modelo também analisa o impacto do *overbooking* sobre lucro do fornecedor do transporte aéreo. Por meio da aplicação do modelo aos dados reais de uma grande empresa transportadora de carga, os autores comparam os arranjos contratuais ora utilizados pela empresa com aqueles fornecidos de forma ideal pelo modelo; e analisam, por meio de um estudo numérico, o impacto do *overbooking* sobre os parâmetros de contrato e sobre a rentabilidade da empresa.

O artigo de Hu et al. (2014) considera uma cadeia de suprimento descentralizada, com um varejista e um fabricante, onde o rendimento da produção do fabricante e a demanda do varejista são ambos estocásticos. No início do período de vendas, o varejista faz um pedido e compra um *contrato de opção* com o fabricante. Após o período de vendas, o excesso de demanda é parcialmente encomendado e o varejista exerce seu pedido de opção e, em seguida, coloca uma ordem instantânea para as encomendas. A política de pedidos ideal para o varejista e a decisão de produção correspondente para o fabricante são estudadas. Exemplos numéricos são realizados para mostrar o impacto dos parâmetros do modelo nas políticas ótimas.

A pesquisa realizada por Nosoohi e Nookabadi (2016) considera uma cadeia de suprimentos consistindo de um fornecedor e um fabricante que produz um tipo de produto (por exemplo, produtos inovadores) com um longo lead-time de suprimento, um curto período de venda e uma demanda estocástica. A produção completa do produto acabado requer duas operações de processamento: operação inicial e operação final. O fabricante executa a operação inicial com um custo determinístico. A operação final pode ser realizada pelo fabricante ou atribuída a uma empresa externa através de um processo de leilão. No momento do contrato de suprimento, o custo final de processamento (FPC) é estimado como uma variável estocástica. A incerteza sobre o FPC é removida antes do início do período de venda. O estudo realizado é uma tentativa de determinar como o fabricante deve colocar as ordens de suprimento dentro do quadro de preço de atacado, colocação, chamada e opções bidirecionais. Os *contratos de opção* oferecem ao fabricante a flexibilidade para ajustar suas ordens iniciais ao exercer as opções compradas após a realização do FPC. Foram obtidos pedidos otimizados com cada contrato de opção, além das equações nas quais as ordens iniciais e de opções ótimas são válidas. De acordo com a análise dos autores, se o FPC realizado for maior (menor) do que um nível específico, o fabricante deve diminuir (aumentar) suas ordens iniciais. Esses níveis específicos foram obtidos para todos os tipos de contratos de opção. A análise numérica e as percepções gerenciais esclarecem o valor dos contratos de opção considerando diferentes configurações de parâmetros.

4.5 SÍNTESE E DISCUSSÃO

Nesta seção, é apresentada uma síntese dos resultados encontrados na revisão da literatura. Para isso, procurou-se relacionar as referências analisadas ao longo do capítulo com os aspectos mais relevantes para o problema e para a busca da solução do problema. A escolha desses aspectos se baseia na definição e caracterização do problema e sua envoltória apresentados no primeiro capítulo. A Tabela 1 contém a descrição de cada um e as publicações relacionadas. Além dos aspectos mais relevantes, as publicações também foram relacionadas às diversas abordagens e técnicas de solução encontradas (vide Tabela 2).

Tabela 1: Aspectos relevantes versus publicações

Aspectos a serem considerados	Descrição	Autores
Problemas de afretamento	Problemas diretamente relacionados ao tema afretamento (marítimo ou não).	Sardis et al. (2009); Lei and Zhou (2010); Meng and Wang (2011); Ozer and Cetin (2012); Nomikos et al.

Aspectos a serem considerados	Descrição	Autores
		(2013); Hellermann et al. (2013); Kavussanos et al. (2014); Özpeynirci et al. (2014); Bakkehaug et al. (2014); Gomes et al. (2014); Adland et al. (2016); Adland et al. (2017); Siddiqui and Verma (2017); Parthibaraj et al. (2018) [13 PUBLICAÇÕES]
Transporte marítimo: embarcações de apoio <i>offshore</i>	Mercado de transporte marítimo de apoio às unidades marítimas de E&P (OSV). O afretamento de embarcações deste tipo é o foco deste trabalho.	Lopes (2011); Aguiar (2013); Ares (2013); Maisiuk and Gribkovskaia (2014); Arpini (2015); ABEAM (2017); Adland et al. (2017) [7 PUBLICAÇÕES]
Transporte marítimo: embarcações de longo curso	Mercado de transporte marítimo de longo curso, relacionado principalmente a commodities como petróleo, gás natural e derivados. A maioria das publicações encontradas sobre afretamento marítimo diz respeito à navegação de longo curso.	Sardis et al. (2009); Meng and Wang (2011); Dinwoodie et al. (2013); Álvarez-Sanjaime et al. (2013a); Álvarez-Sanjaime et al. (2013b); Nomikos et al. (2013); Kavussanos et al. (2014); Özpeynirci et al. (2014); Bakkehaug et al. (2014); Pantuso et al. (2014); Adland et al. (2016); Pantuso et al. (2016); Wang et al. (2018); Siddiqui and Verma (2017); Parthibaraj et al. (2018) [15 PUBLICAÇÕES]
Mercado local de afretamento	Muitos países apresentam restrições impactantes para a navegação de cabotagem (onde se incluem as OSV's) e, conseqüentemente, para o seu mercado de afretamento.	Lopes (2011); Ozer and Cetin (2012); Aguiar (2013); Kavussanos et al. (2014); Arpini (2015); Tokcaer e Özpeynirci (2016); ABEAM (2017) [7 PUBLICAÇÕES]
Confiabilidade dos fornecedores	A confiabilidade dos fornecedores de transporte marítimo (reputação e capacidade) é um aspecto relevante para os afretadores.	Ozer and Cetin (2012); Arpini (2015); Parthibaraj et al. (2018) [3 PUBLICAÇÕES]
Incertezas dos preços	Volatilidade dos preços das diferentes modalidades de afretamento.	Lei and Zhou (2010); Nomikos et al. (2013); Pantuso et al. (2014); Kavussanos et al. (2014); Bakkehaug et al. (2014); Maisiuk and Gribkovskaia (2014); Di Febbraro et al. (2016); Adland et al. (2016); Adland et al. (2017); Wang et al. (2018); Siddiqui and Verma (2017) [11 PUBLICAÇÕES]
Incerteza da demanda	Incertezas relacionadas à demanda por transporte marítimo: variabilidades da demanda por UM's e do consumo de cada UM, e fatores climáticos.	Fagerholt et al. (2010); Hellermann et al. (2013); Hu et al. (2014); Pantuso et al. (2014); Bakkehaug et al. (2014); Nosoghi and Nookabadi (2016); Wang et al. (2018); Siddiqui and Verma (2017) [8 PUBLICAÇÕES]
Predição dos preços de afretamento	Determinação dos índices de preços de afretamento em suas diversas modalidades.	Nomikos et al. (2013); Kavussanos et al. (2014); Adland et al. (2016); Adland et al. (2017) [4 PUBLICAÇÕES]

Aspectos a serem considerados	Descrição	Autores
Risco do não atendimento da demanda	Quantificação do risco e dos impactos do não atendimento da demanda.	Siddiqui and Verma (2017)
Riscos financeiros associados	Valores financeiros esperados dos riscos de mercado (taxas de frete) e da empresa (não atendimento da demanda e subutilização da frota).	Gomez_Padilla et al. (2009); Lei and Zhou (2010); Hellermann et al. (2013); Siddiqui and Verma (2017) [4 PUBLICAÇÕES]
Minimização dos custos associados	A composição dos contratos de afretamento para o atendimento das necessidades de transporte marítimo da empresa deve ser feita ao menor custo possível.	Gomez_Padilla et al. (2009); Nosoohi and Nookabadi (2016); Pantuso et al. (2014); Bakkehaug et al. (2014); Wang et al. (2018); Siddiqui and Verma (2017) [6 PUBLICAÇÕES]
Minimização dos riscos	A minimização dos riscos citados anteriormente também é um dos objetivos buscados pelas empresas.	Gomez_Padilla et al. (2009); Lei and Zhou (2010); Hellermann et al. (2013); Hu et al. (2014); Nosoohi and Nookabadi (2016); Siddiqui and Verma (2017) [6 PUBLICAÇÕES]
Otimização do mix de contratos de afretamento	Determinação do mix adequado dos contratos de afretamento, quanto aos tipos, às quantidades e aos tempos de contrato.	Wang et al. (2018); Siddiqui and Verma (2017) [2 PUBLICAÇÕES]
Problemas de mix	O problema de determinação da composição mais adequada de contratos de afretamento pode ser entendido como um problema clássico de mix, onde se busca a melhor combinação de recursos diversos.	Fagerholt et al. (2010); Meng and Wang (2011); Pantuso et al. (2014); Özpeynirci et al. (2014); Bakkehaug et al. (2014); Maisiuk and Gribkovskaia (2014); Tokcaer e Özpeynirci (2016); Pantuso et al. (2016); Di Febbraro et al. (2016); Wang et al. (2018); Siddiqui and Verma (2017); Parthibaraj et al. (2018) [12 PUBLICAÇÕES]
Otimização sob incertezas	A consideração das incertezas mencionadas anteriormente fazem com que o problema apresentado possa ser tratado como um problema de otimização sob incertezas, para o qual a literatura apresenta algumas técnicas de solução.	Caramia and Dell'Olmo (2008); Fagerholt et al. (2010); Bakkehaug et al. (2014); Pantuso et al. (2014); Pantuso et al. (2016); Di Febbraro et al. (2016); Wang et al. (2018); Siddiqui and Verma (2017) [8 PUBLICAÇÕES]
Análise multiobjetivo / multicritério	O problema pode ser formulado como um problema multiobjetivo (ex.: minimização de custos e dos riscos) ou como de análise multicritério (priorização de modalidades alternativas de afretamento).	Caramia and Dell'Olmo (2008); Chou et al. (2010); Gomes et al. (2014); Tokcaer and Özpeynirci (2016); Ozdemir and Basligil (2016) [5 PUBLICAÇÕES]

Tabela 2: Abordagens de solução versus publicações

Abordagem	Descrição	Autores
Análise qualitativa	Análise do problema quanto aos conceitos, percepções e aspectos teóricos e subjetivos relacionados.	Lopes (2011); Ozer and Cetin (2012); Álvarez-Sanjaime et al. (2013a); Álvarez-Sanjaime et al. (2013b); Aguiar (2013); Ares (2013); Dinwoodie et al. (2013); Pantuso et

Abordagem	Descrição	Autores
		al. (2014); Arpini (2015); ABEAM (2017) [9 PUBLICAÇÕES]
Modelagem de preços	Técnicas estatísticas e matemáticas para predição e construção de índices de preços.	Nomikos et al. (2013); Kavussanos et al. (2014); Adland et al. (2016); Adland et al. (2017) [4 PUBLICAÇÕES]
Métodos heurísticos	Algoritmos que fornecem soluções sem um limite formal de qualidade, geralmente avaliado empiricamente em termos de complexidade e qualidade das soluções. Muitas vezes são utilizados em conjunto com outros métodos de otimização para melhorar a busca de soluções.	Caramia and Dell’Olmo (2008); Fagerholt et al. (2010); Bakkehaug et al. (2014); Wang et al. (2018); Parthibaraj et al. (2018) [5 PUBLICAÇÕES]
Programação não-linear inteira mista	Programação (otimização) matemática onde o problema apresenta relações não lineares entre variáveis, e parte das variáveis pertence ao conjunto dos números inteiros.	Siddiqui and Verma (2017)
Otimização multiobjetivo	Técnicas de otimização para problemas com mais de uma função objetivo.	Caramia and Dell’Olmo (2008); Chou et al. (2010); Özpeynirci et al. (2014); Tokcaer and Özpeynirci (2016) [4 PUBLICAÇÕES]
Programação dinâmica com geração de cenários	A programação dinâmica procura resolver o problema de otimização através da análise de uma sequência de problemas mais simples do que o problema original. Esta técnica pode ser combinada com a geração de cenários para a solução de problemas sob incertezas (estocásticos).	Fagerholt et al. (2010); Meng and Wang (2011) [2 PUBLICAÇÕES]
Programação estocástica (de dois ou de vários estágios)	A programação estocástica busca uma solução que seja balanceada para todas as possíveis realizações das incertezas. A cada realização de incerteza, tem-se mais informação disponível, o que é conhecido como estágio.	Bakkehaug et al. (2014); Pantuso et al. (2016); Wang et al. (2018) [3 PUBLICAÇÕES]
Simulação de Monte-Carlo	Método de simulação estatística que permite simular um processo que dependa de variáveis aleatórias, e gera experimentos de amostragem.	Fagerholt et al. (2010); Siddiqui and Verma (2017) [2 PUBLICAÇÕES]
Sistemas multiagentes	Aborda o problema (ou parte dele) como um sistema composto por agentes, que interagem entre si e com o ambiente e são capazes de ações autônomas para atender determinados objetivos (Wooldridge & Michael, 2002).	Caramia and Dell’Olmo (2008); Sardis et al. (2009); Di Febbraro et al. (2016); Parthibaraj et al. (2018) [4 PUBLICAÇÕES]
Simulação por eventos discretos	Método para simular o funcionamento de um determinado sistema real por meio de eventos discretos que acontecem ao longo do tempo. Também conhecida como simulação estocástica, permite a utilização de variáveis estocásticas para	Maisiuk and Gribkovskaia (2014); Di Febbraro et al. (2016) [2 PUBLICAÇÕES]

Abordagem	Descrição	Autores
	representar as incertezas inerentes ao sistema modelado.	
Análise de risco	Medidas de risco como, por exemplo, <i>value-at-risk</i> (VaR) e <i>conditional value-at-risk</i> (CVaR), podem ser utilizadas para representar a política de aversão ao risco da empresa.	Siddiqui and Verma (2017)
Análise de decisão multicritério	Métodos de análise hierárquica para problemas que envolvem a escolha de alternativas, que permitem a utilização de dados quantitativos e qualitativos mensuráveis, tangíveis ou não, para análise de critérios de decisão.	Chou et al. (2010); Gomes et al. (2014); Ozdemir and Basligil (2016) [3 PUBLICAÇÕES]
Contratos de suprimento com opções	Também chamados de contratos flexíveis de suprimento, trazem flexibilidade para a gestão de produtos e serviços contratados. A utilização de opções reduz o risco de subutilização de capacidade e de realização de custos elevados devido à volatilidade de preços.	Gomez_Padilla et al. (2009); Lei and Zhou (2010); Hellermann et al. (2013); Hu et al. (2014); Nosoohi and Nookabadi (2016); Siddiqui and Verma (2017) [6 PUBLICAÇÕES]
Solução multiabordagem	Métodos que combinam mais de uma abordagem visando a melhor solução para o problema. (Métodos heurísticos combinados a outros métodos não são considerados aqui)	Fagerholt et al. (2010); Di Febbraro et al. (2016); Siddiqui and Verma (2017) [3 PUBLICAÇÕES]

O Quadro 6 é resultado do cruzamento das Tabelas 1 e 2, apresentando o número de publicações para cada par aspecto/abordagem. Uma mesma publicação pode abranger mais de um aspecto e também apresentar mais de uma abordagem de solução. Foram relacionadas 36 publicações distintas (as publicações anteriores a 2008, referenciadas por outros autores, não entraram nas tabelas). A seguir, se propõe uma análise e uma discussão sobre o que a literatura oferece a respeito do problema e sua envoltória.

Quadro 6: Número de publicações por aspecto desejado (linha) e abordagem de solução (coluna)

	Análise qualitativa	Modelagem de preços	Métodos heurísticos	Programação não-linear inteira mista	Otimização multiobjetivo	Programação dinâmica com geração de cenários	Programação estocástica (de dois ou mais estágios)	Simulação de Monte-Carlo	Sistemas multiagentes	Simulação por eventos discretos	Análise de risco	Análise de decisão multicritério	Contratos de suprimento com opções	Solução multiabordagem
Problemas de afretamento	1	4	1	1	1	1	1	1	2		1	1	2	1
Navegação de apoio <i>offshore</i>	4	1								1				
Navegação de longo curso	4	3	3	1	1	1	3	1	2		1		1	1
Mercado local de afretamento	5	1			1									
Confiabilidade dos fornecedores	2		1						1					
Incertezas dos preços	1	4	2	1			2	1	1	2	1		2	2
Incerteza da demanda	1		3	1			2	1			1		3	2
Predição dos preços de afretamento		4												
Risco do não atendimento da demanda				1				1			1			1
Riscos financeiros associados				1				1			1		4	1
Minimização dos custos associados	1		2	1			2				1		2	1
Minimização dos riscos				1							1		6	1
Otimização do mix de contratos de afretamento			1	1			1				1			1
Problemas de mix	1		3	1	2	1	3		2	1	1	1		3
Otimização sob incertezas	1		3	1	1		3		2		1			3
Análise multiobjetivo / multicritério			1		3				1			3		

Nas publicações referentes a transporte marítimo, nota-se interesse em temas como: dimensionamento da frota, roteamento de navios e transporte multimodal. A decisão sobre a composição de tipos de contrato de afretamento, quando abordada, é tratada de forma secundária; exceção feita ao artigo de Siddiqui e Verma (2017).

O transporte marítimo de longo curso é o tipo de transporte da maioria das publicações encontradas sobre afretamento marítimo. O transporte marítimo de apoio *offshore*, que é objeto do problema proposto, é abordado apenas por Maisiuk e Gribkovskaia (2014), que analisam o impacto das incertezas (condições climáticas e das taxas de frete) nos tempos de viagem e no planejamento das embarcações de apoio *offshore* (OSV); e Adland et al. (2017), que apresentam uma discussão sobre a construção de índices de preço para o mercado de OSV.

A maior parte dos trabalhos sobre afretamento marítimo envolve estudos sobre comportamento e previsão de preços de afretamento (Adland et al., 2016, 2017; Kavussanos et al., 2014; Nomikos et al., 2013). Apenas um trabalho aborda o problema de otimização da composição de contratos de afretamento: o artigo de Siddiqui e Verma (2017).

De fato, o problema tratado por Siddiqui e Verma (2017) aborda diversos aspectos do problema proposto neste trabalho: é um problema de otimização de mix de contratos de afretamento, que considera as incertezas relacionadas à demanda e aos preços de afretamento e que procura minimizar os custos de afretamento e os riscos financeiros associados. Entretanto, algumas diferenças importantes para a modelagem e para a escolha da abordagem de solução devem observadas:

- (1) O artigo trata de uma frota de navios petroleiros, cujo mercado (relação entre oferta e demanda) de navios é bastante diferente do mercado de navios de apoio *offshore*;
- (2) No artigo, a demanda a ser atendida pela frota de navios corresponde basicamente à demanda de petróleo, uma commodity de comportamento bem definido; no problema proposto, corresponde à quantidade de unidades marítimas de produção e exploração de petróleo demandadas por um determinado plano de exploração e produção de petróleo (decisão estratégica) e aos insumos consumidos por cada unidade marítima (as demandas das unidades de exploração possuem alta variabilidade);
- (3) O problema do artigo considera uma frota própria de navios para atender à demanda regular, recorrendo ao mercado de afretamento ou opções somente em caso de necessidade; no problema objeto deste trabalho, a frota é toda afretada, com uma

determinada taxa de renovação anual, desejando-se otimizar o mix de contratos de afretamento na renovação da frota ao longo do tempo; e

- (4) O horizonte de tempo de análise do artigo é de um ano; neste trabalho, o problema demanda planos de afretamento de médio e longo prazos, com horizontes de análise superiores a um ano.

No que diz respeito às abordagens de solução, Siddiqui e Verma (2017) desenvolveram um *modelo de programação não-linear inteira mista com valor de risco condicional* para minimizar os custos de afretamento e os riscos financeiros associados, e utilizaram *simulação de Monte-Carlo* para gerar os parâmetros estocásticos relacionados aos preços e demanda de petróleo e às taxas *spot* de afretamento. Também empregaram *contratos de opção* para mitigar os riscos devidos às incertezas da demanda e dos preços de afretamento.

Ainda sobre afretamento, foram analisados dois trabalhos sobre a utilização de *contratos de suprimento com opções* em fornecimento de frete aéreo (Hellermann et al., 2013; Lei & Zhou, 2010); dois trabalhos que utilizam *sistemas multiagentes* para *e-chartering* (Sardis et al., 2009) e para alocação de capacidade e planejamento de rotas (Parthibaraj et al., 2018); um trabalho de análise qualitativa sobre critérios de escolha de tipos de afretamento (Ozer & Cetin, 2012); um trabalho sobre *decisão multicritério* para seleção de aeronaves de fretamento (Gomes et al., 2014) e outro sobre planejamento multiperíodo e roteamento de navios (Meng & Wang, 2011).

Nos trabalhos sobre comportamento e predição de preços de afretamento, a maioria das análises encontradas na literatura considera o mercado mundial de afretamento. Exigências específicas encontradas em mercados locais que podem afetar o comportamento dos preços – como, por exemplo, a prioridade para embarcações de bandeira nacional exigida no mercado brasileiro de navegação de cabotagem – não são abordadas.

A confiabilidade e as condições de operação do navio foram aspectos importantes apontados por Ozer and Cetin (2012) na escolha dos fornecedores de transporte marítimo. Como esses, outros fatores qualitativos apontados pelo tomador do transporte devem ser considerados no método de busca do conjunto adequado de contratos de afretamento.

As técnicas de otimização foram as abordagens de solução mais utilizadas nos problemas de transporte marítimo onde foram observados os aspectos apontados na Tabela 1.

Foram identificadas algumas técnicas com grande potencial de serem utilizadas no problema proposto, como as que consideram as incertezas no próprio método: *programação dinâmica com geração de cenários* (Meng & Wang, 2011), *programação estocástica de vários estágios* (Bakkehaug et al., 2014) e *programação estocástica de dois estágios* (Wang et al., 2018); a que trata as incertezas pela combinação com outro método: *programação não-linear inteira mista, simulação de Monte-Carlo e análise condicional de risco* (Siddiqui & Verma, 2017); e as que consideram mais de um objetivo na modelagem matemática do problema: *otimização multiobjetivo* (Caramia & Dell’Olmo, 2008; Özpeynirci et al., 2014; Pantuso et al., 2016; Tokcaer & Özpeynirci, 2016).

Outras abordagens foram também encontradas neste tipo de problema: *simulação por eventos discretos* (Maisiuk & Gribkovskaia, 2014), que, no processo de modelagem, considera as incertezas do problema através de eventos e variáveis estocásticas determinadas por funções de probabilidade; e *sistemas multiagentes* (Caramia & Dell’Olmo, 2008; Di Febbraro et al., 2016; Parthibaraj et al., 2018; Sardis et al., 2009), onde o paradigma de agentes é utilizado no processo de controle da oferta e da demanda por afretamento.

Fora do tema afretamento marítimo, buscou-se por trabalhos sobre abordagens para tratar problemas semelhantes ao proposto. Nas publicações sobre *análise decisão multicritério* (Chou et al., 2010; Gomes et al., 2014; Ozdemir & Basligil, 2016), foram encontrados trabalhos que combinam decisão multicritério com otimização, e um método que permite a utilização de critérios quantitativos e qualitativos de decisão. Os trabalhos sobre *flexible supply options*, ou contratos de suprimento com opções (Gomez_Padilla et al., 2009; Hellermann et al., 2013; Hu et al., 2014; Lei & Zhou, 2010; Nosoohi & Nookabadi, 2016), mostram que a utilização de contratos de opção pode minimizar os riscos relacionados à incerteza da demanda e dos preços de afretamento.

5 OTIMIZAÇÃO SOB INCERTEZAS

Este capítulo tem por objetivo fornecer subsídios para o entendimento de modelagem e solução de problemas de otimização sob incertezas. Serão abordados, de maneira sucinta, conceitos e técnicas de modelagem e resolução de problemas de otimização como um todo e, mais especificamente, de otimização sob incertezas.

O capítulo está organizado em quatro partes. A primeira parte aborda a resolução dos problemas de otimização, passando pela classificação dos modelos quanto à complexidade dos algoritmos e descrevendo sucintamente algumas técnicas de solução: técnicas de busca por aproximação (heurísticas e metaheurísticas) e técnicas exatas (programação matemática). Na segunda parte, são destacadas algumas técnicas utilizadas para a resolução de problemas de programação linear inteira. A terceira parte trata da modelagem matemática de problemas: modelos determinísticos, que não consideram incertezas; e modelos estocásticos, que consideram as incertezas inerentes aos problemas. E, por fim, são apresentadas as medidas do valor da informação e do valor da solução estocástica.

5.1 RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO

Diferentes técnicas de resolução de problemas de otimização podem ser utilizadas, em função da classe de complexidade inerente ao algoritmo, do tempo que se dispõe para a execução e da importância do grau de exatidão da resposta.

5.1.1 Complexidade dos modelos

Um modelo matemático pode ser classificado de acordo com a complexidade de seus algoritmos de solução (Papadimitriou & Steiglitz, 1998; Schrijver, 1999):

- a) Classe P: são problemas que possuem funções que conseguem ser resolvidos em tempo polinomial;
- b) Classe NP: são problemas em que não se garante a solução em tempo polinomial, independentemente dos dados de entrada (número e relações entre as variáveis);
- c) Classe NP-Completo: é um subconjunto dos problemas NP, composto pelos problemas mais difíceis desta classe, para os quais todos os outros problemas em NP podem ser

transformados em tempo polinomial. É provado matematicamente, que se houver um algoritmo que garanta solução em tempo polinomial para um problema NP-Completo, garante-se para todos os NP.

- d) NP-difícil: são problemas da classe NP-completo ou problemas de otimização que utilizam um problema NP-completo como uma subrotina.

5.1.2 Heurísticas e metaheurísticas

Heurísticas e metaheurísticas são técnicas de solução por aproximação, onde não se tem garantia de obtenção da solução ótima. Estas técnicas, geralmente, são utilizadas em problemas complexos, cujas soluções são difíceis de serem obtidas por métodos exatos.

Um método heurístico é um procedimento que provavelmente vai encontrar uma boa solução viável, mas não necessariamente uma solução ótima para um problema específico. Se bem-elaborado, geralmente é capaz de fornecer uma solução que se encontra pelo menos próxima da ótima, ou concluir que tais soluções na realidade não existem. O procedimento normalmente é um algoritmo iterativo, baseado em ideias simples, para a busca de uma nova solução que pode ou não ser melhor que a anteriormente encontrada (Hillier & Lieberman, 2010).

Uma metaheurística é um método de resolução geral que fornece estrutura e diretrizes gerais para desenvolver um método heurístico específico que se ajuste a um tipo de problema particular. Dentre as metaheurísticas existentes, destacam-se: algoritmo genético, busca tabu, *simulated annealing*, *scatter search*, VNS (*Variable Neighborhood Search*), GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) e colônia de formigas. A maioria dessas técnicas, como observa-se pelos nomes, é inspirada em fenômenos naturais e adota estratégias diferentes para a exploração do espaço de busca (Arenales et al., 2011; Hillier & Lieberman, 2010).

5.1.3 Programação matemática

A programação matemática trata de problemas de decisão, fazendo uso de modelos matemáticos que procuram representar o problema real. Variáveis (grandezas desconhecidas) são definidas e relações matemáticas entre elas são estabelecidas de forma a descrever o comportamento do sistema que está sendo estudado. Assim, a programação matemática

compreende um conjunto de técnicas que buscam a resolução exata dos modelos através de métodos algébricos, podendo ser, de acordo com as características das equações, inequações e variáveis, um problema de Programação Linear (PL), Programação Linear Inteira (PLI), Programação Linear Inteira Mista (PLIM), Programação Não-Linear (PNL), Programação Não-Linear Inteira (PNLI) ou Programação Não-Linear Inteira Mista (PNLIM). (Arenales et al., 2011; Ribas, 2012).

Na próxima seção, são destacadas algumas técnicas de resolução de problemas de PLI, já que este tipo de problema caracteriza o problema objeto deste trabalho de tese. Os modelos matemáticos são explicados na seção seguinte.

5.2 RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA

Um grande número de problemas reais pode ser modelado e resolvido por PL. O método SIMPLEX garante a resolução da maioria dos problemas desta classe a um baixo custo computacional. Tratando-se especificamente de problemas inteiros, ou seja, problemas de PL com a exigência de valores inteiros para as variáveis de decisão, os métodos de solução envolvem a resolução de uma série de problemas de PL (Hillier & Lieberman, 2010).

O método SIMPLEX é um algoritmo bastante eficiente uma vez que busca pela solução ótima pesquisando apenas um subconjunto (em geral, pequeno) dos vértices da região factível do problema (Arenales et al., 2011).

Apesar de parecerem fáceis de serem resolvidos, pois a única diferença para os problemas de PL é que os problemas de PLI apresentam um número menor de soluções a serem verificadas, o número de combinações dos valores inteiros assumidos pelas variáveis de decisão pode ser considerável. Os problemas de PLI têm a garantia de possuírem apenas um número finito de soluções viáveis (Hillier & Lieberman, 2010).

A maioria dos algoritmos bem-sucedidos desenvolvidos para PLI incorpora o método SIMPLEX, relacionando trechos do problema de PLI ao problema de programação linear correspondente (isto é, uma forma modificada do problema original, onde a restrição inteira é temporariamente eliminada). Este processo é comumente chamado de relaxamento do problema de PLI (Arenales et al., 2011; Hillier & Lieberman, 2010; Taha et al., 2006)

Segundo Taha et al. (2006), a estratégia geral destes algoritmos de PLI é a seguinte:

- Passo 1:** Relaxar o problema de PLI ao problema de PL correspondente;
- Passo 2:** Resolver o problema de PL correspondente e guardar a solução ótima (ponto ótimo contínuo);
- Passo 3:** Começando pelo ponto do ótimo contínuo, adicionar restrições especiais que, iterativamente, modificam o espaço solução de maneira que retorne um ponto extremo ótimo que satisfaça as restrições de número inteiro.

Entre as principais técnicas para gerar as restrições especiais do terceiro passo, a mais tradicional é a técnica da ramificação e avaliação progressiva ou, em inglês, *branch-and-bound* (B&B). O conceito básico subjacente à técnica B&B é “dividir para conquistar”. Já que o “grande” problema original é muito difícil de ser resolvido, ele é dividido em subproblemas cada vez menores até que possam ser resolvidos. Assim, o conjunto inteiro de soluções viáveis é dividido em subconjuntos cada vez menores, que vão sendo progressivamente avaliados. Caso o limite do subconjunto em questão indique que possivelmente ele não possa conter a solução ótima, ele é descartado (Hillier & Lieberman, 2010; Taha et al., 2006).

Os principais softwares do mercado (por exemplo, CPLEX e Gurobi) incluem nos seus métodos de solução estes e outros algoritmos para a resolução de problemas de PLI.

5.3 MODELOS MATEMÁTICOS

Nos problemas de otimização, geralmente procura-se maximizar aspectos positivos do sistema, como o lucro, e/ou minimizar aspectos negativos, como custos. Para tal, os limites, restrições, características e os indicadores a se maximizar ou minimizar podem ser traduzidos na forma de equações, inequações e relações lógicas de um modelo matemático. Este modelo deve representar o sistema, independentemente dos dados de entrada (Ribas, 2012).

5.3.1 Modelos determinísticos

O modelo matemático que contém somente equações e inequações lineares e variáveis contínuas é chamado de modelo de programação linear (PL). Quando alguma não linearidade é inserida no modelo, ele passa a ser classificado como um modelo de programação não-linear. Do mesmo modo, quando alguma descontinuidade é inserida, o modelo passa a ser classificado como inteiro, podendo ser um modelo de programação linear inteira “pura” ou, simplesmente,

programação linear inteira (PLI), programação linear inteira mista (PLIM), programação não-linear (PNL), programação não-linear inteira (PNLI) ou programação não-linear inteira mista (PNLIM) (Biegler & Grossmann, 2004; Hillier & Lieberman, 2010; Ribas, 2012).

A forma geral, em notação matricial, de um problema de PL pode ser vista na equação (1).

$$\begin{aligned} \text{Otimizar} \quad & \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{Sujeito a:} \quad & \mathbf{Ax} \geq \mathbf{b} \\ & \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \end{aligned} \tag{1}$$

Nesta formulação, a *função objetivo* do problema é otimizar (minimizar ou maximizar) a função $\mathbf{c}^T \mathbf{x}$; $\mathbf{Ax} \geq \mathbf{b}$ e $\mathbf{x} \geq \mathbf{0}$ (em problemas de PLI, $\mathbf{x} \in \mathbb{Z}_+$) representam as *restrições*; \mathbf{x} é o conjunto das variáveis de decisão; \mathbf{c} e \mathbf{A} , os coeficientes (parâmetros) de \mathbf{x} , respectivamente, na função objetivo e nas restrições; e \mathbf{b} , os limites das restrições. As restrições podem ser descritas por equações ou inequações. Este é um modelo determinístico, ou seja, que não considera as incertezas no modelo matemático.

5.3.2 Modelos estocásticos

Se alguns dados do problema de PL são mais apropriadamente descritos através de variáveis aleatórias, surge a Programação Linear Estocástica (PLE). Neste sentido, a programação estocástica envolve uma mistura criativa de programas matemáticos tradicionais (determinísticos) e modelos estocásticos. Em muitos casos, técnicas de solução de programação estocástica dependem de estimativas estatísticas ou de métodos de aproximação numérica (Higle, 2005).

Problemas de otimização estocástica envolvem a programação de recursos, onde decisões ou ações de recurso podem ser tomadas antes ou após a realização das incertezas. No problema clássico de PLE em dois estágios, estas decisões são chamadas, respectivamente, de decisões de primeiro estágio e de segundo estágio (Birge & Louveaux, 2011).

A forma estendida ou o equivalente determinístico do modelo de dois estágios de um problema de PLE, obtida de Birge e Louveaux (2011) e Higle (2005), é mostrada na equação (2).

$$\begin{aligned}
\text{Otimizar} \quad & \mathbf{c}^T \mathbf{x} + E_{\xi}[\mathbf{q}(\omega)^T \mathbf{y}(\omega)] \\
\text{Sujeito a:} \quad & \mathbf{Ax} \geq \mathbf{b} \\
& \mathbf{T}(\omega)\mathbf{x} + \mathbf{W}(\omega)\mathbf{y}(\omega) = \mathbf{h}(\omega), \forall \omega \in \Omega \quad (2) \\
& \mathbf{x}, \mathbf{y}(\omega) \geq \mathbf{0} \quad (\mathbf{x}, \mathbf{y}(\omega) \in \mathbb{Z}_+) \\
\text{onde:} \quad & E_{\xi}[\mathbf{q}(\omega)^T \mathbf{y}(\omega)] = \sum_{s=1}^S P(\xi^s) \mathbf{q}(\xi^s)^T \mathbf{y}(\xi^s)
\end{aligned}$$

O modelo estocástico de dois estágios é considerado uma versão “bem-comportada” de modelos estocásticos, apresentando propriedades que se aplicam a uma vasta gama de problemas. Nesta formulação, o vetor \mathbf{x} corresponde ao conjunto das variáveis de primeiro estágio, onde decisões são tomadas, em caráter definitivo, antes da realização da(s) incerteza(s); o vetor \mathbf{y} corresponde a variáveis de segundo estágio, onde decisões são tomadas após a realização das incertezas, em caráter corretivo; ω (chamado de cenário estocástico) representa a realização de uma possível incerteza; e ξ é o vetor que representa os valores que podem assumir os parâmetros incertos, devido à realização de ω (Birge & Louveaux, 2011; Higle, 2005).

Na função objetivo, a parcela correspondente à variável de decisão de segundo estágio é representada pelo seu valor esperado ($E_{\xi}[\mathbf{q}(\omega)^T \mathbf{y}(\omega)]$), ou seja, é a parcela relacionada às incertezas do problema. Por aproximações discretas, o valor esperado é calculado pelo somatório do produto das probabilidades de ocorrência do cenário incerto ($P(\xi^s)$), dos parâmetros $\mathbf{q}(\xi^s)$ e das variáveis de decisão de segundo estágio $\mathbf{y}(\xi^s)$ (Birge & Louveaux, 2011).

As variáveis de decisão representadas pelo vetor \mathbf{x} também são chamadas de *recursos de primeiro estágio*, enquanto as variáveis do vetor \mathbf{y} são chamadas de *recursos de segundo estágio*.

A formulação apresentada deixa claro quais decisões são tomadas antes da realização das incertezas (independentes de ω) e quais são tomadas depois (dependente de ω).

5.4 O VALOR DA INFORMAÇÃO E DA SOLUÇÃO ESTOCÁSTICA

A otimização estocástica pode ser difícil de ser aplicada em determinados problemas, seja pela dificuldade de modelagem do problema de forma a adequá-lo às técnicas de solução, seja pela dificuldade de resolver o problema computacionalmente.

De acordo com Birge e Louveaux (2011), alternativas mais simples para solução de problemas sob incertezas seriam: (1) resolver problemas determinísticos substituindo os parâmetros incertos por seus valores esperados ou pelas suas médias; e (2) resolver problemas determinísticos para cada cenário incerto e depois combinar as diferentes soluções heurísticamente. A questão que surge é se essas abordagens se aproximam ou não do ótimo.

Existem dois conceitos que podem ser utilizados para responder a questão acima: o valor esperado da informação perfeita (em inglês, *expected value of perfect information – EVPI*) e o valor da solução estocástica (*value of the stochastic solution – VSS*).

5.4.1 Valor Esperado da Informação Perfeita

O valor esperado da informação perfeita (*expected value of perfect information – EVPI*) mede o valor máximo que o tomador de decisões estaria disposto a pagar pela informação completa e precisa sobre o que acontecerá no futuro.

Em problemas de otimização sob incertezas, há duas abordagens clássicas de solução: a abordagem “espere e veja” (*wait and see*) e a abordagem “aqui e agora” (*here and now*). Em “espere e veja”, o tomador de decisão espera pela realização das incertezas para tomar a sua decisão. Já em “aqui e agora”, a decisão deve ser tomada antes ou sem o conhecimento da realização das incertezas. Neste caso, a decisão pode ser tomada abolindo as incertezas ou incorporando-as ao problema (Birge & Louveaux, 2011; Bortolossi & Pagnoncelli, 2008).

Retomando alguns conceitos apresentados na definição do modelo de programação linear estocástica, indicado pela equação (2):

- ξ é o vetor que representa os valores que podem assumir os parâmetros incertos, devido à realização do cenário ω ;
- Para toda realização da incerteza, é possível obter uma solução x viável e, portanto, possível de ser avaliada.
- A solução “aqui e agora” consiste na solução do problema estocástico considerando todos os cenários simultaneamente, também chamado de problema de recurso (em inglês, *recourse problem – RP*).

As soluções “espere e veja” (WS) e “aqui e agora” são indicadas pelas equações abaixo (Birge & Louveaux, 2011):

$$WS = E_{\xi} \left[\min_x z(x, \xi) \right] = E_{\xi} z(\bar{x}(\xi), \xi) \quad (3)$$

$$RP = \min_x E_{\xi} z(x, \xi) \quad (4)$$

Pelas equações acima, WS corresponde ao valor esperado das soluções obtidas pelo modelo determinístico executado para todos valores possíveis dos parâmetros estocásticos enquanto RP corresponde à solução obtida pelo modelo estocástico.

Assim, o valor esperado da informação perfeita (EVPI) é, por definição (Birge & Louveaux, 2011), a diferença entre a solução “aqui e agora” (otimização estocástica) e a “espere e veja” (valor esperado das otimizações determinísticas dos cenários):

$$EVPI = |RP - WS| \quad (5)$$

5.4.2 Valor da Solução Estocástica

O valor da solução estocástica (*value of the stochastic solution* – VSS) mede o benefício obtido ao se considerar a incerteza para a obtenção da solução, quando comparada ao que se teria obtido sem levar em conta a incerteza. Compara o desempenho da decisão tomada com os valores esperados dos parâmetros estocásticos com o desempenho da decisão, quando levada em conta as incertezas na modelagem matemática.

Para se chegar ao VSS, primeiro é necessário resolver o “problema de valor esperado” (EV), que corresponde ao problema determinístico considerando os valores esperados das incertezas (vetor ξ), conforme a equação abaixo (Birge & Louveaux, 2011):

$$EV = \min_x z(x, \bar{\xi}), \quad (6)$$

onde: $\bar{\xi} = E_{\xi} |\xi|$ e $\bar{x}(\xi)$ é a solução de EV

O resultado esperado (EEV) da utilização da solução de EV é o valor obtido para a função objetivo, como mostra a equação:

$$EEV = E_{\xi}[z(\bar{x}(\xi), \xi)] \quad (7)$$

Finalmente, o VSS é definido pela diferença entre o resultado obtido pela solução determinística utilizando os valores esperados das incertezas (EEV) e o resultado obtido pela solução estocástica (RP).

$$VSS = |EEV - RP| \quad (8)$$

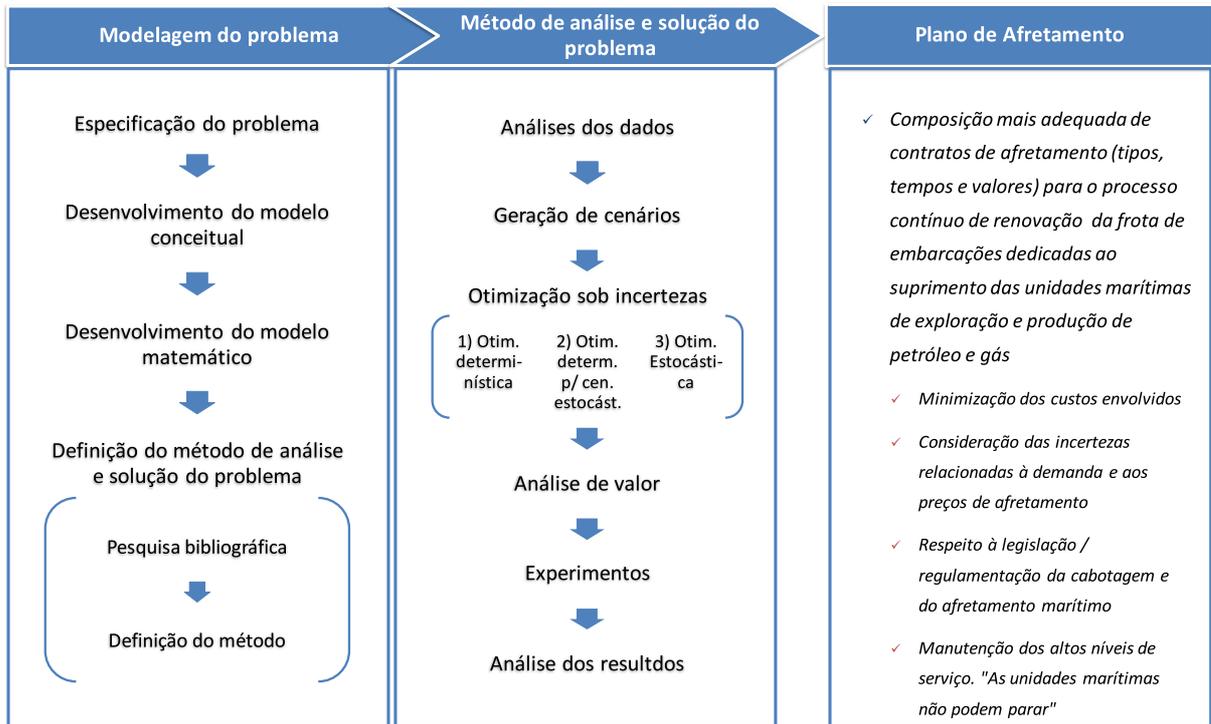
6 MÉTODO DE ANÁLISE E SOLUÇÃO DO PROBLEMA

O método de análise e solução do problema foi definido a partir das questões levantadas ao longo do desenvolvimento da pesquisa, apresentadas no terceiro capítulo. Seguindo as etapas da modelagem, buscou-se, primeiro, o entendimento e a correta caracterização do problema; em seguida, foram analisadas as principais abordagens de solução encontradas na literatura; e, por fim, o método foi definido.

O método é baseado na modelagem *hard* do problema e considera etapas qualitativas e quantitativas de análise e solução. Além do modelo matemático/computacional para a resolução do problema de otimização da composição de contratos, contempla uma fase preliminar de planejamento, que tem por objetivo definir os parâmetros de análise e preparar os dados de entrada do modelo; e uma fase posterior para a análise dos resultados gerados pelo modelo. A Figura 8 apresenta as etapas do método.

A principal abordagem de solução definida para o problema de otimização do mix de contratos é a Otimização Estocástica (ou Programação Estocástica). Mas, além desta, outras duas técnicas são analisadas: otimização determinística com valores esperados dos parâmetros estocásticos e otimização determinística para cenários estocásticos e combinação heurística dos resultados.

Figura 8: Modelagem e solução do problema



Fonte: Elaborado pelo autor

6.1 ESPECIFICAÇÃO DO PROBLEMA

O método será aplicado em uma grande empresa do setor de óleo e gás no Brasil e deve resultar em um *Plano de Afretamento* para o atendimento à demanda de um determinado tipo de embarcação para um dado período de planejamento. O plano deve considerar o conjunto ótimo de contratos de afretamento – melhor combinação de tipos de contratos e tempo de vigência – que minimize os custos e os riscos envolvidos. O método contempla a definição, a análise e o tratamento prévio de premissas e informações disponíveis.

O *Plano de Afretamento* gerado deve conter as seguintes informações: o período de análise; um resumo das premissas e informações de entrada; o conjunto ótimo de embarcações afretadas (tipo de afretamento, início de vigência, tempo de afretamento e valor do contrato); e um gráfico contendo, mês a mês, o número de contratos por tipo de afretamento e as demandas a serem atendidas ao longo do período de planejamento.

O método será aplicado para o desenvolvimento de um plano de afretamento de embarcações do tipo *Platform Supply Vessels* (PSV), que compõem a maior parte da frota de apoio *offshore* da empresa. O dimensionamento da frota não faz parte do escopo do trabalho. A

quantidade de PSV's necessária (demanda terciária) é obtida a partir de ferramenta já existente na empresa.

O horizonte de planejamento deve ser definido pelo usuário. Portanto, o período de análise do estudo é parâmetro do modelo. São dados de entrada do modelo: a frota atual da empresa (tipo de contrato de afretamento, tempo de afretamento e início de vigência); a frota existente no mercado brasileiro; a demanda por embarcações gerada para o período de análise; e a previsão das taxas de afretamento por tipo e tempo de afretamento (\$/mês). Dessas informações, a demanda por embarcações e as taxas de afretamento são consideradas variáveis estocásticas. As demais variáveis são assumidas determinísticas.

6.2 MODELO CONCEITUAL

A modelagem conceitual do processo de renovação da frota de apoio *offshore* é descrito a seguir. As premissas e informações sobre o processo foram validadas pela empresa onde o trabalho foi aplicado.

A frota precisa atender às necessidades de suprimento das unidades marítimas existentes e das novas unidades planejadas para o futuro. A demanda por transporte, portanto, varia com o tempo; e o perfil e o tamanho da frota precisam ser continuamente avaliados.

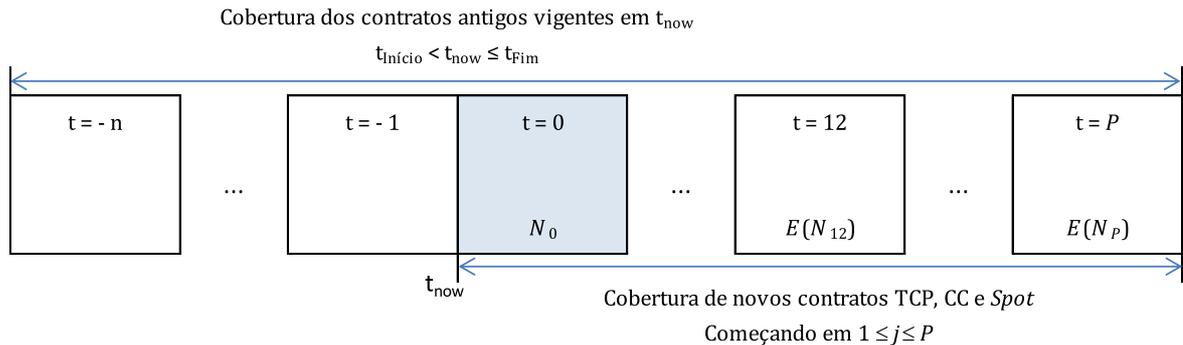
A cada ciclo de planejamento, a frota é reavaliada visando o atendimento adequado da demanda prevista ao menor custo possível. Como as embarcações são todas afretadas, com contratos de diferentes durações, é preciso considerar períodos subsequentes de atendimento de demanda. De maneira análoga aos ciclos de planejamento estratégico, o horizonte de análise do plano de afretamento é maior do que os ciclos de planejamento. O plano pode, por exemplo, abranger um horizonte de 48 meses e os ciclos replanejamento se repetirem a cada ano.

O afretamento pode ser feito por três diferentes modalidades⁷: contratos por tempo (TCP), com duração de 12, 24, 36 ou 48 meses; contratos por chamada (CC), que são contratos de curta duração (2, 3 ou 6 meses); e contratos do mercado *spot*, de curtíssima duração (um mês).

⁷ São consideradas as principais modalidades e durações de contratos de afretamento realizadas no mercado brasileiro.

A Figura 9 ilustra o processo de requisição de novas embarcações (novos contratos de afretamento), com a representação dos contratos antigos e novos no período de análise, onde j denota o período de início dos contratos TCP, CC e *Spot*, l denota a duração dos contratos TCP e m , a duração dos contratos CC (em meses). Os contratos *Spot* têm duração de um mês.

Figura 9: Necessidade de novas embarcações e cobertura dos contratos de afretamento



Fonte: adaptado de Siddiqui e Verma (2017)

Tamanho dos contratos: TCP: $l \in \{12, 24, 36, 48\}$, CC: $m \in \{2, 3, 6\}$ e *Spot*: 1

De um lado da figura, estão representados os contratos comprados em períodos anteriores, cuja cobertura atinge o momento de decisão atual (t_{now}) e, do outro, possíveis novos contratos iniciados a partir do primeiro período até o último período do horizonte de planejamento (a letra P representa o horizonte de planejamento, que é parâmetro do modelo). Neste trabalho, os contratos por tempo (TCP) têm duração mínima de um ano e máxima de 4 anos (12, 24, 36 e 48 meses); já os contratos por chamada podem durar 2, 3 ou 6 meses. Embora em $t = 0$, a requisição adicional de embarcações (N_0) seja conhecida, para os períodos subsequentes, apenas os números esperados dessas exigências estão disponíveis ($E(N_t)$). Se forem considerados os contratos TCP, CC e *Spot*, com duração máxima de 48 meses (TCP), então valores de $t = 1$ a $t = 47$ (para um horizonte de planejamento de quatro anos) são os períodos cujas decisões de ajuste de frota são impactadas pelo conjunto de contratos escolhidos para atender à demanda em $t = 0$. Por outro lado, os contratos comprados em períodos anteriores (até $t = -1$) devem ser considerados no período de início do planejamento e em cada período subsequente, conforme a duração desses contratos. Assim, deseja-se minimizar os custos de afretamento e, ao mesmo tempo, satisfazer a necessidade de frota no presente e a necessidade esperada em cada período subsequente no horizonte de planejamento. Como as decisões de ajuste da frota são realizadas a cada mês (o modelo é atualizado e resolvido no início de cada mês), os períodos mais distantes têm maior número de decisões de ajuste da frota (para $t = 1$, tem-se uma solução de ajuste; para $t = 2$, a frota é reajustada duas vezes; para $t = 3$, três vezes;

e assim por diante). Durante todas as revisões, a frota é reajustada com base em informações cada vez mais precisas.

6.2.1 Parâmetros determinísticos

Os parâmetros determinísticos do modelo são aqueles que não apresentam incertezas relevantes. No caso do problema apresentado, correspondem basicamente aos dados relacionados à frota de embarcações (frota de PSV) existentes no mercado e à frota já contratada pela empresa.

São dados de entrada do modelo a frota total oferecida no mercado brasileiro e a frota já contratada pela empresa. A diferença entre elas resulta nas embarcações disponíveis no mercado para serem afretadas.

Também são parâmetros determinísticos: o período de análise do problema, os tipos de contrato de afretamento e os tempos de vigência desses contratos.

O período de análise é o horizonte de otimização, que geralmente corresponde ao período de planejamento da frota. Os tipos de contrato de afretamento são aqueles praticados no mercado brasileiro: contratos por tempo (TCP), contratos por chamada (CC) e contratos *spot*. Serão considerados os seguintes tamanhos de contrato: TCP: 12, 24, 36 e 48 meses; CC: 2, 3 e 6 meses; e *Spot*: 1 mês.

6.2.2 Parâmetros estocásticos

Nesta seção, são apresentados os parâmetros estocásticos do problema de otimização do mix de contratos de afretamento, ou seja, os parâmetros que apresentam alguma variabilidade ou incertezas relacionadas.

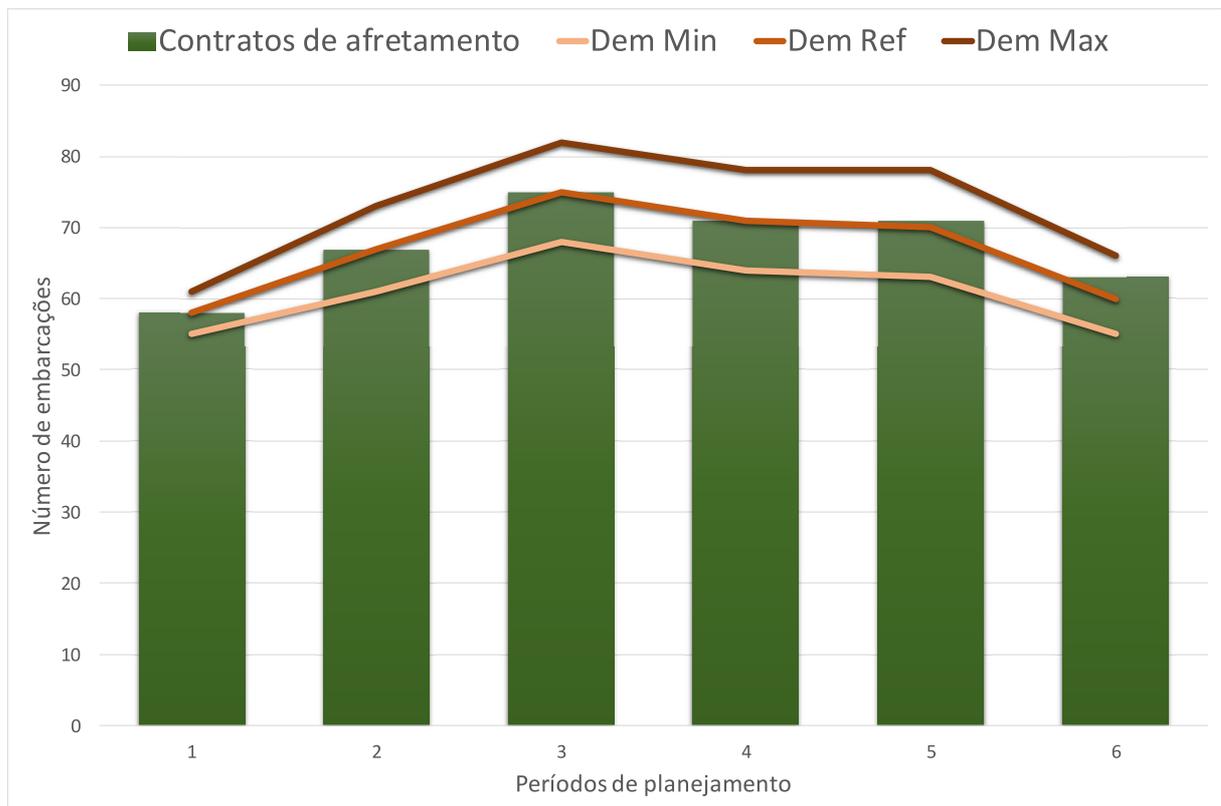
6.2.2.1 Demanda por embarcações

A demanda por embarcações ao longo do período de planejamento trata-se, conforme explicado na seção 2.2, da demanda terciária, que deriva da necessidade por novas unidades marítimas (UM's), demanda primária, e do consumo de suprimentos por cada UM, demanda secundária. Apresenta, portanto, um alto nível de incerteza. Tais incertezas serão inseridas

no modelo utilizando-se o conceito de “túnel de risco”, definido pela empresa onde este trabalho é aplicado.

O *túnel de risco* corresponde à área do gráfico de *demanda por embarcações versus tempo* que é delimitada pelas demandas *mínima* e *máxima*, conforme representado no Gráfico 7.

Gráfico 7: Contratos de afretamento versus o “túnel de risco” de demanda



Além das demandas mínima e máxima por embarcações, observa-se entre elas no gráfico a *demanda de referência*, que corresponde à demanda esperada ao longo do tempo de planejamento, considerando-se as incertezas relacionadas. As embarcações sob contratos de afretamento ao longo do tempo também estão representadas no gráfico.

A demanda mínima é a demanda considerada certa de acontecer e, portanto, deve ser atendida integralmente. Estão associadas a esta demanda as UM's (sondas e plataformas) já em atividade, ou cujo cronograma de desenvolvimento do projeto até a entrada em operação tem certeza de acontecer no prazo previsto. O não atendimento da demanda mínima causa a falta de suprimentos para UM's, podendo resultar na parada da operação dessas unidades. Conforme

descrito no segundo capítulo, a parada inesperada de uma UM gera prejuízos da ordem de centenas de milhares de dólares por dia.

Por outro lado, a demanda máxima está relacionada às UM's cujos cronogramas de entrada em operação apresentam incertezas ainda elevadas, como, por exemplo, UM's que estejam em fase inicial de construção ou aquelas que ainda se encontram em fase de planejamento. Se a quantidade de embarcações contratadas for superior à demanda máxima, há grande risco de se ter embarcações ociosas durante os seus tempos de contrato, o que seria extremamente indesejado pela empresa.

As demandas por embarcação (mínima, máxima e de referência) são obtidas pela empresa através de um método desenvolvido internamente para análise de demanda e dimensionamento da frota de embarcações de apoio marítimo.

Por serem classificados pela empresa como informações estratégicas e, portanto, altamente sigilosos, os dados de demanda utilizados neste trabalho foram modificados.

6.2.2.2 *Taxas de afretamento*

Os preços – ou taxas, uma vez que são expressos em \$/dia ou \$/mês – dos diversos tipos de afretamento apresentam grande variabilidade ao longo do tempo e também se constituem em parâmetros estocásticos do modelo.

A construção de índices de preço para o mercado de embarcações de apoio *offshore* é muito difícil, conforme apresentado na seção 2.4. Por isso, neste trabalho, serão analisados três cenários de evolução das taxas de afretamento, definidos a partir de informações obtidas sobre o mercado brasileiro (vide seção 2.5) e especialistas consultados (profissionais da empresa onde o trabalho foi aplicado e de outras instituições relacionadas ao mercado de óleo e gás e de transporte marítimo).

Como será detalhado na seção 6.4.2, os três valores de demanda e os três cenários de preços, citados anteriormente, serão utilizados de formas distintas para a geração de cenários para as estratégias de otimização que serão avaliadas.

6.3 MODELO MATEMÁTICO

O problema a ser resolvido trata-se de um problema de otimização de mix de contratos, cujo objetivo é minimizar o custo total de afretamento, levando em consideração o risco da empresa (relacionado às incertezas da demanda) e o risco de mercado (relacionado às incertezas dos preços de afretamento).

A seguir, são desenvolvidos os modelos matemáticos determinístico e estocástico do problema, aplicando-se os conceitos e as técnicas apresentadas no capítulo anterior. A nomenclatura utilizada nos modelos se baseia na modelagem de Siddiqui e Verma (2017).

Nos modelos desenvolvidos, a unidade de tempo é o *mês* e o horizonte de planejamento (P) é parametrizado no modelo ($P = 12, 24, 36, 48, \dots$).

Conjuntos:

- $T = \{1, 2, \dots, P\}$ – período de planejamento;
- $L = \{12, 24, 36, 48\}$ – tamanho dos contratos TCP;
- $M = \{2, 3 \text{ e } 6\}$ – tamanho dos contratos CC;
- $W = \{1, 2, \dots, 81\}$ – cenários do modelo estocástico (combinação dos 3 cenários de preço com os 3 de demanda).

Índices:

- i : Período no qual o instrumento contratual é planejado, nos contratos por tempo (TCP) ou por chamada (CC), ou comprado (contratos *Spot*), onde $i \in T$;
- j : Período no qual o contrato de frete por tempo (TCP) ou contrato por chamada (CC) começa (o contrato *Spot* começa no momento da compra), onde $j \in T$;
- l : Duração de um contrato TCP (meses), onde $l \in L$;
- m : Duração de um contrato CC, onde $m \in M$;
- t : Período de tempo de determinado horizonte de planejamento, onde $t \in T$;
- w : Cenário do modelo estocástico, onde $w \in W$.

Variáveis de decisão:

- V_l^j : Número de contratos TCP de tamanho $l \in L$, para começar no período $j \in T$;
- X_m^j : Número de contratos CC de tamanho $m \in M$, para começar no período $j \in T$;
- S_j : Número de embarcações obtidas por meio de afretamento no mercado *spot*⁸ no período $j \in T$.

Parâmetros de afretamento:

- Dem_t : Demanda por embarcações no período $t \in T$;
- $DMax_t$: Demanda máxima por embarcações no período $t \in T$;
- $Dem_{w,t}$: Demanda por embarcações do cenário $w \in W$, no período $t \in T$;
- α_w : Probabilidade de ocorrência do cenário $w \in W$ ($\sum_w \alpha_w = 1$);
- U^j : Número total de embarcações já existentes por contratos TCP em $j \in T$;
- \bar{U}^j : Número total de embarcações oferecidas em t_0 por contratos TCP começando em $j \in T$;
- Q^j : Número total de embarcações já existentes por contratos CC em $j \in T$;
- \bar{Q}_m^j : Número de embarcações oferecidas em t_0 , em contratos CC de tamanho m , iniciados em $j \in T$;
- \bar{Q}^j : Número total de embarcações oferecidas em t_0 por contratos CC começando em $j \in T$.

Todas as embarcações existentes no mercado realizam contratos TCP de qualquer tamanho de vigência, mas nem todas aceitam contratos CC. Das que aceitam, algumas só aceitam realizar contratos de tamanhos determinados (vide Tabela 3). Ou seja, $\bar{Q}_m^j < \bar{Q}^j < \bar{U}^j$.

Parâmetros de preço:

- TC_l^j : Taxa de afretamento TCP (\$/mês) para contratos de tamanho l , começando em $j \in T$;
- XC_m^j : Taxa de afretamento CC (\$/mês) para contratos de tamanho m , começando em $j \in T$;
- SC_i : Taxa de afretamento para contratos adquiridos no mercado *spot* no período $i \in T$.
- $E(TC_l^j)$: Valor esperado da taxa de afretamento TCP (\$/mês) para contratos de tamanho l , começando em $j \in T \rightarrow E(TC_l^j) = \sum_w \alpha_w TC_l^{w,j}$, $w \in W$;

⁸ Por definição da empresa, o mercado *spot* corresponde ao contrato pelo período de um mês adquirido no momento de sua requisição. A empresa só realiza esta operação em caso de urgência.

$E(XC_m^j)$: Valor esperado da taxa de afretamento CC (\$/mês) para contratos de tamanho m , começando em $j \in T \rightarrow E(XC_m^j) = \sum_w \alpha_w XC_m^{w,j}$, $w \in W$;

$E(SC_i)$: Valor esperado da taxa de afretamento para contratos adquiridos no mercado *spot* no período $i \in T \rightarrow E(SC_i) = \sum_w \alpha_w SC_{w,i}$, $w \in W$.

6.3.1 Modelo determinístico

Na modelagem determinística de PLI, todos os parâmetros e variáveis do modelo são representados de forma determinística, ou seja, possíveis variabilidades que possam existir não são consideradas no modelo matemático.

O modelo determinístico é utilizado nas estratégias de solução 1 e 2, que compõem a etapa de análise e solução do problema (vide seções 6.4.3.1 e 6.4.3.2).

Função objetivo:

$$\min \sum_{j \in T} \sum_{l \in L} TC_l^j V_l^j + \sum_{j \in T} \sum_m XC_m^j X_m^j + \sum_{i \in T} SC_i S_i \quad (9)$$

Restrições:

$$\sum_{j \in T} \sum_{l=\max(t-j+1,12)}^{60} V_l^j + \sum_{j \in T} \sum_{m=\max(t-j+1,2)}^6 X_m^j + S_t + U^t + Q^t \geq Dem_t, \quad \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{j \in T} \sum_{l=\max(t-j+1,12)}^{60} V_l^j + \sum_{j \in T} \sum_{m=\max(t-j+1,2)}^6 X_m^j + S_t + U^t + Q^t \leq DMax_t, \quad \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_l V_l^j + \sum_m X_m^j + S_j + U^j + Q^j \leq \bar{U}^j, \quad \forall j \in T, \quad l \in L, \quad m \in M \quad (12)$$

$$\sum_l V_l^j + U^j \leq \bar{U}^j, \quad \forall j \in T, \quad l \in L \quad (13)$$

$$\sum_m X_m^j + Q^j \leq \bar{Q}^j, \quad \forall j \in T, \quad m \in M \quad (14)$$

$$X_m^j \leq \bar{Q}_m^j, \quad \forall j \in T, \quad m \in M \quad (15)$$

$$V_l^j, X_m^j, S_j \in \mathbb{Z}_+, \quad \forall j \in T, \quad l \in L, \quad m \in M \quad (16)$$

O custo total de afretamento é determinado pelos preços dos contratos que compõem o mix de contratos para cobrir as necessidades de embarcações nos períodos do horizonte de planejamento.

O problema tem por objetivo minimizar o custo total de afretamento, conforme indicado na equação (9). A primeira parcela representa os contratos TCP, de diversos tamanhos em L , começando em diferentes períodos em T . Da mesma forma, a segunda parcela representa os contratos CC e a terceira, os contratos *Spot*.

O atendimento das necessidades mínima e máxima de embarcações são garantidas pelos conjuntos de restrições (10) e (11), respectivamente. Do lado esquerdo das equações, são contabilizadas as embarcações já existentes e os novos contratos em cada período de T . Já do lado direito, nas restrições (10), têm-se a demanda a ser atendida em cada período e, em (11), a demanda máxima de cada período que não pode ser ultrapassada.

As demandas por embarcações indicadas em (10) apresentam variabilidade e serão determinadas de formas diferentes conforme a estratégia de solução adotada. Vide seção 6.4.1.2 sobre análise de dados dos parâmetros estocásticos.

O conjunto de restrições (12) garante que as somas de todas as embarcações utilizadas, antigas e novas, nos períodos de planejamento não ultrapassem as embarcações existentes no mercado. De forma análoga, as restrições (13) garantem embarcações com contratos TCP, e as restrições (14), embarcações com contratos CC.

Os contratos por chamada (CC) não são feitos por todos os armadores ou fornecedores de transporte marítimo e, daqueles que o fazem, boa parte não faz nos três tamanhos de contrato. Assim, o conjunto de restrições (15) visa garantir que os contratos CC de cada tamanho não ultrapassem a oferta no mercado.

As restrições (16) definem as variáveis de decisão como variáveis inteiras.

6.3.2 Modelo estocástico

Na modelagem estocástica, procura-se representar as incertezas dos parâmetros/variáveis estocásticas intrinsicamente ao modelo matemático.

Este é um modelo de Programação Linear Estocástica (PLE), inteira, de dois estágios, apresentado anteriormente, que é utilizado na terceira estratégia de solução (vide 6.4.3.3).

Função objetivo:

$$\begin{aligned} \min \sum_{j \in T} \sum_{l \in L} E(TC_l^j) W_l^j + \sum_{j \in T} \sum_{m \in M} E(XC_m^j) m X_m^j + \sum_{i \in T} E(SC_j) S_{w,j} \rightarrow \\ \rightarrow \min \sum_{w \in W} \alpha_w C_w, \text{ onde:} \end{aligned} \quad (17)$$

$$C_w = \sum_{j \in T} \sum_{l \in L} TC_l^{w,j} W_l^j + \sum_{j \in T} \sum_{m \in M} XC_m^{w,j} m X_m^j + \sum_{j \in T} SC_{w,j} S_{w,j}, \quad \forall w \in W \quad (18)$$

Restrições:

$$\sum_{j \in T} \sum_{l=\max(t-j+1,12)}^{60} V_l^j + \sum_{j \in T} \sum_{m=\max(t-j+1,2)}^6 X_m^j + S_{w,t} + U^t + Q^t \geq Dem_{w,t}, \quad \forall t \in T, \quad w \in W \quad (19)$$

$$\sum_{j \in T} \sum_{l=\max(t-j+1,12)}^{60} V_l^j + \sum_{j \in T} \sum_{m=\max(t-j+1,2)}^6 X_m^j + S_{w,t} + U^t + Q^t \leq DMax_t, \quad \forall t \in T, \quad w \in W \quad (20)$$

$$\sum_l V_l^j + \sum_m X_m^j + S_{w,t} + U^j + Q^j \leq \bar{U}^j, \quad \forall j \in T, \quad l \in L, \quad m \in M \quad (21)$$

$$\sum_l V_l^j + U^j \leq \bar{U}^j, \quad \forall j \in T, \quad l \in L \quad (22)$$

$$\sum_m X_m^j + Q^j \leq \bar{Q}^j, \quad \forall j \in T, \quad m \in M \quad (23)$$

$$X_m^j \leq \bar{Q}_m^j, \quad \forall j \in T, \quad m \in M \quad (24)$$

$$V_l^j, X_m^j, S_{w,t} \in \mathbb{Z}_+, \quad \forall j \in T, \quad l \in L, \quad m \in M, \quad w \in W \quad (25)$$

A função objetivo do problema é representada pelas equações (17) e (18). A equação (18) representa o custo total de afretamento de cada cenário estocástico. Nesta equação, observa-se que, além dos parâmetros estocásticos de preço ($TC_l^{w,j}$, $XC_m^{w,j}$ e $SC_{w,j}$), a variável de decisão de embarcações contratadas no mercado *spot* ($S_{w,j}$) também depende do cenário estocástico (w). A minimização do custo total de afretamento, equação (17), é ponderada pelas probabilidades de ocorrência de cada cenário (valores esperados).

A variável de decisão $S_{w,t}$ ainda vai aparecer nas restrições relativas ao atendimento das demandas mínima e máxima de embarcações, equações (19) e (20). Já a demanda a ser atendida ($Dem_{w,t}$), que também depende do cenário w , aparece no conjunto de restrições da equação (19).

As demais restrições do modelo, que não estão relacionadas a variáveis e parâmetros estocásticos, são idênticas às do modelo determinístico.

Este modelo, portanto, caracteriza-se como um modelo de PLE de dois estágios, onde as incertezas são reproduzidas por meio de cenários. Desta forma, os parâmetros estocásticos do problema – preços de afretamento e demanda por embarcações – estão associados a cada cenário, tanto na função objetivo quanto nas restrições. Além desses parâmetros, a variável de decisão do número de embarcações afretadas no mercado *spot*, que é tratada como um *recurso de segundo estágio*, também depende do cenário estocástico. Assim, as variáveis de primeiro estágio (independentes de w) do modelo são V_l^j e X_m^j ; e as de segundo estágio (dependentes de w), $S_{w,j}$.

Diferente da maioria dos modelos de PLE de dois estágios, vide equação (2) no quinto capítulo, este modelo apresenta na função objetivo, equação (18), parâmetros estocásticos acompanhando as variáveis de decisão de primeiro estágio. Isso significa que as decisões de primeiro estágio, de caráter definitivo, relativas ao número de embarcações afretadas por TCP e por CC, são tomadas com base nos valores esperados de suas taxas de afretamento. Já as

correções de segundo estágio, dependentes da ocorrência das incertezas, são feitas utilizando-se embarcações contratadas no mercado *spot*.

6.4 MÉTODO DE SOLUÇÃO

Nesta seção, são detalhadas as etapas do método de solução, apresentado na Figura 8.

6.4.1 Análise dos dados

É preciso analisar cuidadosamente as informações disponíveis, procurando identificar os parâmetros determinísticos e estocásticos que serão utilizados no modelo, conforme apresentado no modelo conceitual. Atenção especial deve ser dada aos parâmetros estocásticos, que precisam ser tratados de acordo com a técnica de solução adotada.

6.4.1.1 Parâmetros determinísticos

Os parâmetros determinísticos definidos para o problema são:

- a) Período de análise: corresponde ao horizonte de planejamento definido para o plano de afretamento: 48 meses;
- b) Tipos de contratos de afretamento e seus respectivos tamanhos de vigência: contratos de afretamento por tempo (TCP): 12, 24, 36 e 48 meses; contratos por chamada (CC): 2, 3 e 6 meses; e contratos *spot*: 1 mês;
- c) Frota de embarcações do tipo PSV existentes no país: 177, onde: todas fazem contratos *spot* e TCP; contratos CC de 2 meses: 15% do total aceitam realizar; contratos CC de 3 meses: 20%; e contratos CC de 6 meses: 30%. A frota é importada para o modelo por meio de um arquivo CSV (vide Tabela 3);

Tabela 3: Frota de embarcações PSV no Brasil

Período	Total	1	2	3	6	12	24	36	48
1	177	1	0.15	0.2	0.3	1	1	1	1
2	177	1	0.15	0.2	0.3	1	1	1	1
3	177	1	0.15	0.2	0.3	1	1	1	1
...
46	177	1	0.15	0.2	0.3	1	1	1	1
47	177	1	0.15	0.2	0.3	1	1	1	1
48	177	1	0.15	0.2	0.3	1	1	1	1

d) Frota de embarcações do tipo PSV já contratada na empresa: 54. A frota existente para o atendimento de sua demanda atual é importada para o modelo por meio de um arquivo CSV (vide Tabela 4). Por motivos de confidencialidade, a frota contratada utilizada neste trabalho foi modificada.;

Tabela 4: Frota de embarcações PSV da empresa

ID	Tipo_Embarcacao	Tipo_Contrato	Inicio	Fim	Mes_Inicio	Mes_Fim	Satus
1	PSV	TCP	22/11/2013	19/11/2021	2013-11	2021-11	Antigo
2	PSV	TCP	14/04/2018	24/10/2021	2018-04	2021-10	Antigo
3	PSV	TCP	27/05/2018	09/12/2020	2018-05	2020-12	Antigo
...							
52	PSV	Chamada	26/06/2018	25/09/2019	2018-06	2019-09	Antigo
53	PSV	Chamada	27/05/2019	26/08/2019	2019-05	2019-08	Antigo
54	PSV	Chamada	27/06/2019	26/08/2019	2019-06	2019-08	Antigo

e) Probabilidades de ocorrência dos parâmetros estocásticos: as probabilidades de ocorrência dos parâmetros estocásticos foram definidas a partir de análise de dados históricos e de conversas com especialistas. Na Tabela 5, se encontram as probabilidades utilizadas nos experimentos deste trabalho.

Tabela 5: Probabilidades de ocorrência dos parâmetros estocásticos

Parâmetro	Dem. Mín./	Dem. Ref./	Dem. Máx./
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Demanda	0,30	0,60	0,10
Preços TCP	0,40	0,30	0,30
Preços CC	0,45	0,35	0,20
Preços <i>Spot</i>	0,50	0,30	0,20

6.4.1.2 Parâmetros estocásticos

As formas como os parâmetros estocásticos serão inseridos nos modelos de otimização são descritas a seguir.

Demanda por embarcações

Na etapa de modelagem conceitual do problema, foi apresentado o conceito de “túnel de risco”, que é definido pelas demandas mínima, máxima e de referência para cada período do horizonte de planejamento (vide Tabela 6).

Tabela 6: Demandas por embarcações

Período	Min	Max	Ref
1	73	81	75
2	81	96	86
3	90	108	96
...
46	51	70	59
47	54	67	61
48	62	81	70

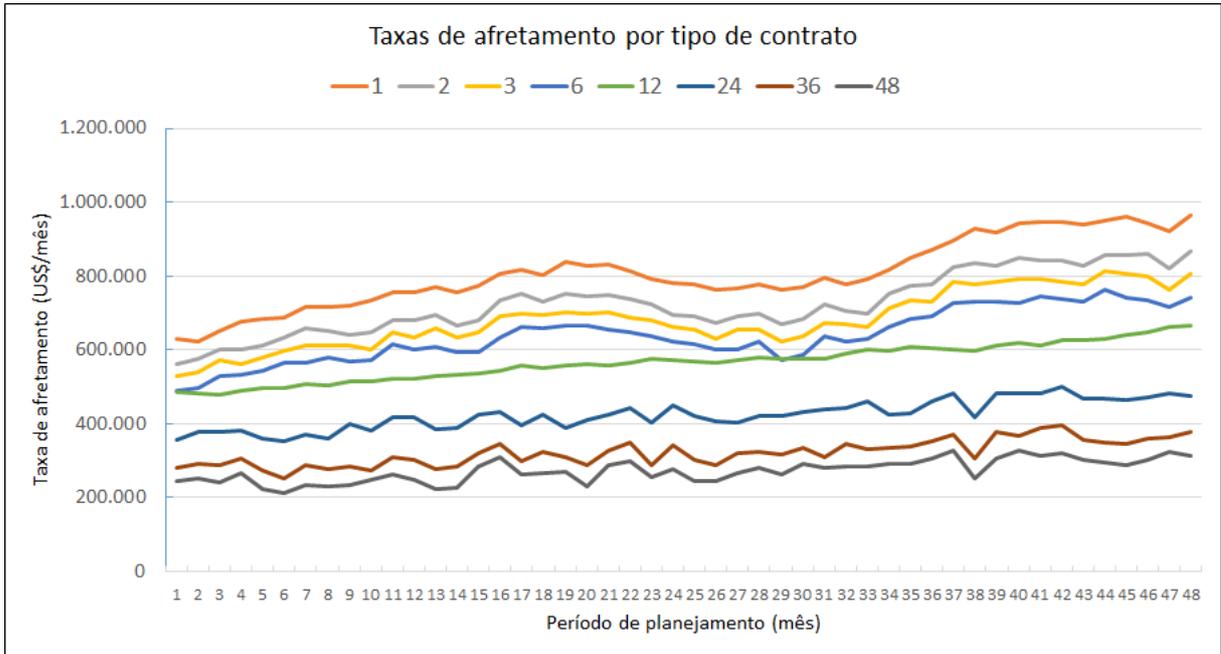
Como será detalhado na próxima seção, a forma de utilização dos valores de demanda no modelo depende da estratégia de solução adotada.

Taxas de afretamento

São analisados três cenários de evolução das taxas de afretamento, definidos a partir de informações obtidas sobre o mercado brasileiro, abordado na quinta seção do segundo capítulo. A construção destes três cenários tem por propósito representar tendências possíveis, a partir de tais informações. Assim, o primeiro cenário, o mais provável de acontecer, toma por base as taxas médias de afretamento do ano de 2018 e as observações sobre o que se espera para 2019 e 2020: que as taxas de afretamento a termo (TCP) permaneçam nos mesmos níveis de 2018, com pequeno crescimento. No segundo cenário, é mantida a tendência de baixo crescimento esperada para os contratos TCP, porém com decréscimo das taxas *spot* e por chamada (CC). Por fim, no terceiro cenário, mantém-se por base os valores médios de 2018 para contratos TCP, mas as taxas *spot* aproximam-se das taxas de TCP (como aconteceu em 2017). São mantidas também as tendências de pequena queda das taxas *spot* e CC e de pequeno aumento das taxas TCP, apresentadas no cenário anterior.

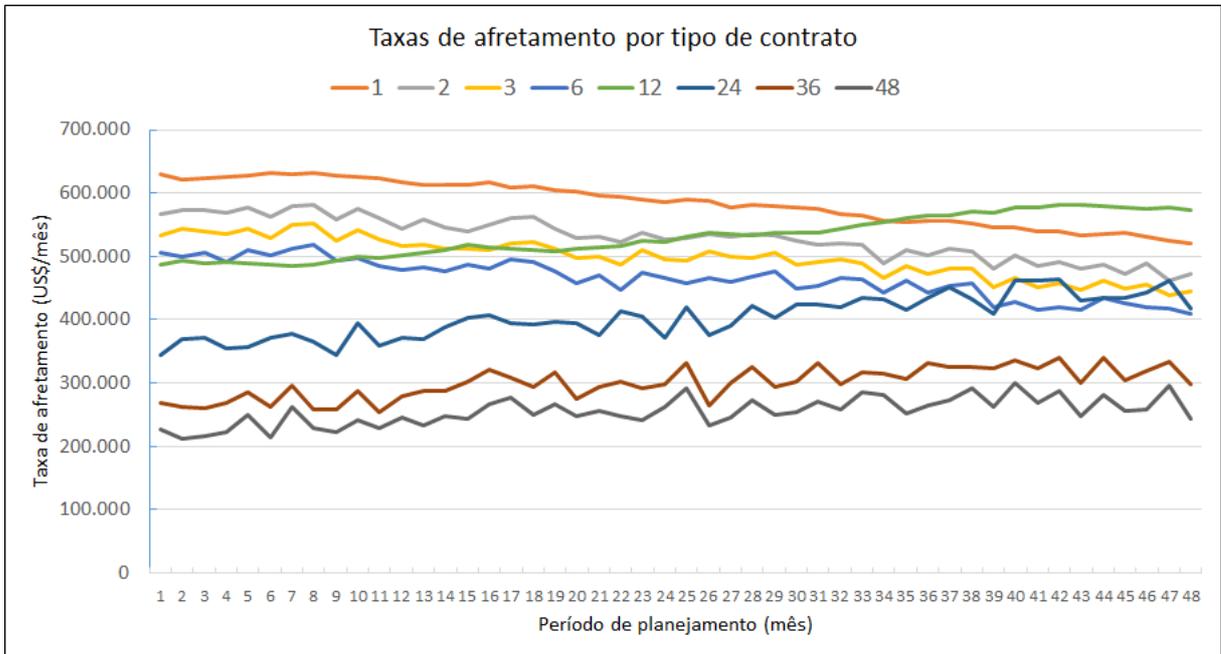
No primeiro cenário, os valores base são as taxas médias de 2018 do mercado *spot* e de contratos TCP (de tamanho 12 meses), respectivamente US\$ 630 mil/mês (US\$ 21 mil/dia) e US\$ 486 mil/mês (US\$ 16,2 mil/dia), para obtenção das taxas dos contratos por chamada (2, 3 e 6 meses) e TCP (24, 36 e 48 meses). As taxas dos contratos são obtidas por meio de descontos sucessivos sobre contratos de tamanho imediatamente anterior, variando entre 12% e 5% para contratos CC, e entre 30% e 5% para contratos TCP. Neste cenário, os preços apresentam uma pequena taxa de crescimento ao longo do tempo, em média entre 0,9% e 1% ao mês. Gráfico 8 mostra a evolução das taxas no cenário 1.

Gráfico 8: Taxas de afretamento por tipo de contrato no cenário 1



O segundo cenário tem os mesmos valores de partida e a mesmas relações entre os contratos. A diferença é que, neste cenário, enquanto as taxas de afretamento *spot* e CC caem em média 0,38% ao mês, as taxas TCP aumentam 0,52% ao mês. Vide Gráfico 9.

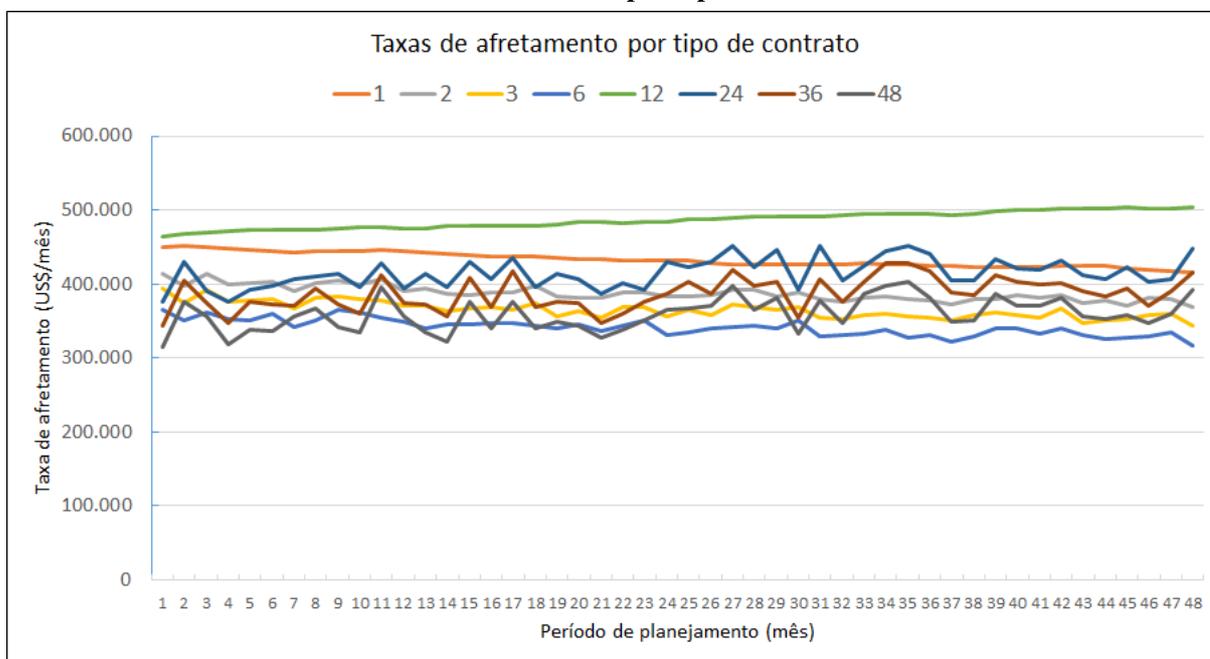
Gráfico 9: Taxas de afretamento por tipo de contrato no cenário 2



Já no terceiro cenário, a relação entre os preços continua a mesma, mas o valor de partida do mercado *spot* passa a ser de US\$ 450 mil/mês (US\$ 15 mil/dia), aproximando-se das taxas

TCP. Neste cenário, as taxas *spot* e CC caem em média 0,23% ao mês, e as taxas TCP aumentam 0,54% ao mês. Vide Gráfico 10.

Gráfico 10: Taxas de afretamento por tipo de contrato no cenário 3



6.4.2 Geração de cenários

As formas como os parâmetros estocásticos são tratados e inseridos nos modelos das estratégias de solução desenvolvidas são descritas nesta seção.

Na estratégia de solução 1, o modelo de otimização determinística é rodado para um único cenário de valores para os parâmetros estocástico. Nesta estratégia, o experimento é realizado com os valores médios da demanda e das taxas de afretamento ponderados pelas probabilidades de ocorrência correspondentes, ou seja, com os seus valores esperados.

Valor esperado, ou esperança, é definido como o produto do valor de uma determinada grandeza pela sua probabilidade de ocorrência (Birge & Louveaux, 2011; Kazmier, 2004). Para uma grandeza que tem as suas incertezas associadas a cenários estocásticos, se a soma das probabilidades de ocorrência de todos os cenários possíveis para essa grandeza é igual a um, o valor esperado (E) dessa grandeza é definido como o somatório dos valores esperados em cada cenário. As formas de cálculo dos valores esperados da demanda e das taxas de afretamento são mostradas nas equações (26) a (29).

$$E(Dem_t) = Prob_{DMin} DMin_t + Prob_{DRef} DRef_t + Prob_{DMax} DMax_t \quad (26)$$

$$E(TC_l^t) = \sum_{w=1}^3 Prob_{TC_w} TC_l^{w,t}, \quad \forall t \in T, \quad l \in L \quad (27)$$

$$E(XC_m^t) = \sum_{w=1}^3 Prob_{XC_w} XC_m^{w,t}, \quad \forall t \in T, \quad m \in M \quad (28)$$

$$E(SC_t) = \sum_{w=1}^3 Prob_{SC_w} SC_{w,t}, \quad \forall t \in T \quad (29)$$

Os valores esperados são calculados para cada período (t) do horizonte de planejamento (conjunto T , definido na modelagem matemática).

Na estratégia de solução 2, o modelo de otimização determinística é rodado para diferentes cenários de valores dos parâmetros estocásticos e, em seguida, os resultados encontrados para cada cenário são combinados heurísticamente para a obtenção do resultado final. Foram realizados experimentos para um conjunto de 100 cenários (amostras), gerados a partir das funções de probabilidade (FDP) definidas para os parâmetros estocásticos em cada período do horizonte de planejamento. As FDP foram determinadas em função das características dos dados utilizados.

Os valores de demanda foram gerados por uma função de probabilidade triangular, cujos parâmetros são as demandas mínima, de referência e máxima:

$$Demanda_t = Triangular(DMin_t, DRef_t, DMax_t) \quad (30)$$

Os valores das taxas de afretamento foram obtidos por uma função de probabilidade normal, cujos valores são as médias das taxas de afretamento e os desvios-padrão obtidos a partir dos três cenários apresentados na seção anterior:

$$Precos_t = Normal(Preco_Med_t, DesvPad_t) \quad (31)$$

O pseudocódigo da rotina de geração das amostras de demanda e preço a partir das FDP se encontra no Quadro 7.

Quadro 7: Pseudocódigo da rotina de geração de cenários para os parâmetros estocásticos – Estratégia 2

```

col ← [1] + M + L {Define a lista 'col' como a soma dessas três listas}
col2 ← ['Cen', 'i'] + col {Define a lista 'col2' dessas duas listas}
demanda ← gera_tabela(colunas: 'Cen','i','Dem')
precos ← gera_tabela(colunas: col2)
para n=1 até amostra faça
  para t em T faça
    valores_demanda ← gera_fdp_triangular(demanda_csv[t-1,'Min'],
demanda_csv[t-1,'Ref'], demanda_csv[t-1,'Max'], tamanho ←
amostra)
    demanda ← adiciona({'Cen': n, 'i': t, 'Dem':
arredonda(valores_demanda[n-1])})
    precos ← adiciona ( {'Cen': n, 'i': t, })
  fim-para
fim-para
para i= 1 até tamanho(precos) faça
  para n=1 até amostra faça
    Se (precos[i,'Cen'] = n) então
      para t em T faça
        Se (precos[i, 'i'] = t) então
          aux_1 ← 2
          para l em col faça
            valores_precos ← gera_fdp_normal(precos_med[t-1,
aux_1-1], std_desv[aux_1-2], tamanho ← amostra)
            precos[i,aux_1] ← valores_precos[n-1]
            aux_1 ++ 1
          fim-para
        fim-se
      fim-para
    fim-se
  fim-para
fim-para

```

Na estratégia de solução 3, as demandas mínima, de referência e máxima são tratadas como cenários de demanda que, combinados com os três cenários das taxas de afretamento, formam os 81 cenários (W) que compõem o modelo de otimização estocástica. Abaixo, são apresentados os pseudocódigos dos trechos do modelo computacional para o cálculo das probabilidades de ocorrência (α) dos cenários e para a geração dos valores de demanda e preços de cada cenário estocástico.

Quadro 8: Pseudocódigo da rotina de cálculo das probabilidades de ocorrência dos cenários estocásticos

```

cont ← 1
alpha ← {} {Prob. de ocorrência do cenário estocástico}
para i em Prob_TCP faça {Conj. prob. dos preços TCP}
  para j em Prob_CC faça {Conj. prob. dos preços CC}
    para k em Prob_Spot faça {Conj. prob. dos preços Spot}
      para l em Prob_Dem faça {Conj. prob. da demanda}
        alpha[cont] = i*j*k*l
        cont ++ 1
      fim-para
    fim-para
  fim-para
fim-para
W ← [1,cont] {Cenários estocásticos}

```

Prob_TCP, Prob_CC, Prob_Spot e Prob_Dem são dados de entrada (vide Tabela 5).

Quadro 9: Pseudocódigo da rotina de geração dos parâmetros estocásticos de cada cenário

```

Dem ← {}
Tc ← {}
Xc ← {}
Sc ← {}
cont ← 0
para i=1 até N_Dem faça {Demanda}
  para j=1 até N_Precos faça {TCP}
    para k=1 até N_Precos faça {CC}
      para n=1 até N_Precos faça {Spot}
        cont ++ 1
        para t em T faça {Conjunto dos meses de planejamento}
          Dem ← adiciona({(cont,t): Dem_aux[i,t]})
          para l em L faça
            Tc ← adiciona({(cont,t,l): Tc_aux[j,t,l]})
          para m em M faça
            Xc ← adiciona({(cont,t,m): Xc_aux[k,t,m]})
            Sc ← adiciona({(cont,t): Sc_aux[n,t]})
          fim-para
        fim-para
      fim-para
    fim-para
  fim-para
fim-para

```

N_Dem e N_Precos são iguais a três (número de cenários definidos para demanda e para os preços). $Dem_aux[i,t]$, $Tc_aux[j,t,l]$, $Xc_aux[k,t,m]$ e $Sc_aux[n,t]$ são obtidos a partir dos dados de demanda e preços.

6.4.3 Otimização do problema

A decisão sobre a composição do mix de contratos de afretamento para atender à demanda ao longo do período de planejamento deve ser tomada no momento da realização do plano. Para isso, foram definidas três estratégias de otimização para o problema: nas duas primeiras, utiliza-se o modelo matemático determinístico de PLI, apresentado na seção 6.3.1 e na terceira, o modelo estocástico, apresentado na seção 6.3.2.

A implementação computacional dos modelos matemáticos foi feita por meio do emprego do solver Gurobi 8.1.0 (win64, Python). Os códigos foram desenvolvidos em Python 3.6.4.

Os modelos computacionais desenvolvidos são compostos, basicamente, por três módulos: pré-processamento, execução do modelo de programação matemática (PLI Determinístico ou PLI estocástico) e pós-processamento. Os módulos são descritos a seguir:

Quadro 10: Estrutura básica dos modelos computacionais desenvolvidos

I - Pré-processamento:

1. Definição dos parâmetros de planejamento: períodos de planejamento e datas de início e fim;
2. Importação dos arquivos de entrada: frota de embarcações PSV no Brasil, frota de embarcações PSV da empresa, demanda por embarcações e taxas de afretamento;
3. Definição dos parâmetros do modelo matemático, a partir dos arquivos de entrada:
 - a) Parâmetros determinísticos, por período (t):
 - (1) Número de embarcações já contratadas pela empresa ($U[t]$);
 - (2) Número de embarcações disponíveis no mercado ($Ut[t]$);
 - (3) Número de embarcações já existentes sob contratos CC ($Q[t]$);
 - (4) Número de embarcações disponíveis no mercado que aceitam contratos CC de tamanho m ($Qo[t, m]$);
 - (5) Número total de embarcações disponíveis no mercado que aceitam

contratos CC ($Qt[t]$);

- b) Parâmetros estocásticos:
- (1) Geração de cenários de demanda por embarcações (conforme a estratégia de otimização);
 - (2) Geração de cenários das taxas de afretamento por tipos e tamanhos de contrato (conforme a estratégia de otimização);
- c) Verificação da formulação do problema: o solver utilizado já possui um módulo para detectar na formulação original do problema variáveis e restrições redundantes.

II - Execução do modelo de programação matemática:

Estratégia 1: execução do modelo determinístico de Programação Linear Inteira, com valores médios ponderados para as variáveis estocásticas.

Estratégia 2: execução do modelo determinístico de Programação Linear Inteira, com geração de cenários para os parâmetros estocásticos e combinação heurística dos resultados.

Estratégia 3: execução do modelo de Programação Linear Estocástica em Dois Estágios.

III - Pós-processamento:

1. Consolidação dos resultados gerados pelo modelo de otimização: valores da função objetivo (custo de afretamento) e das variáveis de decisão (quantidades de contratos por tipo e tamanho);
2. Combinação heurística dos resultados de cada cenário (estratégia 2);
3. Apresentação dos resultados.

O quadro acima apresenta a estrutura básica dos modelos desenvolvidos. Os módulos que compõem o modelo de cada estratégia de solução são descritos ao longo desta seção.

No módulo de pré-processamento, a importação dos arquivos de entrada e as definições do período de análise e dos parâmetros determinísticos são iguais nas três estratégias desenvolvidas. Os dados de entrada foram apresentados anteriormente na etapa de análise de dados. A implementação computacional dos parâmetros determinísticos do modelo matemático é descrita a seguir.

O vetor que representa o número de embarcações já existentes na empresa em um determinado período de análise ($U[t]$) é obtido a partir da frota de embarcações da empresa (vide Tabela 4). O pseudocódigo da criação deste vetor é mostrado no Quadro 11. De forma análoga, são obtidos os vetores do número de embarcações existentes na empresa sob contratos por chamada ($Q[t]$) e sob contratos por chamada por tamanho de contrato ($Qo[t, m]$). No primeiro caso, contudo, deve-se filtrar as embarcações da frota sob contratos CC e no segundo, devem ser extraídas também as informações sobre o tamanho dos contratos.

Quadro 11: Pseudocódigo da rotina de criação do vetor de embarcações existentes $U[t]$

```

aux_mes ← data_anterior
aux2 ← 1
para mes em meses_plan faça
  para aux=1 até tamanho de contratos_vigentes faça
    Se aux_mes > contratos_vigentes[aux]['Inicio'] e
      mes <= contratos_vigentes[aux]['Fim'] e
      contratos_vigentes[aux]['Tipo_Contrato'] == 'TCP' faça
      U[aux2] ++ 1
    fim-se
  fim-para
  aux2 ++ 1
  aux_mes ← mes
fim-para

```

Já o número de embarcações disponíveis no mercado (\bar{U}^j , no modelo matemático, ou $Ut[t]$, no modelo computacional) é obtido pela diferença entre o número total da frota Brasil (vide Tabela 3) e o número de embarcações já existentes na empresa. Da mesma forma, número de embarcações disponíveis no mercado que aceitam contratos CC ($Qt[t]$) é obtido pela diferença entre as embarcações do Brasil que aceitam este tipo de contrato e as embarcações da empresa sob este tipo de contrato.

A última etapa do módulo de pré-processamento, a implementação computacional dos parâmetros estocásticos, e os módulos de execução do modelo de otimização e de pós-processamento são diferentes nas três estratégias de solução analisadas.

6.4.3.1 *Modelo determinístico com valores esperados dos parâmetros estocásticos*

Nesta estratégia de solução, o modelo matemático determinístico de PLI é rodado com os valores esperados das variáveis estocásticas. É a solução mais simples, mas os resultados

obtidos se distanciam da realidade porque não consideram as incertezas associadas. É tomada apenas como referência para as demais estratégias analisadas.

Como mostrado na etapa de geração de cenários, os valores esperados da demanda por embarcações e das taxas de afretamento são calculados utilizando-se as fórmulas de (26) a (29) apresentadas naquela etapa. O quadro abaixo apresenta o pseudocódigo da rotina de cálculo dos valores esperados da demanda e das taxas de afretamento.

Quadro 12: Pseudocódigo da rotina de cálculo dos valores esperados – Estratégia 1

```

E_Dem ← {}
E_Tc ← {}
E_Xc ← {}
E_Sc ← {}
para t em T faça
  E_Dem ← adiciona({t: arredonda(DemMin[t]*P_Dem[0] +
    DemRef[t]*P_Dem[1] + DemMax[t]*P_Dem[2]))
  para l em L faça
    E_Tc ← adiciona({(t,l): arredonda(Tc_aux[1,t,l]*P_Dem[0] +
      Tc_aux[2,t,l]*P_Dem[1] +
      Tc_aux[3,t,l]*P_Dem[2]))
  para m em M faça
    E_Xc ← adiciona({(t,m): arredonda(Xc_aux[1,t,m]*P_Dem[0]) +
    Xc_aux[2,t,m]*P_Dem[1]
      + Xc_aux[3,t,m]*P_Dem[2]))
    E_Sc ← adiciona({t: arredonda(Sc_aux[1,t]*P_Dem[0]) +
      Sc_aux[2,t]*P_Dem[1] + Sc_aux[3,t]*P_Dem[2]))
fim-para

```

Nesta rotina, observa-se que os valores esperados são calculados e armazenados em matrizes (*dicionários*, da linguagem Python) para cada período do horizonte de planejamento e, para as taxas de afretamento TCP e CC, também para cada tamanho de contrato. O valor esperado corresponde à soma do produto entre o valor do parâmetro estocástico e sua probabilidade de ocorrência. Ou seja, o valor esperado corresponde à soma dos valores esperados de cada cenário (vale lembrar que a soma das probabilidades de ocorrência de cada cenário é igual um).

Uma vez que todos os parâmetros foram obtidos e/ou calculados, o módulo de PLI pode ser executado. O modelo matemático corresponde ao modelo determinístico desenvolvido na seção 6.3.1. O pseudocódigo da tradução computacional do modelo é apresentado no quadro a seguir.

Quadro 13: Pseudocódigo do módulo de otimização – Estratégia 1

```

model ← DefineModelo('Chartering_Mix_Est_1')

# Variáveis de decisão
V ← model.adiciona_vars(J, L, vtipo← INTEIRO, nome←"V")
X ← model.adiciona_vars(J, M, vtipo←INTEIRO, nome←"X")
S ← model.adiciona_vars(J, vtipo←INTEIRO, nome←"S")

# Restrições 1: Necessidade mínima de embarcações
model.adiciona_restrições((soma(V[j,l] para j em [1,t] para l em L se
  l>=(max((t-j+1),L[0]))) + soma(X[j,m] para j em [1,t] para m em M
  se m>=(max((t-j+1),M[0]))) + S[t] + U[t] + Q[t]
  >= E_Dem[t] para t em T), nome←"Restricoes_1")

# Restrições 2: Necessidade máxima de embarcações
model.adiciona_restrições((soma(V[j,l] para j em [1,t] para l em L se
  l>=(max((t-j+1),L[0]))) + soma(X[j,m] para j em [1,t] para m em M
  se m>=(max((t-j+1),M[0]))) + S[t] + U[t] + Q[t]
  <= DemMax[t] para t em T), nome←"Restricoes_2")

# Restrições 3: Embarcações totais disponíveis no mercado
model.adiciona_restrições((soma(V[j,l] para l em L) + soma(X[j,m] para
  m em M) + S[j] + U[j] + Q[j]
  <= Ut[j] para j em J), nome←"Restricoes_3")

# Restrições 4: Embarcações disponíveis no mercado para TCP
model.adiciona_restrições((soma(V[j,l] para l em L) + U[j]
  <= Ut[j] para j em J), nome←"Restricoes_4")

# Restrições 5: Embarcações totais disponíveis no mercado para CC
model.adiciona_restrições((soma(X[j,m] para m em M) + Q[j]
  <= Qt[j] para j em J), nome←"Restricoes_5")

# Restrições 6: Embarcações disponíveis no mercado para contratos de
tamanho M de CC
model.adiciona_restrições((X[j,m] <= Qo[j,m] para m em M para j em J),
  nome←"Restricoes_6")

# Função objetivo: Minimização dos custos de afretamento
objetivo ← (soma(E_Tc[j,k]*k*V[j,k] para j em J para k em L) +
  soma(E_Xc[j,m]*m*X[j,m] para j em J para m em M) +
  soma(E_Sc[j]*S[j] para j em J))

model.define_função_objetivo(objetivo, MINIMIZAR)
model.otimize()

```

O módulo de otimização é executado pelo solver Gurobi 8.1.0 (win64, Python). Para a solução de problemas de PLI, o solver primeiro procura encontrar soluções heurísticas, depois resolve o problema com o relaxamento das variáveis inteiras utilizando o método exato SIMPLEX e, por fim, a partir da solução obtida para o problema relaxado, encontra a solução do problema inteiro, utilizando a técnica B&B. As soluções encontradas são comparadas para a definição da solução ótima encontrada (vide Quadro 21, seção 6.5.1).

Depois da execução do módulo de otimização, segue o módulo de pós-processamento, que, neste caso, corresponde à consolidação e preparação dos resultados para apresentação e ao cálculo dos custos de tempo das etapas de pré-processamento, de processamento do módulo de otimização e de pós-processamento.

A apresentação dos resultados obtidos se encontra na seção 6.5 Experimentos.

6.4.3.2 *Modelo determinístico com geração de cenários para os parâmetros estocásticos e combinação heurística dos resultados*

Esta estratégia de solução consiste em simular a ocorrência de amostras (cenários) a partir das funções de probabilidade definidas para as variáveis estocásticas, executar o modelo determinístico de PLI para cada cenário e, depois, combinar heurísticamente, os resultados de cada um.

Utilizando-se as funções de probabilidade definidas para a demanda e para as taxas de afretamento, foram gerados 100 cenários, conforme pode ser visto no pseudocódigo do Quadro 7, apresentado na etapa de geração de cenários. Nesta rotina, o parâmetro *amostra* assume o valor 100.

O parâmetro de demanda do modelo determinístico (*Dem*) é definido a partir da tabela *demanda* gerada pela rotina do Quadro 7. Da mesma forma, os parâmetros das taxas de afretamento (*Tc*, *Xc* e *Sc*) são obtidos a partir da tabela preços.

A etapa seguinte é a execução do módulo de otimização.

Assim como na estratégia 1, o módulo de otimização corresponde ao modelo de PLI determinístico. Nesta estratégia, porém, o módulo é executado para cada cenário, como pode ser visto no pseudocódigo do Quadro 14.

Quadro 14: Pseudocódigo da rotina que executa o modelo de PLI para cada cenário – Estratégia 2

```

importa ModeloDeterministicoCenarios

solFObj ← {}
solV ← {}
solX ← {}
solS ← {}

para n=1 até amostra faça {roda o modelo para cada cenário}
  ModeloDeterministicoCenarios.resolve(solFObj, solV, solX, solS, n, J,
    L, M, T, U, Ut, Q, Qo, Qt, Dem, DemMax, Tc, Xc, Sc)

```

Como pode-se observar no quadro acima, no modelo determinístico foi criada uma função (*resolve*), que recebe os parâmetros que serão utilizados. O Quadro 15 apresenta o pseudocódigo do modelo.

Quadro 15: Pseudocódigo do módulo de otimização – Estratégia 2

```

def resolve(solFObj, solV, solC, solS, n, J, L, M, T, U, Ut, Q, Qo, Qt, Dem,
  DemMax, Tc, Xc, Sc):

  model ← DefineModelo('Chartering_Mix_Est_2')

  # Variáveis de decisão
  V ← model.adiciona_vars(J, L, vtipo←INTEIRO, nome←"V")
  X ← model.adiciona_vars(J, M, vtipo←INTEIRO, nome←"X")
  S ← model.adiciona_vars(J, vtipo←INTEIRO, nome←"S")

  # Restrições 1: Necessidade mínima de embarcações
  model.adiciona_restrições((soma(V[j,l] para j em [1,t] para l em L se
    l>=(max((t-j+1),L[0]))) + soma(X[j,m] para j em [1,t] para m em
    M se m>=(max((t-j+1),M[0]))) + S[t] + U[t] + Q[t]
    >= Dem[n,t] para t em T), nome←"Restricoes_1")

  # Restrições 2: Necessidade máxima de embarcações
  model.adiciona_restrições((soma(V[j,l] para j em [1,t] para l em L se
    l>=(max((t-j+1),L[0]))) + soma(X[j,m] para j em [1,t] para m em
    M se m>=(max((t-j+1),M[0]))) + S[t] + U[t] + Q[t]
    <= DemMax[t] para t em T), nome←"Restricoes_2")

  # Restrições 3: Embarcações totais disponíveis no mercado
  model.adiciona_restrições((soma(V[j,l] para l em L) + soma(X[j,m]
    para m em M) + S[j] + U[j] + Q[j]
    <= Ut[j] para j em J), nome←"Restricoes_3")

```

```

# Restrições 4: Embarcações disponíveis no mercado para TCP
model.adiciona_restrições((soma(V[j,l] para l em L) + U[j]
    <= Ut[j] para j em J), nome←"Restricoes_4")

# Restrições 5: Embarcações totais disponíveis no mercado para CC
model.adiciona_restrições((soma(X[j,m] para m em M) + Q[j]
    <= Qt[j] para j em J), nome←"Restricoes_5")

# Restrições 6: Embarcações disponíveis no mercado para contratos de tamanho M de CC
model.adiciona_restrições((X[j,m] <= Qo[j,m] para m em M para j em J), nome←"Restricoes_6")

# Função objetivo: Minimização dos custos de afretamento
objetivo ← (soma(Tc[n,j,k]*k*V[j,k] para j em J para k em L) +
    soma(Xc[n,j,m]*m*X[j,m] para j em J para m em M) +
    soma(Sc[n,j]*S[j] para j em J))

model.define_função_objetivo(objetivo, MINIMIZAR)
model.otimize()
atualiza_solução()

fim-def

```

O módulo de otimização apresentado no quadro acima é executado para cada cenário, conforme o pseudocódigo do Quadro 14 e os resultados gerados são atualizados e armazenados em matrizes/vetores (solFObj, solV, solX, solS) pela função *atualiza_solução* para serem utilizados no próximo módulo. O Quadro 16 apresenta o pseudocódigo correspondente.

Quadro 16: Pseudocódigo da rotina de atualização da solução – Estratégia 2

```

def atualiza_solução ()
  se model.status = OPTIMAL então
    varV = model.pegar_atributos('x', V)
    varX = model.pegar_atributos('x', X)
    varS = model.pegar_atributos('x', S)
    solFObj ← adiciona({n: model.objVal})
    para j em J faça
      solS ← adiciona({(n,j):varS[j]})
      para m em M faça
        solX ← adiciona({(n,j,m):varX[j,m]})
      para l em L faça
        solV ← adiciona({(n,j,l):varV[j,l]})
    fim-para
  retorna solFObj, solV, solX, solS
se não então
  imprime('Sem solução')

```

fim-se
fim-def

O módulo de pós-processamento começa pela preparação dos parâmetros para a utilização na combinação heurística dos resultados de cada cenário. A heurística consiste em calcular, para cada período (j) do horizonte de planejamento, as médias ponderadas das soluções obtidas para as variáveis de decisão (med_solS , med_solX e med_solV) pelo valor da função objetivo de cada cenário ($solFObj[n]$). Por tratar-se de um problema de minimização, tanto a função objetivo quanto é o somatório das FO's dos cenários são multiplicados por “-1”. Em seguida, a função objetivo é recalculada para a solução única encontrada (fo_sols). O pseudocódigo dessa heurística é apresentado no Quadro 17.

Quadro 17: Pseudocódigo da heurística de combinação – Estratégia 2

```

med_solV ← {}
med_solX ← {}
med_solS ← {}
para j em J faça
    med_solS ← adiciona({j: arredonda(soma(solS[n,j]*(-solFObj[n])
                                     para n=1 até amostra)/(-soma(solFObj[n] para n=1
                                     até amostra))))))
    para m em M faça
        med_solX ← adiciona({(j,m): arredonda(soma(solX[n,j,m]*
            (-solFObj[n]) para n=1 até amostra)/(-soma(solFObj[n]
            para n=1 até amostra))))))
    para l in L faça
        med_solV ← adiciona({(j,l): arredonda(soma(solV[n,j,l]*
            (-solFObj[n]) para n=1 até amostra)/(-soma(solFObj[n]
            para n=1 até amostra))))))
fim-para

f_obj ← lambda x,y,z:
    soma(Tc_m[j,k]*k*x[j,k] para j em J para k em L) +
    soma(Xc_m[j,m]*m*y[j,m] para j em J para m em M) +
    soma(Sc_m[j]*z[j] para j em J)

fo_sols ← f_obj(med_solV,med_solX,med_solS)

```

```

med_solV ← {}
med_solX ← {}
med_solS ← {}

para j em J faça
  med_solS ← adiciona({j: arredonda(soma(solS[n,j]*(-solFObj[n])
    para n=1 até amostra)/(-soma(solFObj[n] para n=1
    até amostra))))))

  para m em M faça
    med_solX ← adiciona({(j,m): arredonda(soma(solX[n,j,m]*
      (-solFObj[n]) para n=1 até amostra)/(-soma(solFObj[n]
      para n=1 até amostra))))))

  fim-para
  para l in L faça
    med_solV ← adiciona({(j,l): arredonda(soma(solV[n,j,l]*
      (-solFObj[n]) para n=1 até amostra)/(-soma(solFObj[n]
      para n=1 até amostra))))))

  fim-para
  f_obj ← lambda x,y,z:
    soma(Tc_m[j,k]*k*x[j,k] para j em J para k em L) +
    soma(Xc_m[j,m]*m*y[j,m] para j em J para m em M) +
    soma(Sc_m[j]*z[j] para j em J)

fo_sols ← f_obj(med_solV,med_solX,med_solS)

```

As restrições também são reavaliadas. A viabilidade da solução é apresentada graficamente plotando-se para cada período de análise as demandas, as embarcações já existentes e as novas embarcações sugeridas pela solução. A apresentação dos resultados se encontra na seção de experimentos.

6.4.3.3 Modelo estocástico

Nesta estratégia, o modelo de programação linear estocástica (PLE) em dois estágios é executado para os 81 cenários estocásticos gerados (vide 6.4.2).

Conforme explicado na seção 5.3.2, a programação estocástica é a abordagem mais adequada para resolver problemas de otimização cujas incertezas são relevantes para a tomada de decisão. O diferencial desta técnica consiste em considerar intrinsecamente as incertezas no modelo matemático.

No caso específico do problema de mix afretamento proposto, a dificuldade está na modelagem matemática adequada para as técnicas de solução da programação estocástica. A técnica escolhida foi a PLE em dois estágios e o modelo matemático do problema corresponde às equações (11) a (19) desenvolvidas na etapa de modelagem matemática.

O módulo de pré-processamento compreende: a preparação dos parâmetros determinísticos, de forma análoga às apresentadas nas estratégias de solução anteriores; e a geração dos cenários estocásticos, também abordada anteriormente em etapa específica (vide Quadros 8 e 9). O módulo de execução do modelo de PLE em dois estágios é detalhado no pseudocódigo apresentado no Quadro 18.

Diferentemente da estratégia anterior, este módulo de otimização é chamado uma única vez no programa principal. Isto porque, na programação estocástica, conforme já explicado, os cenários estocásticos compõem o modelo matemático.

Como visto na etapa de modelagem matemática, as incertezas do problema são representadas pelos cenários estocásticos (w). Desta forma, observa-se, tanto na função objetivo quanto nas restrições, que os parâmetros estocásticos (demanda e taxas de afretamento) são dependentes de w . Além disso, a variável de decisão do número de embarcações afretadas no mercado *spot* ($S[w, t]$), que foi definida como um *recurso de segundo estágio*, também depende de w . Na prática, significa que os contatos *spot* são utilizados como um recurso corretivo após a realização das incertezas.

Como no modelo da estratégia 2, os resultados gerados são atualizados e armazenados no formato de dicionário (solFObj, solV, solX, solS) pela função *atualiza_solução* para serem utilizados no próximo módulo.

No módulo de pós-processamento, os resultados são preparados para fins de comparação e apresentação dos resultados. Como a solução gerada pelo modelo apresenta, para os contratos *spot*, valores para cada cenário w , calcula-se os valores esperados dos contratos *spot*. Vide pseudocódigo no Quadro 19.

Quadro 18: Pseudocódigo do módulo de otimização – Estratégia 3

```

def resolve(solFObj, solV, solX, solS, alpha, J, L, M, T, W, U, Ut, Q, Qo, Qt,
  Dem, DemMax, Tc, Xc, Sc):

  model ← DefineModelo('Chartering_Mix_Est_3')

  # Variáveis de decisão
  V ← model.adiciona_vars(J, L, vtipo←INTEIRO, nome←"V")
  X ← model.adiciona_vars(J, M, vtipo←INTEIRO, nome←"X")
  S ← model.adiciona_vars(W, T, vtipo←INTEIRO, nome←"S")

  # Restrições 1: Necessidade mínima de embarcações
  model.adiciona_restricoes((soma(V[j,l] para j em [1,t] para l em L se
    l>=(max((t-j+1),L[0]))) + soma(X[j,m] para j em [1,t] para m em M se
    m>=(max((t-j+1),M[0]))) + S[w,t] + U[t] + Q[t] >= Dem[w,t] para t em
    T para w em W), nome←"Restricoes_1")

  # Restrições 2: Necessidade máxima de embarcações
  model.adiciona_restricoes((soma(V[j,l] para j em [1,t] para l em L se
    l>=(max((t-j+1),L[0]))) + soma(X[j,m] para j em [1,t] para m em M
    se m>=(max((t-j+1),M[0]))) + S[w,t] + U[t] + Q[t]
    <= DemMax[t] para t em T para w em W), nome←"Restricoes_2")

  # Restrições 3: Embarcações totais disponíveis no mercado
  model.adiciona_restricoes((soma(V[j,l] para l em L) + soma(X[j,m] para m
    em M) + S[w,j] + U[j] + Q[j]
    <= Ut[j] para j em J para w em W), nome←"Restricoes_3")

  # Restrições 4: Embarcações disponíveis no mercado para TCP
  model.adiciona_restricoes((soma(V[j,l] para l em L) + U[j]
    <= Ut[j] para j em J), nome←"Restricoes_4")

  # Restrições 5: Embarcações totais disponíveis no mercado para CC
  model.adiciona_restricoes((soma(X[j,m] para m em M) + Q[j]
    <= Qt[j] para j em J), nome←"Restricoes_5")

  # Restrições 6: Embarcações disponíveis no mercado para contratos de
  tamanho M de CC
  model.adiciona_restricoes((X[j,m] <= Qo[j,m] para m em M para j em J),
    nome←"Restricoes_6")

  # Função objetivo: Minimização dos custos de afretamento
  objetivo ← soma(alpha[w]*(soma(Tc[w,j,k]*k*V[j,k] para j em J para k em L) +
    soma(Xc[w,j,m]*m*X[j,m] para j em J para m em M) +
    soma(Sc[w,j]*S[w,j] para j em J)) para w em W)

  model.define_função_objetivo(objetivo, MINIMIZAR)
  model.otimize()
  atualiza_solução()

fim-def

```

Quadro 19: Pseudocódigo da rotina de cálculo dos valores esperados da solução obtida para os contratos *spot* – Estratégia 2

```

{Cálculo do valor esperado de solS}

E_solS ← {}
para j in J faça
  E_solS ← adiciona({j: soma(alpha[w]*solS[w,j] para w em W)})

{Cria tabela visando exportação dos resultado}

Dataframe_m_solS ← gera_tabela(colunas: ['j', 'Qtde'])
para j in J faça
  Dataframe_m_solS ← adiciona({'j':j,'Qtde': arredonda(E_solS[j])})

```

6.4.4 Análise de valor

Nesta seção, são calculados os indicadores de valor apresentados no quinto capítulo, conceitos que tem por objetivo avaliar o valor da informação e o valor da solução estocástica.

6.4.4.1 Valor Esperado da Informação Perfeita

O valor esperado da informação perfeita (EVPI) representa o quão longe se está da informação perfeita ao não considerar as incertezas na modelagem matemática do problema. É calculado pela diferença entre o valor da solução estocástica, também chamada de problema de recurso (RP), e o valor esperado das soluções determinísticas de cada cenário do modelo estocástico (WS). Vide seção 5.4.1.

Na solução “espere e veja” (WS), o modelo determinístico é rodado para cada cenário estocástico; em seguida, calcula-se o valor esperado para a FO de cada cenário; e, por fim, soma-se os valores esperados de cada cenário para se obter o valor esperado da solução WS. Os valores esperados calculados para os cenários são exportados para uma planilha para apresentação dos resultados. O pseudocódigo da rotina que executa este processo é mostrado a seguir.

Quadro 20: Pseudocódigo da rotina de obtenção da solução “espere e veja” (WS)

```

{Importa e executa módulo de otimização determinística}

importa ModeloDeterministicoCenarios

solFObj ← {}

```

```

solV ← {}
solX ← {}
solS ← {}

para n=1 até amostra faça {roda o modelo para cada cenário}
  ModeloDeterministicoCenarios.resolve(solFObj, solV, solX, solS, n, J,
    L, M, T, U, Ut, Q, Qo, Qt, Dem, DemMax, Tc, Xc, Sc)

  {Calcula valor esperado e cria tabela visando exportação dos resultado}

  Dataframe_E_solFObj_w ← gera_tabela(colunas: ['Cen','Valor esperado'])
  para n in W faça
    Dataframe_E_solFObj ← adiciona({'Cen': n, 'Valor esperado':
      solFObj_w[n]*alpha[n] })

```

Nesta rotina, como mostrado anteriormente, W é o conjunto dos cenários estocásticos e $alpha$ é o vetor que contém as probabilidades de ocorrência de cada cenário.

O valor da otimização estocástica (RP) é obtido na terceira estratégia de solução.

6.4.4.2 Valor da Solução Estocástica

O valor da solução estocástica (VSS) representa o quanto de otimalidade está sendo perdida ao se desprezar a incerteza na modelagem matemática do problema. É calculado pela diferença, em valores absolutos, entre o resultado esperado da solução obtida a partir dos valores esperados dos parâmetros estocásticos (EEV) e a solução estocástica (RP). Vide seção 5.4.2.

O EEV corresponde à solução da primeira estratégia de solução e o RP, à solução da terceira estratégia.

6.5 EXPERIMENTOS

Nesta seção, são descritos e analisados os experimentos realizados com os modelos computacionais de otimização desenvolvidos para as três estratégias de solução adotadas. Os experimentos foram realizados conforme o método de solução apresentado nas seções anteriores. Os parâmetros de entrada dos modelos seguem o que foi definido na seção de análise de dados.

O relato dos experimentos e dos resultados obtidos em cada estratégia de otimização contém:

- Uma breve descrição do experimento;
- O tempo de processamento de cada módulo do modelo e o tempo total;
- Um quadro com o resumo da solução, gerado ao final do processo de otimização pelo solver;
- Um quadro da solução obtida, contendo: o número de contratos a serem adquiridos ao longo do período de análise por tipo, tamanho e início de vigência, o total de contratos e o custo total desses contratos (função objetivo);
- Um gráfico com a evolução das demandas mínima, de referência e máxima, das embarcações já contratadas e das embarcações a serem contratadas ao longo de período de análise;
- Comentários e análises dos resultados.

A descrição da legenda utilizada nos gráficos de evolução das demandas e contratos ao longo do tempo está na tabela abaixo:

U	Embarcações já existentes na empresa sob contratos TCP
Q	Embarcações já existentes na empresa sob contratos CC
1	Embarcações sugeridas pela solução sob contratos Spot (vigência de um mês)
2	Embarcações sugeridas pela solução sob contratos CC com 2 meses de vigência
3	Embarcações sugeridas pela solução sob contratos CC com 3 meses de vigência
6	Embarcações sugeridas pela solução sob contratos CC com 6 meses de vigência
12	Embarcações sugeridas pela solução sob contratos TCP com 12 meses de vigência
24	Embarcações sugeridas pela solução sob contratos TCP com 24 meses de vigência
36	Embarcações sugeridas pela solução sob contratos TCP com 36 meses de vigência
48	Embarcações sugeridas pela solução sob contratos TCP com 48 meses de vigência
Dem. Min.	Demanda mínima
Dem. Ref.	Demanda de referência
Dem. Max.	Demanda máxima

Os módulos de pré-processamento e de pós-processamento dos modelos foram desenvolvidos em Python 3.6.4 e o módulo de otimização com o solver Gurobi 8.1.0 (win64, Python). Os modelos foram executados em um computador com as seguintes características: processador Intel Core i5-4210U @ 1,70 GHz / 2,40 GHz, memória RAM de 8 GB e sistema operacional Windows 10 de 64 bits.

6.5.1 Modelo determinístico com valores esperados dos parâmetros estocásticos

Nesta primeira estratégia de solução, o modelo determinístico de PLI é rodado com os valores esperados das variáveis estocásticas. O modelo foi executado com sucesso, obtendo-se solução exata para o problema. Os tempos de processamento foram os seguintes: módulo de pré-processamento: 63,00 s; módulo de otimização: 74,53 s; módulo de pós-processamento: 0,06 s; tempo total: 137,59 s.

O Quadro 21 contém o resumo da solução gerada pelo otimizador.

Quadro 21: Resultados gerados pelo solver Gurobi – Estratégia 1

```

Optimize a model with 384 rows, 384 columns and 9298 nonzeros
Variable types: 0 continuous, 384 integer (0 binary)
Coefficient statistics:
  Matrix range      [1e+00, 1e+00]
  Objective range   [6e+05, 2e+07]
  Bounds range      [0e+00, 0e+00]
  RHS range         [8e+00, 1e+02]
Found heuristic solution: objective 1.256283e+09
Presolve removed 266 rows and 81 columns
Presolve time: 0.02s
Presolved: 118 rows, 303 columns, 6364 nonzeros
Found heuristic solution: objective 8.818748e+08
Variable types: 0 continuous, 303 integer (0 binary)

Root relaxation: objective 7.161944e+08, 65 iterations, 0.00 seconds

   Nodes      |   Current Node   |   Objective Bounds      |   Work
 Expl Unexpl |  Obj  Depth IntInf | Incumbent    BestBd   Gap   | It/Node Time
*    0       0                0   7.161944e+08 7.1619e+08  0.00%   -    0s

Explored 0 nodes (65 simplex iterations) in 0.05 seconds
Thread count was 4 (of 4 available processors)

Solution count 3: 7.16194e+08 8.81875e+08 8.93111e+08

Optimal solution found (tolerance 1.00e-04)
Best objective 7.161944000000e+08, best bound 7.161944000000e+08, gap 0.0000%

```

Como é possível observar no quadro acima, o problema de minimização do custo de afretamento apresenta 384 linhas (equações/inequações), 384 colunas (variáveis inteiras) e 9.298 não-zeros. Primeiramente, o solver encontrou uma solução heurística, cujo valor da função objetivo (FO) foi de US\$ 1.256.283.000. Em seguida, depois de simplificar o problema, eliminando linhas e colunas desnecessárias, também utilizando uma solução heurística, obteve

o valor de \$ 881.874.800 para a FO, melhorando o resultado. No passo seguinte, foi utilizado um método exato de solução, o SIMPLEX. Fazendo o relaxamento do problema, o SIMPLEX foi executado desconsiderando a restrição de variáveis inteiras. O resultado obtido foi de US\$ 716.194.400. Por fim, verificou-se, pelo método do *B&B*, que a solução encontrada também resolve o problema sem o relaxamento. Portanto, a solução ótima foi de US\$ 716.194.400, com tolerância de 10^{-4} .

A solução detalhada do problema foi consolidada e exportada para o Excel. Os resultados obtidos se encontram no Quadro 22.

Quadro 22: Solução ótima obtida – Estratégia 1

Contratos TCP | var. V			Contratos CC | var. X		
j	L	Qtde	j	M	Qtde
1	24	17	1	3	21
1	48	17	2	3	4
2	12	6	3	3	2
3	12	3	3	6	4
5	12	2	4	2	14
7	12	7	10	2	6
8	12	2	10	6	9
Total		54	15	2	3
Contratos Spot | var. S			15	3	10
j	Qtde		25	3	2
8	1		25	6	8
10	2		26	3	8
13	6		27	2	3
16	5		43	6	3
21	4		44	3	4
23	2		46	3	10
25	5		47	2	7
32	6		Total		118
41	2		Total de contratos 220		
44	5		Custo total | F. Obj.		
48	10		\$ 716.194.400,00		
Total		48			

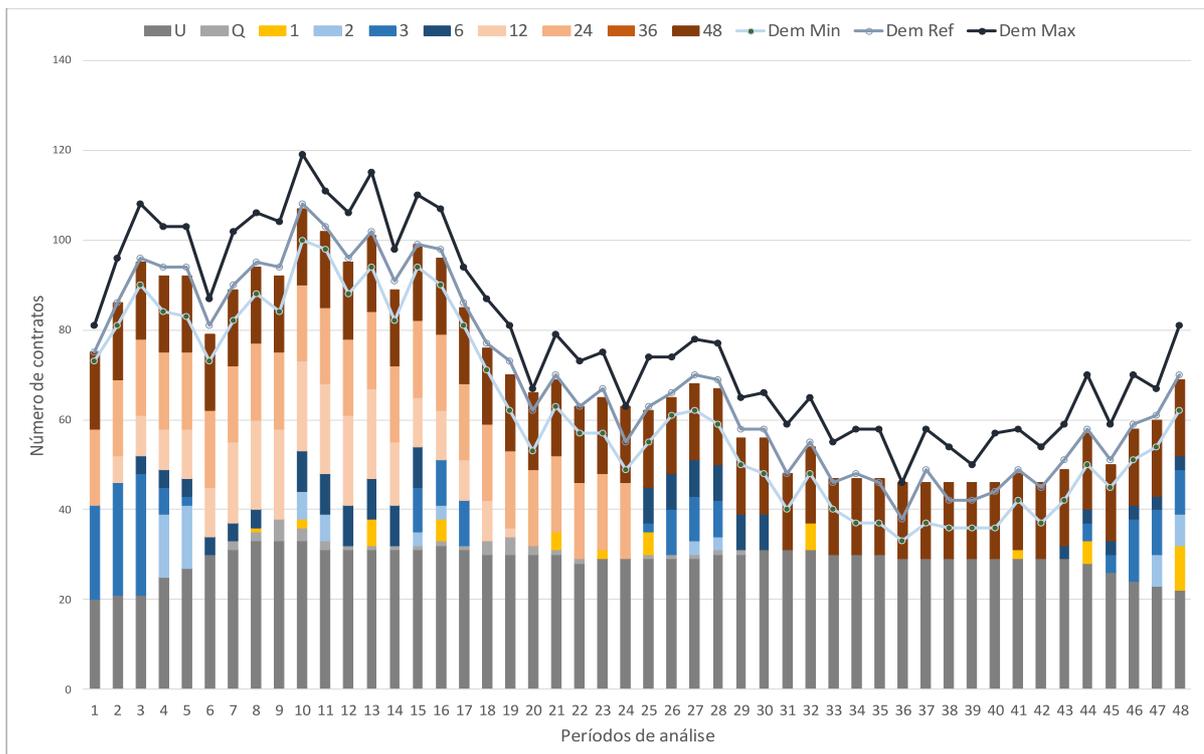
A solução do problema sugere o afretamento de 220 embarcações para atender à demanda prevista no decorrer dos 48 meses que compõem o período de planejamento. A distribuição dos contratos de afretamento por tipo (tabelas TCP, CC ou *Spot*), início de vigência

do contrato (coluna j) e tamanho do contrato (colunas L ou M , ou 1 mês no *Spot*) é observada neste quadro.

A aquisição da maior quantidade de contratos aconteceria no primeiro mês: 17 contratos TCP de 24 meses de vigência; 17 TCP de 48 meses; e 21 CC de 3 meses; totalizando 55 embarcações contratadas. A segunda maior seria no décimo mês: 6 CC de 2 meses; 9 CC de 6 meses; e 2 Spot; totalizado 17 contratos. E a terceira maior, no quarto mês: 14 contratos CC de 2 meses. Já a modalidade com o maior número de contratos seria a modalidade por chamada (118).

O Gráfico 11 mostra a evolução das demandas e de todos os contratos vigentes ao longo do período de análise: os contratos já existentes na empresa e os sugeridos pela solução do problema.

Gráfico 11: Evolução da demanda e das embarcações vigentes no tempo – Estratégia 1



No gráfico, é possível perceber que a demanda mínima por embarcação, demanda certa de acontecer (vide seção 6.2.2.1), é atendida em todos os períodos do horizonte de análise. O mesmo acontece para a restrição que limita a quantidade de contratos vigentes em um determinado período à demanda máxima.

A demanda a ser atendida (vide equação (10) do modelo determinístico) corresponde ao valor esperado da demanda (soma dos valores esperados da demanda mínima, de referência e máxima). Por isso, percebe-se que o atendimento desta demanda fica próxima, mas não coincide com a demanda de referência. Isto se deve às probabilidades consideradas.

6.5.2 Modelo determinístico com geração de cenários para os parâmetros estocásticos e combinação heurística dos resultados

Na segunda estratégia de solução, o modelo determinístico de PLI é rodado para 100 cenários, para os quais os valores de demanda e das taxas de afretamento são gerados por funções de distribuição de probabilidade. Em seguida, calcula-se as médias ponderadas dos resultados obtidos para as variáveis de decisão em cada cenário pelos respectivos valores das funções objetivo. A solução do problema é obtida, arredondando-se os valores encontrados para os inteiros mais próximos. O custo total de afretamento (FO) é recalculado para a solução e as restrições também são verificadas.

O modelo foi executado com sucesso, obtendo-se a solução por método exato. Os tempos de processamento foram os seguintes:

- Módulo de pré-processamento:
 - Parâmetros determinísticos: 6,67 s,
 - Parâmetros estocásticos: 157,24 s,
 - Pré-processamento total: 163,91 s;
- Módulo de otimização: 73,75 s;
- Módulo de pós-processamento:
 - Combinação heurística: 0,27 s
 - Verifica e prepara solução: 0,86 s
 - Pós-processamento total: 1,13 s
- Tempo total: 238,79 s.

O Quadro 23 apresenta partes do arquivo de log gerado pelo solver. São mostrados os resumos dos resultados dos cenários 1, 2 e 100. O problema de otimização de cada cenário é semelhante ao problema de otimização da primeira estratégia: possuem 384 linhas, 384 colunas e 9.298 não-zeros. As diferenças estão nos coeficientes da FO e nos coeficientes e limites das restrições. As etapas para se chegar à solução ótima também são as mesmas: (1) encontra uma

solução heurística; (2) simplifica o problema, eliminando linhas e colunas desnecessárias; (3) encontra uma nova solução heurística; (4) utilizando o SIMPLEX, encontra uma solução exata para o problema relaxado; (5) a partir desta solução, utilizando o método B&B, busca a solução para o problema inteiro.

Quadro 23: Resultados gerados pelo solver Gurobi – Estratégia 2

```
Gurobi 8.1.0 (win64, Python) logging started 11/02/19 14:00:54

Academic license - for non-commercial use only
#1
Optimize a model with 384 rows, 384 columns and 9298 nonzeros
Variable types: 0 continuous, 384 integer (0 binary)
Coefficient statistics:
  Matrix range      [1e+00, 1e+00]
  Objective range   [6e+05, 2e+07]
  Bounds range      [0e+00, 0e+00]
  RHS range         [9e+00, 1e+02]
Found heuristic solution: objective 1.305125e+09
Presolve removed 266 rows and 81 columns
Presolve time: 0.00s
Presolved: 118 rows, 303 columns, 6364 nonzeros
Found heuristic solution: objective 9.361114e+08
Variable types: 0 continuous, 303 integer (0 binary)

Root relaxation: objective 6.992148e+08, 69 iterations, 0.00 seconds

   Nodes    |   Current Node    |   Objective Bounds      |   Work
 Expl Unexpl |  Obj  Depth IntInf | Incumbent    BestBd  Gap   | It/Node Time
*    0     0             0   6.992148e+08 6.9921e+08  0.00%   -    0s

Explored 0 nodes (69 simplex iterations) in 0.05 seconds
Thread count was 4 (of 4 available processors)

Solution count 3: 6.99215e+08 9.36111e+08 9.46402e+08

Optimal solution found (tolerance 1.00e-04)
Best objective 6.992147747126e+08, best bound 6.992147747126e+08, gap 0.0000%
#2
Optimize a model with 384 rows, 384 columns and 9298 nonzeros
Variable types: 0 continuous, 384 integer (0 binary)
Coefficient statistics:

Explored 0 nodes (73 simplex iterations) in 0.05 seconds
```

```

Thread count was 4 (of 4 available processors)
...
Solution count 3: 7.33399e+08 9.06299e+08 9.0925e+08

Optimal solution found (tolerance 1.00e-04)
Best objective 7.333989754484e+08, best bound 7.333989754484e+08, gap 0.0000%
...
#100
Optimize a model with 384 rows, 384 columns and 9298 nonzeros
Variable types: 0 continuous, 384 integer (0 binary)
Coefficient statistics:
  Matrix range      [1e+00, 1e+00]
  Objective range   [5e+05, 2e+07]
  Bounds range      [0e+00, 0e+00]
  RHS range         [9e+00, 1e+02]
Presolve removed 266 rows and 81 columns
Presolve time: 0.00s
Presolved: 118 rows, 303 columns, 6364 nonzeros
Variable types: 0 continuous, 303 integer (0 binary)
Found heuristic solution: objective 1.042052e+09

Root relaxation: objective 7.099402e+08, 60 iterations, 0.00 seconds

   Nodes   |   Current Node   |   Objective Bounds   |   Work
Expl Unexpl | Obj Depth IntInf | Incumbent BestBd Gap | It/Node Time
*    0     0                0   7.099402e+08 7.0994e+08 0.00%   -   0s

Explored 0 nodes (60 simplex iterations) in 0.05 seconds
Thread count was 4 (of 4 available processors)

Solution count 2: 7.0994e+08 1.04205e+09

Optimal solution found (tolerance 1.00e-04)
Best objective 7.099401713945e+08, best bound 7.099401713945e+08, gap 0.0000%

```

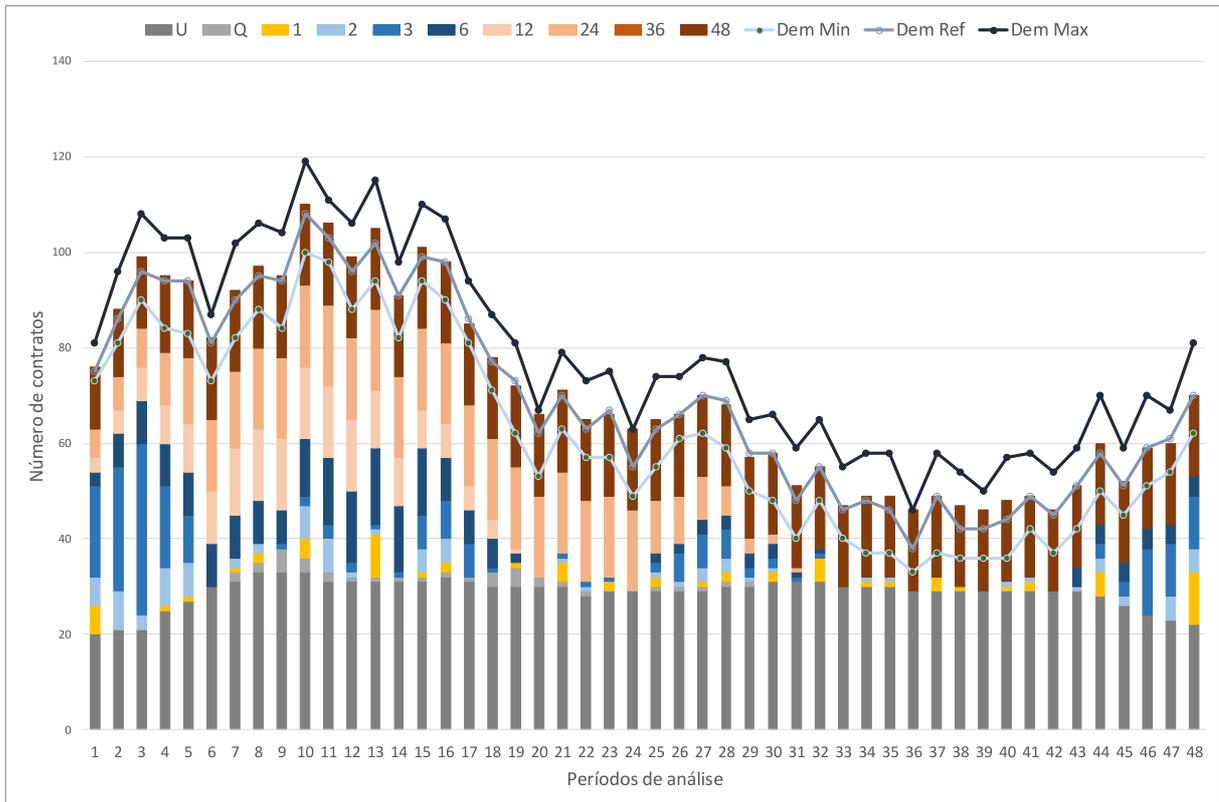
A solução encontrada após a combinação heurística dos resultados dos cenários é apresentada no Quadro 24.

Quadro 24: Solução ótima obtida – Estratégia 2

Contratos TCP | var. V			Contratos Spot | var. S		Contratos CC | var. X					
j	L	Qtde	j	Qtde	j	M	Qtde	j	M	Qtde
1	12	3	1	6	1	2	6	15	2	5
1	24	6	4	1	1	3	19	15	3	6
1	48	13	5	1	1	6	3	16	3	1
2	12	2	7	1	2	2	2	21	2	1
2	24	1	8	2	2	3	7	21	3	1
2	48	1	10	4	2	6	4	25	2	1
3	12	2	13	9	3	2	1	25	3	2
3	24	1	15	1	3	3	10	25	6	2
3	48	1	16	2	3	6	2	26	3	4
4	12	1	19	1	4	2	7	27	2	3
4	24	3	21	4	7	2	2	27	3	1
4	48	1	23	2	7	6	3	27	6	1
5	12	2	25	2	8	6	4	28	3	1
5	24	3	27	1	9	3	1	29	2	1
6	12	1	28	2	10	2	7	30	3	1
6	24	1	30	2	10	3	1	34	2	1
6	48	1	32	5	10	6	5	40	2	1
7	12	3	34	1	11	3	1	43	2	1
7	24	1	35	1	11	6	2	43	6	4
8	12	1	37	3	12	2	1	44	2	2
8	24	1	38	1	12	6	1	44	3	3
Total		49	40	1	13	6	4	46	3	11
			41	2	14	3	1	47	2	5
			44	5	14	6	2	Total		155
Custo total | F. Obj.			48	11						
\$ 758.795.875,97			Total	71	Total de contratos		275			

A quantidade total de embarcações contratadas sugeridas pela solução é 275, ao custo de US\$ 758.795.875,97. Como na primeira estratégia, o período com a maior quantidade de contratos foi o primeiro: TCP: 22, CC:28 e Spot: 6, totalizando 56. A modalidade mais utilizada foi a contratação por chamada: 155 contratos.

Esta estratégia de solução não apresenta garantia de que todas as restrições serão respeitadas. Mas, no experimento realizado, como pode ser observado no Gráfico 12, a solução obtida para este conjunto de cenários teve todas as restrições respeitadas em todos os períodos de análise.

Gráfico 12: Evolução da demanda e das embarcações vigentes no tempo – Estratégia 2

6.5.3 Modelo estocástico

A terceira abordagem de solução avaliada é a Otimização Estocástica, ou mais especificamente, a Programação Linear Estocástica de dois estágios, com variáveis inteiras. Nesta técnica, as incertezas são representadas no modelo estocástico por meio dos cenários estocásticos, que possuem probabilidades de ocorrência.

O modelo foi executado com sucesso, obtendo-se a solução por método exato. Os tempos de processamento foram os seguintes:

- Módulo de pré-processamento:
 - Parâmetros determinísticos: 6,63 s,
 - Parâmetros estocásticos: 63,68 s,
 - Pré-processamento total: 70,31 s;
- Módulo de otimização: 226,22 s;
- Módulo de pós-processamento:
 - Combinação heurística das variáveis $S[w, t]$: 0,27 s
 - Verifica e prepara solução: 0,69 s
 - Pós-processamento total: 0,96 s

- Tempo total: 297,49 s.

O resumo dos resultados gerados pelo solver se encontram no Quadro 25.

Quadro 25: Resultados gerados pelo solver Gurobi – Estratégia 3

```

Optimize a model with 11904 rows, 4224 columns and 714738 nonzeros
Variable types: 0 continuous, 4224 integer (0 binary)
Coefficient statistics:
  Matrix range      [1e+00, 1e+00]
  Objective range   [5e+02, 2e+07]
  Bounds range     [0e+00, 0e+00]
  RHS range        [4e+00, 1e+02]
Presolve removed 5867 rows and 1300 columns
Presolve time: 1.53s
Presolved: 6037 rows, 2924 columns, 21863 nonzeros
Variable types: 0 continuous, 2924 integer (0 binary)
Found heuristic solution: objective 1.525959e+09

Root relaxation: objective 7.775550e+08, 1781 iterations, 0.03 seconds

   Nodes      |   Current Node   |   Objective Bounds      |   Work
 Expl Unexpl |  Obj  Depth IntInf | Incumbent    BestBd   Gap | It/Node Time
*    0       0                0   7.775550e+08 7.7756e+08  0.00%   -    1s

Explored 0 nodes (1781 simplex iterations) in 1.69 seconds
Thread count was 4 (of 4 available processors)

Solution count 2: 7.77555e+08 1.52596e+09
No other solutions better than 7.77555e+08

Optimal solution found (tolerance 1.00e-04)
Best objective 7.775550329639e+08, best bound 7.775550329639e+08, gap 0.0000%

```

O quadro mostra que este problema de otimização possui 11.904 linhas (equações/inequações), 4.224 colunas (variáveis inteiras) e 714.738 não-zeros. O solver começou por simplificar o problema, removendo linhas e colunas. Depois, conseguiu uma solução heurística para o problema reduzido: US\$ 1.525.959.000. Em seguida, obteve uma solução para o problema relaxado, utilizando o SIMPLEX: US\$ 777.555.000. E, por fim, partindo desta solução, encontrou a solução ótima para o problema inteiro: US\$ 777.555.033.

Nesta modelagem do problema, os contratos *Spot*, variável de decisão *S*, foram utilizados como recursos de segundo estágio, ou seja, a solução do problema apresenta para esta variável valores distintos por cenário estocástico. A Tabela 7 apresenta um extrato dos valores

(diferentes de zero) obtidos para cada cenário e suas respectivas probabilidades de ocorrência. A tabela apresenta também o período de realização do afretamento (t).

Tabela 7: Extrato dos valores das vars. de decisão S por cenário – Estratégia 3

Registro	Cen	Prob	Mês	Qtde	Registro	Cen	Prob	Mês	Qtde
15	1	0,027	16	3	1917	40	0,00945	46	8
24	1	0,027	25	2	1918	40	0,00945	47	7
43	1	0,027	44	3	1919	40	0,00945	48	17
47	1	0,027	48	9	1920	41	0,0189	1	2
63	2	0,054	16	3	1921	41	0,0189	2	5
72	2	0,054	25	2	1922	41	0,0189	3	6
91	2	0,054	44	3	1923	41	0,0189	4	10
95	2	0,054	48	9	...	...	...	...	...
111	3	0,009	16	3	3881	81	0,0012	42	8
120	3	0,009	25	2	3882	81	0,0012	43	11
139	3	0,009	44	3	3883	81	0,0012	44	23
143	3	0,009	48	9	3884	81	0,0012	45	14
...	...	...	...	...	3885	81	0,0012	46	19
1915	40	0,00945	44	11	3886	81	0,0012	47	13
1916	40	0,00945	45	6	3887	81	0,0012	48	28

Visando à apresentação e a análise comparativa dos resultados com as outras estratégias de solução, os valores de S , condicionados às probabilidades de ocorrência dos cenários, apresentados na tabela acima, podem ser representados por seus valores esperados, que são definidos como a soma dos valores esperados em cada cenário.

A solução completa do problema, considerando os valores esperados de $S[j]$, se encontra no Quadro 26.

A quantidade total de contratos sugeridos pela solução é 392, ao custo de US\$ 777.555.033,96. Como na primeira e na segunda estratégia, o período com a maior quantidade de contratos foi o primeiro: TCP: 34, CC: 19 e *Spot*: 3, totalizando 56. A modalidade mais utilizada foi a contratação no mercado *Spot*: 262 contratos.

O grande número de contratos *Spot* é devido à utilização dos valores esperados. Porém, vale lembrar que esses contratos são recursos corretivos, sendo utilizados apenas após a ocorrência da incerteza.

em diversos dos 48 meses do plano de afretamento. Mas há incertezas associadas e esta é justamente a função do recurso de segundo estágio: ser utilizado quando necessário.

A demanda que, certamente, deixaria de ser atendida em alguns períodos é a demanda mínima, considerada como certa. Ela não seria atendida nos meses: 16 (3 embarcações), 25 (2 embarcações), 44 (3 embarcações) e 48 (9 embarcações). Portanto, esses custos deverão ser incorridos no seu devido tempo.

Gráfico 13: Evolução da demanda e das embarcações vigentes no tempo – Estratégia 3

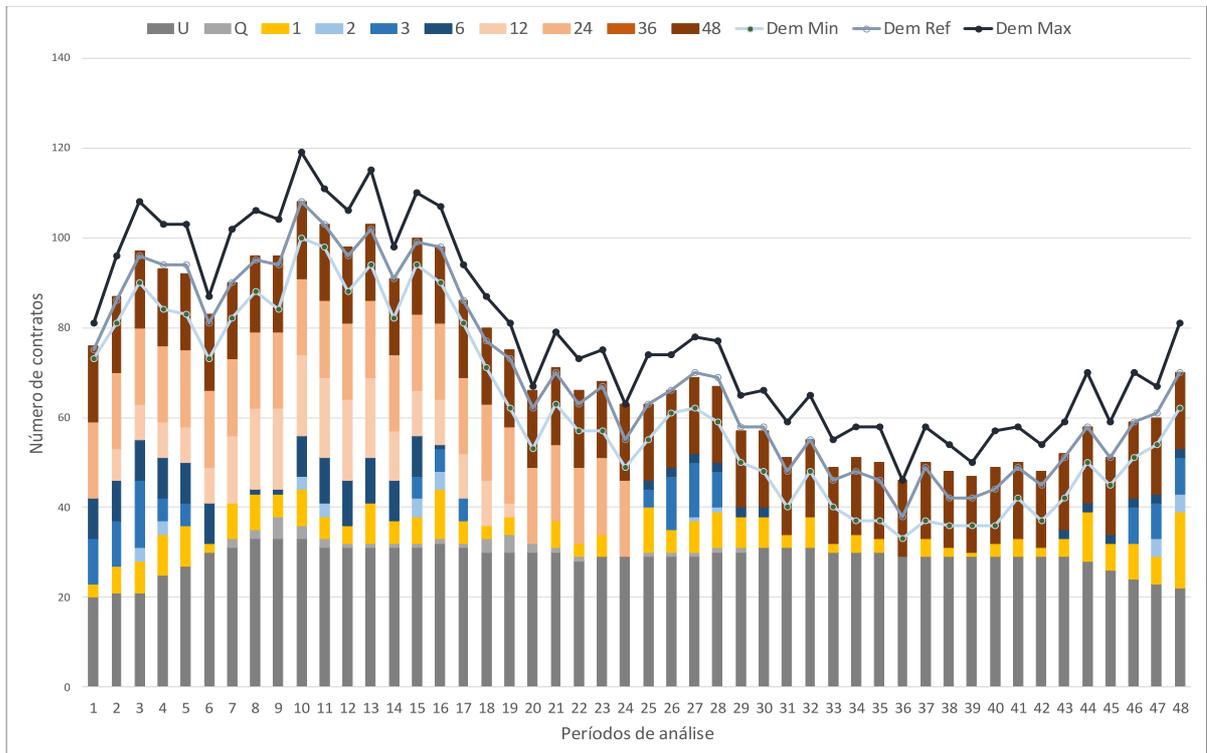
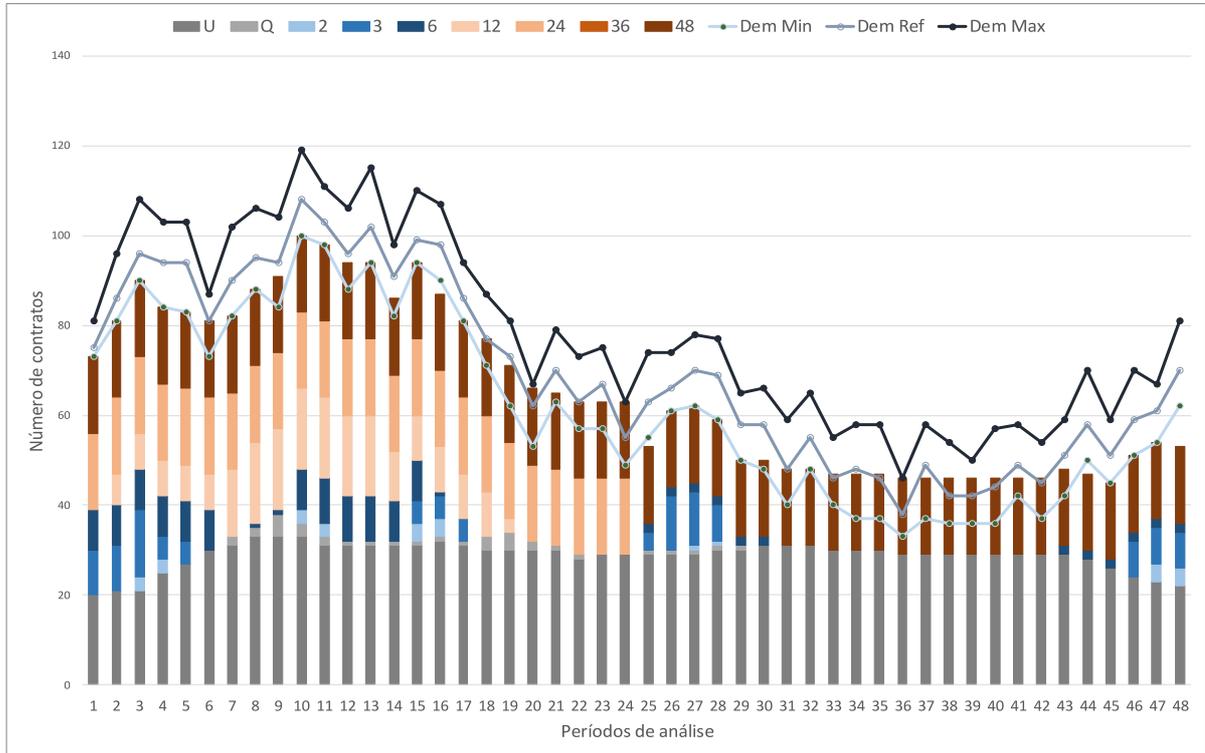


Gráfico 14: Evolução da demanda e das embarcações (sem contratos *Spot*) – Estratégia 3

6.5.4 Análise de valor

Nesta seção, os resultados dos experimentos são avaliados a partir dos indicadores de valor da informação e da solução estocástica.

6.5.4.1 Valor Esperado da Informação Perfeita

O valor esperado da informação perfeita (EVPI) é calculado pela diferença entre o valor da solução estocástica, também chamada de problema de recurso (RP), e o valor esperado das soluções determinísticas de cada cenário do modelo estocástico (WS). O valor do RP, obtido na solução estocástica (terceira estratégia de solução) é de US\$ \$777.555.032,96 e o valor de WS é de US\$ \$718.949.358,65 (vide Tabela 8). O valor do EVPI, portanto, é de US\$ 58.605.675,31 (vide cálculo na Tabela 9).

Tabela 8: Esperança das soluções (FO) obtidas para cada cenário estocástico

Cen	Valor esperado
1	16.972.252,57
2	32.736.678,13
3	4.992.264,44
...	...
79	2.951.748,99
80	5.867.098,53
81	970.564,26
<hr/>	
Esp.	\$ 718.949.358,65

Tabela 9: Cálculo do EVPI

$EVPI = |RP - WS|$
$EVPI = |777.555.033,96 - 718.949.358,65|$
$EVPI = \$ 58.605.675,31$

O EVPI representa o quão longe se está da informação perfeita ao não considerar as incertezas na modelagem matemática do problema. Em outras palavras, no problema em questão, o tomador de decisão estaria disposto a arcar com um custo em torno de US\$ 58,6 milhões (considerando que as premissas adotadas sejam verdadeiras) pela informação precisa.

6.5.4.2 Valor da Solução Estocástica

O valor da solução estocástica (VSS) é calculado pela diferença, em valores absolutos, entre o resultado esperado da solução obtida a partir dos valores esperados dos parâmetros estocásticos (EEV) e a solução estocástica (RP). O valor de EEV, que corresponde ao valor da solução obtida na primeira estratégia de solução, é de US\$ 716.194.400. Portanto, o valor de VSS é de US\$ 61.360.633,96 (vide cálculo na Tabela 10).

Tabela 10: Cálculo do VSS

$VSS = |EEV - RP|$
$VSS = |716.194.400,00 - 777.555.033,96|$
$VSS = \$ 61.360.633,96$

O VSS representa o quanto de otimalidade está sendo perdida ao se desprezar a incerteza na modelagem matemática do problema. Neste problema específico, o custo de ignorar a incerteza na tomada de decisão seria de US\$ 61,4 milhões.

Este seria o valor da solução estocástica, de acordo com a definição apresentada na literatura. Mas, além do EEV, que foi calculado na primeira estratégia de solução, foi proposta na segunda estratégia (ES2) uma solução alternativa: a otimização determinística de cenários

estocásticos gerados por curvas de distribuição de probabilidade dos parâmetros estocásticos e a posterior combinação heurística dos resultados.

O valor do VSS em relação à segunda estratégia de solução, conforme os cálculos apresentados na Tabela 11, seria de US\$ 18.759.157,99 (69,4% menor que o da primeira estratégia).

Tabela 11: Cálculo do VSS em relação à estratégia de solução 2

$$\text{VSS} = |\text{ES2} - \text{RP}|$$

$$\text{VSS} = |758.795.875,97 - 777.555.033,96|$$

$$\text{VSS} = \$ 18.759.157,99$$

6.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 12 apresenta um resumo comparativo dos resultados obtidos nas três estratégias de solução utilizadas no problema. Além dos resultados, a tabela contém também a caracterização dessas abordagens, no que diz respeito às técnicas de otimização adotadas, à forma de utilização dos parâmetros estocásticos e à forma de obtenção da solução final.

Tabela 12: Comparação dos resultados obtidos nas estratégias de solução

	Estratégia 1	Estratégia 2	Estratégia 3
Técnica de otimização	PLI determinística	PLI determinística	PLI estocástica de dois estágios
Tamanho do modelo de otimização (linhas, colunas e não-zeros)	384 / 384 / 9.298	384 / 384 / 9.298	11.904 / 4.224 / 714.738
Forma de utilização dos parâmetros estocásticos	Valores esperados	Cenários a partir de curvas DP	Cenários estocásticos
Forma de obtenção da solução	Diretamente do modelo	Combinação heurística (médias ponderadas pela FO(-1))	Diretamente do modelo
Atendimento das restrições	Atendeu	Atendeu	Atendeu
Tempo total de processamento	137,59 s	238,79 s	297,49 s

Custo de afretamento (FO) no período de planejamento	US\$ 716.194.400,00	US\$ 758.795.876,00	US\$ 777.555.033,96
Contratos TCP no período de planejamento	54	49	52
Contratos CC no período de planejamento	118	155	78
Contratos Spot no período de planejamento	48	71	262
Total de contratos no período de planejamento	220	275	392
Contratos realizados no primeiro mês	55 (34 TCP e 21 CC)	56 (22 TCP, 28 CC e 6 Spot)	56 (34 TCP, 19 CC e 3 Spot)

O desempenho computacional dos modelos desenvolvidos foi excelente, os tempos totais de processamento de cada estratégia variaram entre de 137,6 e 297,5 segundos (entre 2,3 e 5,0 minutos).

A primeira estratégia de solução, conforme Birge e Louveaux (2011), é a alternativa mais simples para a solução de problemas de otimização sob incertezas: resolver problemas determinísticos substituindo os parâmetros incertos por seus valores médios. A técnica de otimização utilizada foi a programação linear inteira (PLI) determinística e o modelo desenvolvido foi executado com os valores esperados dos parâmetros estocásticos. Por ser uma solução comumente utilizada em problemas semelhantes, esta estratégia foi utilizada como referência para as demais.

A segunda estratégia de solução também utiliza o modelo de PLI determinístico, mas simula a ocorrência de cenários para as variáveis estocásticas através de funções de distribuição de probabilidade. O modelo é, então, executado para cada cenário e os resultados obtidos são combinados heurísticamente para a obtenção da solução final. A solução é obtida através das médias ponderadas das variáveis de decisão dos cenários pelos respectivos valores da FO, multiplicados por menos um, uma vez que o problema é de minimização. Com este procedimento, não há garantia de que todas as restrições sejam respeitadas. Por isso, ao final é preciso verificar se a solução obtida viola alguma restrição. Nenhuma restrição foi violada no experimento realizado.

Para a terceira estratégia de solução, foi desenvolvido um modelo de programação linear estocástica inteira, cuja a solução foi obtida utilizando-se a técnica de dois estágios. Este modelo é mais complexo que os anteriores: possui 11.904 linhas (equações/inequações), 4.224 colunas (variáveis inteiras) e 714.738 não-zeros. As incertezas de demanda e das taxas de afretamento foram representadas de forma intrínseca ao modelo como cenários estocásticos. A variável de decisão relativa aos contratos *Spot* foi definida como recurso de 2º estágio, ou seja, como um recurso corretivo do problema. Assim, os contratos TCP e CC devem ter suas compras programadas para o início da implementação do plano de afretamento, enquanto os contratos *Spot* são utilizados apenas em caso de necessidade.

As quantidades de contratos TCP tiveram valores parecidos nas três estratégias de solução. Isto se deve ao comportamento das taxas de TCP, que exibem tendências de crescimento parecidas nos três cenários, ainda que em magnitudes diferentes. Boa parte desses contratos se concentraram no primeiro mês de planejamento, justamente por serem mais baratos neste mês.

A solução apresentada pela primeira estratégia dá a falsa impressão de que uma quantidade menor de contratos e, conseqüentemente, um custo menor de afretamento é suficiente para atender à demanda ao longo do período analisado, nas condições de contorno do problema. Mas o resultado obtido é consequência de terem sido ignoradas as incertezas na modelagem do problema. Quando as incertezas são consideradas, a quantidade de contratos tende a aumentar para compensar a variação dos preços e da demanda, o que acontece na segunda e, mais ainda, na terceira estratégia. Portanto, a solução obtida pelo modelo de otimização estocástica é a solução mais adequada ao problema sob incertezas.

As análises de valor realizadas na seção anterior mostram a importância de se ter informações precisas ao longo do processo de planejamento (EVPI); e quanto custa não considerar as incertezas na modelagem do problema (VSS).

O Plano de Afretamento gerado, vide Quadro 26, deve ser executado e revisado a cada ciclo de planejamento, conforme explicado no modelo conceitual do problema. Assim, similarmente aos processos de planejamento estratégico, o horizonte do plano é de longo prazo (nestes experimentos, quatro anos), mas a execução das contratações deve acontecer em ciclos menores (por exemplo, um ano), quando as informações são mais precisas. O momento de iniciar a contratação também depende do tempo de duração deste processo.

7 CONCLUSÃO

O propósito principal deste trabalho de tese foi desenvolver um método para determinar a composição ótima de contratos de afretamento para a renovação contínua de frota, dedicada ao suprimento de unidades marítimas de exploração e produção de petróleo, sob condições incertas relacionadas à empresa (variação de demanda) e ao mercado (variação dos preços de afretamento).

Para alcançar este propósito, foi necessário contextualizar o problema à realidade brasileira, procurando conhecer e entender: os processos relacionados ao suprimento das unidades marítimas, a lógica de formação da demanda por embarcações, a regulamentação do transporte marítimo e o mercado de frete marítimo. O conhecimento da regulamentação e do mercado mostrou, por exemplo, que a empresa precisa cumprir uma série de requisitos e se tornar uma Empresa Brasileira de Navegação (EBN) para se tornar apta a afretar navios. Outra característica importante deste setor no país diz respeito à burocracia envolvida no processo de afretamento de uma embarcação. O processo de afretamento pode durar um ano. Tais características afetam o mercado de frete marítimo, fazendo com que a predição dos preços se torne ainda mais difícil no país.

Uma revisão da literatura foi realizada com o objetivo de buscar possíveis soluções para o problema. Na área de transporte marítimo, percebeu-se grande interesse em temas como dimensionamento de frota e roteamento de navios. Sobre afretamento marítimo, a maior parte dos trabalhos encontrados aborda a formação e o comportamento dos preços de afretamento. De fato, este é um tema muito relevante para o problema apresentado, mas é apenas um dos aspectos a serem considerados. O artigo de Siddiqui e Verma (2017) foi o único trabalho encontrado voltado para a composição ótima de contratos de afretamento, que, conforme mostrado, aborda diversos aspectos mas também apresenta diferenças importantes em relação ao problema estudado.

O método de análise e solução desenvolvido é baseado na modelagem *hard* do problema. Além da modelagem matemática e computacional para a resolução do problema de otimização do arranjo de contratos, o método contempla uma fase preliminar de planejamento, que tem por objetivo definir os parâmetros de análise e preparar os dados de entrada do modelo, e uma fase posterior para a análise dos resultados gerados pelo modelo de otimização.

A principal abordagem de solução definida para o problema de otimização sob incertezas foi a programação linear estocástica (PLE) de dois estágios. Mas, além desta, outras duas estratégias de solução foram analisadas: a otimização determinística com valores esperados dos parâmetros estocásticos, alternativa mais simples, comumente utilizada em problemas deste tipo; e a otimização determinística, com cenários amostrais gerados para os parâmetros estocásticos, seguida de combinação heurística dos resultados destes cenários para a obtenção da solução final.

Conforme mostra a análise dos experimentos (vide Tabela 12), os três modelos tiveram bom desempenho computacional, apresentando soluções exatas para o problema. Os resultados obtidos pelas três estratégias de solução foram devidamente analisados na seção anterior.

Ao longo do trabalho, mais especificamente nos dois últimos capítulos, mostrou-se que a programação estocástica é a abordagem mais adequada para resolução de problemas de otimização sob incertezas, por considerar simultaneamente todas as incertezas no modelo matemático.

As análises de valor da informação e valor da solução estocástica mostram a importância de se ter informações precisas ao longo do processo de planejamento e quanto custa não considerar as incertezas na modelagem do problema. Apesar de ser de fundamental importância, obter informações precisas sobre o futuro, como a predição dos preços de afretamento, não é tarefa das mais simples, conforme apontou Adland, Cariou e Wolff (2017).

A principal contribuição deste trabalho foi o desenvolvimento do modelo de PLE de dois estágios para a otimização problema proposto. Nos problemas clássicos onde esta técnica é aplicada, tem-se claramente definidos os recursos de primeiro e de segundo estágio. Como pode ser observado na função objetivo definida pela equação (2), os recursos de 1º estágio (variável de decisão \mathbf{x}) são acompanhados por coeficientes determinísticos (\mathbf{c}), enquanto os recursos de 2º estágio (variável de decisão \mathbf{y}) são acompanhados por parâmetros estocásticos, cuja incerteza é representada pelo cenário (ω).

Na modelagem estocástica do problema de tese, vide equações (17) e (18), as variáveis de decisão relacionadas a contratos TCP (V_l^j) e CC (X_m^j) foram definidas como recursos de 1º estágio, enquanto as variáveis de decisão relacionadas a contratos *Spot* ($S_{w,j}$) foram definidas como recursos de 2º estágio. Diferentemente do problema clássico, todas essas variáveis estão

associadas a coeficientes estocásticos ($TC_l^{w,j}$, $XC_m^{w,j}$ e $SC_{w,j}$). Assim, as decisões sobre as compras de contratos TCP e CC são tomadas antes da realização das incertezas, enquanto as decisões sobre os contratos *Spot* são tomadas após a realização, como um recurso corretivo. No mundo real, é exatamente assim que acontece: as decisões de compra de contratos de afretamento são tomadas sem o conhecimento dos preços futuros. O máximo que se tem, quando se tem, são estimativas de preços.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalho futuro, sugere-se:

- a) Um estudo sobre a predição de preços do mercado de embarcações *offshore* no Brasil, atentando-se para as variáveis de maior correlação com esses preços (valor do petróleo, quantidade de UM's de produção e exploração de petróleo, entre outras);
- b) Desenvolver um estudo sobre predição da frota embarcações *offshore* disponível no país no longo prazo;
- c) Desenvolver um estudo, envolvendo instituições privadas e governamentais, para verificar a possibilidade de se estabelecer no país condições para a realização de contratos de opção, como acontece no mercado de petroleiros em outros lugares do mundo. Os contratos de opção trariam mais flexibilidade para o afretador e, conseqüentemente, reduziriam os seus custos. No modelo de otimização estocástica, o contrato de opção poderia ser utilizado como um recurso de 2º estágio;
- d) Desenvolver um estudo complementar sobre análise de risco da empresa (demanda por embarcações) e do mercado (preços de afretamento) na aquisição do mix de contratos de afretamento marítimo.

REFERÊNCIAS

- ABEAM. (2019a). *Frota de Embarcações de Apoio Marítimo no Brasil - Março / 2019*. <http://www.abeam.org.br/arquivos/1556213085.pdf>
- ABEAM. (2019b). *Frota de Embarcações de Apoio Marítimo no Brasil - Março / 2019*. <http://www.abeam.org.br/>
- ABEPRO. (2019). *Áreas da Engenharia de Produção*. Associação Brasileira de Engenharia de Produção - ABEPRO. <http://portal.abepro.org.br/a-profissao/>
- Adland, R., Cariou, P., & Wolff, F.-C. (2016). The influence of charterers and owners on bulk shipping freight rates. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 86(Supplement C), 69–82. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2015.11.014>
- Adland, R., Cariou, P., & Wolff, F.-C. (2017). What makes a freight market index? An empirical analysis of vessel fixtures in the offshore market. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 104, 150–164. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2017.06.006>
- Aguiar, R. A. (2013). *Estudo do Impacto da Ampliação de Berço e de Área de Pátio no Aumento da Capacidade Operacional de uma Base de Apoio Offshore* [Universidade Federal do Espírito Santo]. <http://repositorio.ufes.br/handle/10/3963>
- Álvarez-SanJaime, Ó., Cantos-Sánchez, P., Moner-Colonques, R., & Sempere-Monerris, J. J. (2013a). Competition and horizontal integration in maritime freight transport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 51(1), 67–81. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2012.12.008>
- Álvarez-SanJaime, Ó., Cantos-Sánchez, P., Moner-Colonques, R., & Sempere-Monerris, J. J. (2013b). Vertical integration and exclusivities in maritime freight transport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 51(1), 50–61. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2012.12.009>
- ANP. (2018a). *Blocos Exploratórios*. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. <http://www.anp.gov.br/wwwanp/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/rodadas-de-licitacoes/entenda-as-rodadas>
- ANP. (2018b). *Dados de E&P*. <http://www.anp.gov.br/wwwanp/exploracao-e-producao-de->

oleo-e-gas/gestao-de-contratos-de-e-p/dados-de-e-p

- ANP. (2018c). *Exploração e produção de óleo e gás*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP. <http://www.anp.gov.br/wwwanp/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas>
- ANTAQ. (2015). *RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 01-ANTAQ, DE 13 FEVEREIRO DE 2015*. Agência Nacional de Transportes Aquaviários.
- ANTAQ. (2019). *Informações institucionais*. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. <http://portal.antaq.gov.br/index.php/institucional/a-antaq/>
- Arenales, M., Armentano, V., Morabito, R., & Yanasse, H. (2011). *Pesquisa operacional*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ares, G. (2013). *Logística de apoio offshore – integração e sincronização da cadeia de atendimento às unidades marítimas*. ILOS. <http://www.ilos.com.br/web/logistica-de-apoio-offshore-integracao-e-sincronizacao-da-cadeia-de-atendimento-as-unidades-maritimas/>
- Arpini, B. P. (2015). *Planejamento da logística de suprimento de plataformas offshore por meio de um modelo matemático 2L - CVRP com frota heterogênea e equilíbrio náutico* [Universidade Federal do Espírito Santo]. [http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/1688/1/PLANEJAMENTO DA LOGÍSTICA DE SUPRIMENTO DE PLATAFORMAS OFFSHORE POR MEIO DE UM MODELO MATEMÁTICO 2L-CVRP COM FROTA HETEROGÊNEA E EQUILÍBRIO NÁUTICO.pdf](http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/1688/1/PLANEJAMENTO_DA_LOGÍSTICA_DE_SUPRIMENTO_DE_PLATAFORMAS_OFFSHORE_POR_MEIO_DE_UM_MODELO_MATEMÁTICO_2L-CVRP_COM_FROTA_HETEROGÊNEA_E_EQILÍBRIO_NÁUTICO.pdf)
- Bakkehaug, R., Eidem, E. S., Fagerholt, K., & Hvattum, L. M. (2014). A stochastic programming formulation for strategic fleet renewal in shipping. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 72, 60–76. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2014.09.010>
- Banks, J., Carson, J. S., & Nelson, B. L. (1984). *Discrete-Event System Simulation*. Prentice-Hall Inc.
- Bergkvist, M., Davidsson, P., Persson, J. A., & Ramstedt, L. (2005). A Hybrid Micro-Simulator for Determining the Effects of Governmental Control Policies on Transport Chains. In *MultiAgent and MultiAgentBased Simulation* (Vol. 3415, pp. 236–247). https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-32243-6_19

- Biegler, L. T., & Grossmann, I. E. (2004). Retrospective on Optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 1169–1192.
- Birge, J. R., & Louveaux, F. (2011). *Introduction to Stochastic Programming*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0237-4>
- Bonnans, J. F. (2006). *Numerical Optimization* (2nd editio). Springer-Verlag Wien.
- Bortolossi, H. J., & Pagnoncelli, B. K. (2008). Uma Introdução à Otimização sob Incerteza. *XI Simpósio de Pesquisa Operacional E Logística Da Marinha*.
- Brazilship / Scanbrasil. (2017). *Offshore Market – Monthly Report - Outubro/2017*. www.brazilship.com.br
- Brazilship / Scanbrasil. (2019). *PSV Market Analysis*. www.brazilship.com.br
- Buchheit, M., Kuhn, N., Muller, J. P., & Pischel, M. (1992). MARS: Modeling a multiagent scenario for shipping companies. *European Simulation Symposium*.
- Burckert, H.-J., Funk, P., & Vierke, G. (2000). An intercompany dispatch support system for intermodal transport chains. *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, vol.1, 10. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1109/HICSS.2000.926672>
- Caramia, M., & Dell’Olmo, P. (2008). Multi-objective Optimization. In *Multi-objective Management in Freight Logistics* (pp. 11–36). Springer London. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84800-382-8_2
- Chou, C.-C., Kuo, F.-T., Gou, R.-H., Tsai, C.-L., Wong, C.-P., & Tsou, M.-C. (2010). Application of a combined fuzzy multiple criteria decision making and optimization programming model to the container transportation demand split. *Applied Soft Computing*, 10(4), 1080–1086. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asoc.2010.05.021>
- Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., & Ronen, D. (2007). Chapter 4 Maritime Transportation. In C. Barnhart & G. Laporte (Eds.), *Transportation* (Vol. 14, pp. 189–284). Elsevier. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14004-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14004-9)
- Christiansen, M., Fagerholt, K., & Ronen, D. (2004). Ship Routing and Scheduling: Status and Perspectives. *Transportation Science*, 38(1), 1–18. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1287/trsc.1030.0036>
- Clarkson. (2019). *Offshore Intelligence Network database*. www.clarksons.net

- Cole, M. (2010). *Maritime cabotage: a global analysis including cabotage campaigning tools*. <https://www.itfglobal.org/media/1152803/13enmstoolkitsuppdocmua-itf-cabotage-paper-october-v3-2009.pdf>
- Dantzig, G. B., & Fulkerson, D. R. (1954). Minimizing the number of tankers to meet a fixed schedule. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1(3), 217–222. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1002/nav.3800010309>
- Davidsson, P., Henesey, L., Ramstedt, L., Törnquist, J., & Wernstedt, F. (2005). An analysis of agent-based approaches to transport logistics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 13(4), 255–271. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2005.07.002>
- de Freitas Filho, P. J. (2008). *Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena* (2nd ed.). Visual Books. <https://books.google.com.br/books?id=VT-zkQEACAAJ>
- Di Febraro, A., Sacco, N., Saeednia, M., Febraro, A. Di, Sacco, N., & Saeednia, M. (2016). An agent-based framework for cooperative planning of intermodal freight transport chains. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 64, 72–85. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.12.014>
- Dinwoodie, J., Tuck, S., & Rigot-Müller, P. (2013). Maritime oil freight flows to 2050: Delphi perceptions of maritime specialists. *Energy Policy*, 63, 553–561. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.08.068>
- Dresch, A., Lacerda, D. P., & Antunes Junior, J. A. V. (2015). *DESIGNSCIENCE RESEARCH: Método de Pesquisa para Avanço da Ciência e Tecnologia* (1st ed.). Bookman. <https://doi.org/10.13140/2.1.2264.2885>
- Drewry. (2019). *Maritime Research*. www.drewry.co.uk
- Eco. (2018). *O que é a Zona Econômica Exclusiva*. <http://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/29053-o-que-e-a-zona-economica-exclusiva/>
- Fagerholt, K., Christiansen, M., Magnus Hvattum, L., Johnsen, T. A. V., & Vabø, T. J. (2010). A decision support methodology for strategic planning in maritime transportation. *Omega*, 38(6), 465–474. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2009.12.003>
- Freitas Filho, P. J. (2008). *Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena* (2a ed.). Visual Books.

- Gomes, L. F. A. M., de Mattos Fernandes, J. E., & de Mello, J. C. C. B. S. (2014). A fuzzy stochastic approach to the multicriteria selection of an aircraft for regional chartering. *Journal of Advanced Transportation*, 48(3), 223–237. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1002/atr.206>
- Gomez_Padilla, A., Mishina, T., Gomez Padilla, A., Mishina, T., Gomez_Padilla, A., & Mishina, T. (2009). Supply contract with options. *International Journal of Production Economics*, 122(1), 312–318. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.06.006>
- Gomide, F. (2007). *Fundamentos de modelagem de sistemas*. DCA-FEEC-Unicamp.
- Hellermann, R., Huchzermeier, A., & Spinler, S. (2013). Options Contracts with Overbooking in the Air Cargo Industry. *Decision Sciences*, 44(2), 297–327. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1111/dec.12008>
- Higle, J. L. (2005). Stochastic Programming: Optimization When Uncertainty Matters. In *Emerging Theory, Methods, and Applications* (pp. 30–53). INFORMS. <https://doi.org/10.1287/educ.1053.0016>
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introdução à Pesquisa Operacional* (8th ed.). AMGH Editora Ltda.
- Hoff, A., Andersson, H., Christiansen, M., Hasle, G., & Løkketangen, A. (2010). Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing. *Computers and Operations Research*, 37(12), 2041–2061. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.03.015>
- Hu, F., Lim, C.-C., & Lu, Z. (2014). Optimal production and procurement decisions in a supply chain with an option contract and partial backordering under uncertainties. *Applied Mathematics and Computation*, 232, 1225–1234. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2014.01.149>
- IEA. (2013). *World Energy Outlook 2013*.
- IEA. (2017). *World Energy Investment 2017*. <https://www.iea.org/publications/wei2017/>
- IHS Markit. (2017). *Petrodata Offshore Rig Day Rate Trends*. <https://www.ihs.com/products/oil-gas-drilling-rigs-offshore-day-rates.html>
- Jin, D., & Kite-Powell, H. L. (2000). Optimal fleet utilization and replacement. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 36(1), 3–20. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1366-5545\(99\)00021-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1366-5545(99)00021-6)

- Jong, G. de, Tavasszy, L., Bates, J., Grønland, S. E., Huber, S., Kleven, O., Lange, P., Ottemøller, O., & Schmorak, N. (2016). The issues in modelling freight transport at the national level. *Case Studies on Transport Policy*, 4(1), 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2015.08.002>
- Kamar Trading. (2018). *Platform Supply Vessels*. <http://kamar-trading.com/list/21/platform-supply-vessel>
- Kavussanos, M. G., Visvikis, I. D., & Batchelor, R. A. (2004). Over-the-counter forward contracts and spot price volatility in shipping. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 40(4), 273–296. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tre.2003.08.007>
- Kavussanos, M. G., Visvikis, I. D., & Dimitrakopoulos, D. N. (2014). Economic spillovers between related derivatives markets: The case of commodity and freight markets. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 68, 79–102. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2014.05.003>
- Kazmier, L. J. (2004). Theory and Problems of Business Statistics. In *Delft University of Technology, The Netherlands* (4th ed.). McGRAW-HILL. <https://doi.org/10.1036/0071430997>
- Koekebakker, S., Adland, R., & Sødal, S. (2007). Pricing freight rate options. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(5), 535–548. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.03.005>
- Law, A., & Kelton, W. D. (2000). *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill.
- Lei, L.-C., & Zhou, J. (2010). Stackelberg game model of capacity options for air cargo under risk aversion. *Xitong Gongcheng Lilun Yu Shijian/System Engineering Theory and Practice*, 30(2), 264–271. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77952383329&partnerID=40&md5=7533f45a0aa195f37dc4c52fea9c114a>
- Leite, R. P. (2012). *Maritime transport of deck cargo to Petrobras fields in Campos Basin: an empirical analysis, identification and quantification of improvement points* [Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro]. http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/biblioteca/php/mostrateses.php?open=1&arqtese=1022117_2012_Indice.html
- Lopes, P. H. M. (2011). *Uma Solução para o Problema de Roteamento de Embarcações de*

- Apoio “Offshore” Através da Metaheurística RTR* [Universidade Federal do Rio de Janeiro]. <http://pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2011101001.pdf>
- Maisiuk, Y., & Gribkovskaia, I. (2014). Fleet Sizing for Offshore Supply Vessels with Stochastic Sailing and Service Times. *Procedia Computer Science*, 31(Supplement C), 939–948. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.346>
- McQuilling. (2019). *Market Research*. www.mcquilling.com
- Meng, Q., & Wang, T. (2011). A scenario-based dynamic programming model for multi-period liner ship fleet planning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(4), 401–413. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2010.12.005>
- Nomikos, N. K., Kyriakou, I., Papapostolou, N. C., & Pouliasis, P. K. (2013). Freight options: Price modelling and empirical analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 51, 82–94. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2012.12.001>
- Nosoohi, I., & Nookabadi, A. S. (2016). Outsource planning through option contracts with demand and cost uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 250(1), 131–142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.10.030>
- ONU. (1982). *United Nations Convention on the Law of the Sea*. http://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_e.pdf
- Ozdemir, Y., & Basligil, H. (2016). Aircraft selection using fuzzy ANP and the generalized choquet integral method: The Turkish airlines case. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 31(1), 589–600. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3233/IFS-162172>
- Ozer, T., & Cetin, I. B. (2012). A Study on the Charter Type Choice of Turkish General Cargo and Drybulk Shipowners. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 28(2), 203–226. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ajsl.2012.08.004>
- Özpeynirci, Ö., Üçer, K., & Tabaklar, T. (2014). Multimodal freight transportation with ship chartering. *Maritime Economics & Logistics*, 16(2), 188–206. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1057/mel.2013.24>
- Pantuso, G., Fagerholt, K., & Hvattum, L. M. (2014). A survey on maritime fleet size and mix problems. *European Journal of Operational Research*, 235(2), 341–349. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.04.058>

- Pantuso, G., Fagerholt, K., & Wallace, S. W. (2016). Uncertainty in Fleet Renewal: A Case from Maritime Transportation. *Transportation Science*, 50(2), 390–407. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1287/trsc.2014.0566>
- Papadimitriou, C. H., & Steiglitz, K. (1998). *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity (Dover Books on Computer Science)*. Dover Publications. <http://www.amazon.com/Combinatorial-Optimization-Algorithms-Complexity-Computer/dp/0486402584>
- Parthibaraj, C. S., Subramanian, N., Palaniappan, P. L. K., & Lai, K. K.-H. (2018). Sustainable decision model for liner shipping industry. *Computers and Operations Research*, 89, 213–229. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2015.12.005>
- Pegden, C. D., Sadowski, R. P., & Shannon, R. E. (1995). *Introduction to Simulation Using SIMAN* (2nd ed.). McGraw-Hill, Inc.
- Pidd, M. (1998). *Modelagem empresarial: ferramentas para tomada de decisão*. Bookman.
- Portal Naval. (2018). *Terminal Alfandegado de Imbetiba*. www.portalnaval.com.br
- Ribas, P. C. (2012). *Otimização do scheduling de movimentações de um duto com uma origem e vários destinos*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Salgues, O. (2003). *Contratos de afretamento e transporte no Direito Marítimo*. Jus. <https://jus.com.br/artigos/4022/contratos-de-afretamento-e-transporte-no-direito-maritimo>
- Santos, J. P. R. dos. (2014). *Dimensionamento da frota de navios para o transporte de derivados claros de petróleo na cabotagem*. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Sardis, M., Vouyioukas, D., & Anagnostopoulos, I. (2009). Semi-automatic e-chartering through multi-agent systems and satellite IP networks. *International Journal of Internet Protocol Technology*, 4(3), 193. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1504/IJIPT.2009.028658>
- Sawik, T. (2018). *Supply Chain Disruption Management Using Stochastic Mixed Integer Programming* (Vol. 256). Springer International Publishing. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-58823-0>
- Schrijver, A. (1999). *Theory of Linear and Integer Programming* (1st ed.). West Sussex: John

Wiley & Sons Ltda.

- Schutz, F., Massuquetti, A., & Alves, T. W. (2013). Demanda e oferta energética: uma perspectiva mundial e nacional para o etanol. *Reget*, 16(2010), 3167–3186. <https://doi.org/10.5902/2236117010688>
- Sherali, H. D., Al-Yakoob, S. M., & Hassan, M. M. (1999). Fleet management models and algorithms for an oil-tanker routing and scheduling problem. *IIE Transactions*, 31(5), 395–406. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1023/A:1007502205917>
- Siddiqui, A. W., & Verma, M. (2017). A conditional value-at-risk based methodology to intermediate-term planning of crude oil tanker fleet. *Computers & Industrial Engineering*, 113, 405–418. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.09.021>
- Slack, N., Chambers, S., Harland, C., Harrison, A., & Johnston, R. (1997). *Administração da Produção*. Editora Atlas.
- Taha, H. A., Natarajan, A. M., Balasubramanie, P., & Tamilarasi, A. (2006). *Operations research: an introduction* (8th ed.). Pearson Prentice Hall.
- Tokcaer, S., & Özpeynirci, Ö. (2016). A bi-objective multimodal transportation planning problem with an application to a petrochemical ethylene manufacturer. *Maritime Economics and Logistics*, 1–17. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1057/s41278-016-0001-4>
- Wang, X., Fagerholt, K., & Wallace, S. W. (2018). Planning for charters: A stochastic maritime fleet composition and deployment problem. *Omega*, 79, 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.07.007>
- Wooldridge, & Michael. (2002). *Introduction to Multiagent Systems*. John Wiley and Sons.

**ANEXO I DISTRIBUIÇÃO DA FROTA DE EMBARCAÇÕES DE APOIO
MARÍTIMO NO BRASIL**

Empresa	Status	Bandeira		Total
		Brasileira	Estrangeira	
ACAMIN	Não Associado		1	1
ASGAARD	ABEAM	1		1
ASSO MARÍTIMA	ABEAM	3		3
ASTROMARÍTIMA	Não Associado	11		11
BARU	Não Associado	12		12
BELOV ENGENHARIA	ABEAM	1		1
BOURBON	ABEAM	3		3
BRAM / ALFANAVE	ABEAM	50	2	52
BRAVANTE	ABEAM	11		11
BRAVO	Não Associado	1		1
BSCO	Não Associado	8		8
CAMORIM	Não Associado	16	1	17
CBO / OCEANA	ABEAM	33		33
DEEP SEA	ABEAM	1		1
DOF / NORSKAN	ABEAM	19	5	24
DRACARES	Não Associado	1		1
FAROL	Não Associado		1	1
FARSTAD	ABEAM	5	1	6
FINARGE	ABEAM	2	1	3
FUGRO BRASIL	ABEAM	1		1
GALÁXIA	ABEAM	2	1	3
HORNBECK	ABEAM	1		1
INTERNAV	Não Associado	1		1
INTL MARÍTIMA	ABEAM		5	5
LABORDE	Não Associado	2		2
LOCAR	Não Associado	10		10
MAERSK	ABEAM	4		4
MARÉ ALTA	Não Associado	5	1	6
MARLIN	ABEAM	6	1	7
MULICEIRO	Não Associado	1		1
NIT SEA	Não Associado	1		1
OCEÂNICA ENG E CONSULT	Não Associado	1		1
OCEANPACT	ABEAM	14	1	15
OSM	ABEAM		2	2
PHOENIX NAVEGAÇÃO	Não Associado	1		1
SAPURA	ABEAM	1	5	6
SEALION	ABEAM	2		2
SIEM	ABEAM	6	2	8
SISTAC	Não Associado	1		1
SOLSTAD	ABEAM		1	1
STARNAV	ABEAM	32		32
SUBSEA7	ABEAM	1	4	5
TECHNIP	ABEAM	5	2	7
TRANSHIP	ABEAM	20		20
TRANSMAR	Não Associado	1		1
UP OFFSHORE	ABEAM	9	2	11
WSUT	ABEAM	23		23
Total		329	39	368

Fonte: ABEAM (2019)

ANEXO II CONTRATOS DE MÉDIO E LONGO PRAZOS ASSINADOS OU COM PREVISÃO DE ASSINATURA EM 2017

Date	Charterer	Work Scope	Period	Commencement
Nov/2017	Petrobras	RSV (National)	02 or 03 years + options	Lot A: Dec/2018 Lot B: Jan/2019
Nov/2017	Petrobras	RSV (Intenational)	02 or 03 years	Lot A: Dec/2018 Lot B: Jan/2019
Nov/2017	Petrobras	AHTS 15.000 ROV & 18.000, 150t & 178 t. Bollard Pull	365 days + 30 days	Lot A: Jun/2018 Lot B: Apr/2018 Lot C: Jun/2018 Lot D: Apr/2018 Lot E: Apr/2018
Nov/2017	Petrobras	DSV	3 years + 2 years	To be confirmed
Oct/2017	Petrobras (RFI)	RFI for PSV's chartering for SPOT contracts	30 days + 07 days option	Within 12 months contract vality upon demand
Sep/2017	Petrobras	Libra Field - AUV	To be confirmed	90 days after contract signature
Sep/2017	Petrobras	Crew Boat P-5	02 years + 02 years option	Type 1: 05/01/2018 Type 2: 02/10/2018
Sep/2017	Petrobras	Crew Boat UT 750	02 years + 02 years option	Type 1: 20/12/2017 Type 2: 20/02/2018
Sep/2017	Petrobras	AHTS TS	01 year	01/01/2018
Aug/2017	Petrobras (RFI)	Integrated services of logistics and offshore support	To be confirmed	To be confirmed
Aug/2017	Petrobras	RSV (only vessels blocking foreign ton.)	To be confirmed	To be confirmed
Aug/2017	Total (Br)	2 x PSV + 2 x OSRV (stdby)	6 months + Options	4Q2017
June/2017	Statoil (RFI)	AHTS from 15000 to 18000 BHP, 150 t bp	2 or 3 years + Up to 3 x 1 year Options	December, 2017
Feb/2017	Statoil	PSV for drilling support	6 months + Options	4Q2017 to 1Q2018
Dec/2016	Petrobras	WSSV - Well Service and Stimulation Vessel	4 years	720 days after award
Dec/2016	Petrobras	RFI SDSV (Shallow Dive Support Vessel)	800 days	To be confirmed
Sep/2016	Petrobras	OSRV 750 – BR Flag (only vessels blocking foreign ton.)	350 days + 350 days	07/11/2016
Jun/2016	Petrobras	SDSV (Shallow Dive Support Vessel)	2 or 3 years	180 days after award
Feb/2016	Total (Br)	3 x PSV + 1 x OSV (stdby)	2 + 2 wells	3Q2017
Nov/2015	Petrobras	OSRV 750 – BR Flag	2, 3 or 4 years	Up to 120 days after award
Jun/2015	Petrobras	RSV: LOT 1 - 4	Lot 1 & 3: 730 days Lot 2 & 4: 1095 days	Lot 1 & 2: 31/01/2016 Lot 3 & 4: 01/07/2016

Fonte: BRAZILSHIP / SCANBRASIL (2017)

APÊNDICE I ARTIGO PUBLICADO

Optimum Composition of Charter Contracts for the Renewal of the Fleet of Offshore Support Vessels Considering Uncertainties: A Literature Review

Marcelo Oliveira de Souza¹, Guilherme Luis Roehé Vaccaro¹, Luiz Alberto Oliveira Rocha¹, Giulio Lorenzini^{2*}

¹ Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Engenharia de Produção e Sistemas, Av. Unisinos, 950, Cristo Rei, São Leopoldo, RS, CEP: 93.022-750, Brazil

² Università degli Studi di Parma, Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Parco Area delle Scienze 181/A, 43124 Parma, Italy

Corresponding Author Email: giulio.lorenzini@unipr.it

<https://doi.org/10.18280/ijht.370201>

ABSTRACT

Received: 13 April 2019

Accepted: 27 May 2019

Keywords:

maritime chartering, offshore support vessels, optimization under uncertainties, prices prediction, risk analysis

This article reviews the literature on the Mendeley, Science Direct and Scopus databases on solutions to the optimal composition problem of offshore support charter contracts published between 2008 and 2018. This problem is relevant to the ongoing fleet renewal process, in terms of associated costs and fleet flexibility, in the context of oil and gas exploration and production. The problem is subject to uncertainties related to the demand to be met and to charter prices. The literature presents solutions that can be applied to parts of the problem, however a satisfactory integral solution was not found. The analysis of the literature and the characteristics of the problem indicate the construction of a solution multi-approach method as a viable way to treat the complexity of the problem.

1. INTRODUCTION

The exploration and production of oil and gas (E&P) forms the basis of the oil industry. Resources of the order of US\$ 1.7 trillion are invested annually in technological development, extension of geological knowledge and formation of the chain of goods and support services [1-2]. The industry is characterized by high volumes produced and moved, as well as revenues and costs of the order of tens of billions of dollars per year. Most of the oil and gas reserves are found in maritime fields in countries such as Brazil and Norway, generating comparatively greater costs of exploration and production in relation to countries with reserves onshore, such as Venezuela and Saudi Arabia.

Several maritime units (MUs) are required for exploration and production in a maritime field, in addition to offshore support vessels, responsible for supplying these units. The two main types of offshore units are: drilling rigs – units designed to drill and complete oil and natural gas exploration or production wells; and Stationary Production Units (SPUs) – units positioned in fields already discovered for the extraction of oil and natural gas. The rental of a probe is estimated at between \$ 200,000 and \$ 500,000 per day [3], depending on the contextual conditions of the oil and gas market. The main offshore support vessel is Platform Supply Vessel (PSV), whose daily rent is between \$ 15,000 and \$ 43,000 [4], depending on its capacity. As an illustration, on the Brazilian coast, in July 2017, there were 20 exploratory wells completed (i.e., the activities to determine the existence of oil and gas and their viability of production were finalized) and 15 exploratory wells in activity. During the same month, 143 SPUs were in operation, 62 of them in the Campos basin [5]. The logistical process to make maritime E&P activities feasible therefore presents considerable complexity and costs,

particularly considering the climatic effects and the general context of installed capacity below the demand of certain types of vessels, requiring a greater refinement of planning.

In this context, maritime transport deserves special attention on the part of decision makers, not only because it represents up to 80 % of the total cost of the chain [6], but also due to the complexity of the activities and decisions involved. The first decision concerns the formation of the fleet of offshore support vessels to supply the E&P maritime units. It is necessary to decide on: the types of vessels and the necessary quantities of each; whether the vessels will be owned or chartered; and, if chartered, what types of contracts and for what time horizons will be realized. The goal is to minimize costs and risks, leading oil and gas companies to have the smallest fleet possible to adequately meet the supply needs of their MU.

The demand for vessels depends on the number of active MUs and their consumption profile of supplies. However, the number of MUs depends on the existing production (and exploration) fields or the ones to be developed or acquired in the future. In addition, the classes and quantities of vessels required may vary over time, depending on the actors and technologies available on the market. Thus, in order to guarantee the maintenance of service levels to the MUs at the lowest possible cost, the fleet must be flexible, and this flexibility can be obtained by the proper composition of maritime charter contracts.

The problem of optimal composition of charter contracts for vessels supporting MUs, in terms of contract, is to identify the value of the mix of contracts in order to minimize the costs and risks involved and guarantee the supply of MUs with acceptable levels of service.

Many factors need to be taken into account when defining the best set of charter contracts (modalities, quantities and

durations of contract). Among these factors, the following stand out: (i) Offshore support logistics; (ii) Demand to be served; (iii) Chartering prices; and (iv) Legislation and

regulation of maritime transport [6-11]. Figure 1 shows the relationship between these four factors in the definition of the problem.

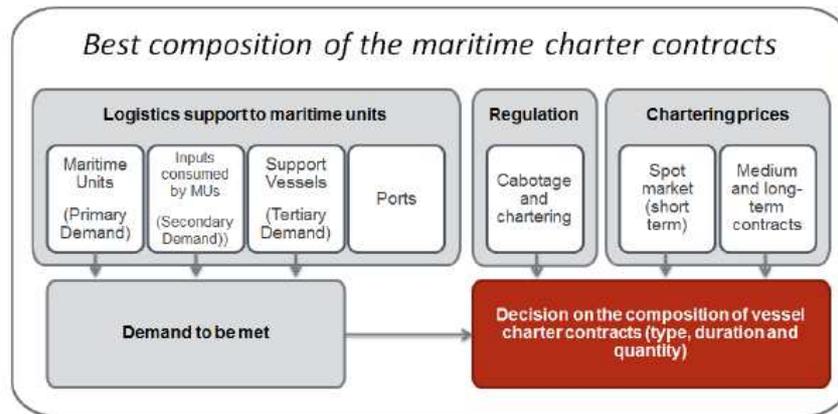


Figure 1. Factors determining the composition of charter contracts
Font: Developed by the author

Offshore support operations consist of cargo transportation and storage activities carried out by vessels supporting E&P services at MUs. From the logistic point of view, the offshore support operations cover the handling of loads of weights, formats and varied types, as well as the planning of vessels with different specialties, service rules and operational restrictions [7-12]. According to Figure 1, the logistics of supporting the MUs, or offshore support logistics, is composed of four basic elements: maritime units; inputs (and services) consumed by MUs; support vessels; and maritime terminals [8].

In order to carry out vessel planning, it is necessary to know the demand behavior, which can be broken down into: demand for MUs (primary); demand for supplies of each MU (secondary) and demand for vessels (tertiary). The three levels of demand correspond to the first three elements of the logistics support shown in Figure 1.

Primary demand – the types and quantities of MUs – depends on the company's oil and gas exploration and production plans. As for the MU classes, the three basic ones are: drilling rigs, stationary production units and special vessels [8].

Secondary demand corresponds to the consumption profile of each class of MUs. The main inputs demanded are: food for the crew, common general cargo (stored in containers), drilling and production pipes, chemical products, potable water, diesel oil, drilling fluid and cement [7].

Tertiary demand is the demand for vessels as such. Depending on the class of inputs to be transported, a certain type of vessel is required. The most used vessel is of the PSV type with different sizes of capacity and can carry different types of input. But in addition to the PSV, there are other types of vessels: the Utility Boat (UT), which is a small supplier, which, because it is faster than PSV, is used to deliver fast loads; Anchor Handling and Tug Supply (AHTS), which is mainly used for towing and positioning platforms, but can also be used in transporting supplies; the Crewboat (CB), which transports crew members to/from the MUs; and the Oil Spill Response Vessel (OSRV), which is used to

combat oil spills. Other types of vessels can still be used in specific situations [7, 13].

Finally, in addition to the characteristics and specificities of offshore support operations and the demand to be met, the formation of the fleet of chartered vessels is also strongly impacted by short, medium and long-term charter prices and maritime transport legislation and regulations in the country where the activities are carried out. Long-term contracts tend to be cheaper than short-term ones, but a large number of long-term contracts makes the fleet inflexible to fluctuations in E&P demand, reducing the competitiveness of the oil company. In addition, there are rules and restrictions that must be observed. In Brazil, according to Normative Resolution No. 01/2015 of the National Agency of Waterway Transportation [9], the water transport of cargo in cabotage navigation must be carried out by a Brazilian shipping company using a Brazilian flag vessel. Exceptions are provided in that standard. This requirement has a significant impact on chartering decisions.

Uncertainties related to demand and chartering prices need to be considered in the problem. The company must have at its disposal a fleet of vessels sufficient to meet the demands of the maritime units. Due to changing scenarios – changes in demand and charter prices, regulation and the company's own objectives – the fleet needs to be flexible, with the risk of incurring incompatible costs. However, other players also act in the market, seeking to contract suppliers according to their strategies. Therefore, under certain conditions, supply may become scarce, resulting in significant increases in vessel contract values. Therefore, defining and managing the mix of charter contracts is a fundamental task for the competitiveness of an oil company. Developing a robust approach to support this decision-making is a problem that still requires study and proposition of methodologically supported solutions in the scientific method, presenting academic and applied relevance [14-15].

This article reviews the literature on the search for solutions to the problem of determining the most appropriate composition of charter contracts for the ongoing process of

renewal of a specific fleet of vessels dedicated to the supply of offshore oil exploration and production units.

The remainder of this article is organized as follows: the next section describes the criteria used to search for publications, and then it is presented the bibliographic review of the approaches and methods best suited to solving the problem. The synthesis of the review carried out and a discussion on the main findings are presented in the fourth section. Finally, in the fifth section, the conclusions and suggestions for future work are presented.

2. METHOD OF RESEARCH DEVELOPMENT

The bibliographical research began with the broader theme of the problem: maritime chartering. The objective was to verify in the literature the types of problem of major interest related to this theme. Then, after understanding what the literature presents on the subject, we tried to identify among the works found those that most resemble the problem under analysis. In this first scan, an attempt was made to have an overview on the possibilities of ways to search for the best solution.

The keywords searched for in the review were *chartering*, *affreightment*, and *freight* in titles, abstracts, and keywords over the last 10 years at the Mendeley, Science Direct, and Scopus databases.

The search results are presented in Tables 1 and 2. Table 1 presents the search using the term *chartering* as a reference. There were 354 publications, of which 111 publications

appeared in at least two of the databases, resulting in 243 different publications. Subsequently, the publications related to the maritime_sub-theme (*maritime, sea, shipping*) were identified, resulting in 79 publications of the 243.

As for *freight*, the searches resulted in an excessive amount of publications: only in the Scopus base were found more than 10 thousand publications. Therefore, it was decided to reduce the scope of the search for *maritime freight*. We found 293 publications, with 60 repeated in at least two of the bases, resulting in 233 different publications. Table 2 presents the results from the term *maritime freight*.

In the two sets of publications considered (chartering and maritime freight), filters were applied related to possible solutions approaches to the problem: modeling (*model, modeling, modelling*); optimization (*optimization, optimizing, optimisation, optimise, optimal*); simulation; agent-based systems (*agent based and multi agent*); multicriteria analysis (*multiple criteria, multi criteria, multicriteria*); and contract of supply with options (*supply contract with options, flexible supply options, supply chain and option contract*). The results are shown in Tables 1 and 2.

It was also examined the existence of publications that contained some form of literature review in the two sets of publications, which resulted in 7 publications in each set.

The last phase of the research consisted in choosing, among the publications found, summarized in the tables above, a relevant set for the presented problem. For this, this review work was divided into four categories of publications.

Table 1. Bibliographic research: chartering, maritime chartering and subtopics related to solution approaches

	Mendeley	Science Direct	Scopus	Total	Not repeated
Chartering	149	27	178	354	243
Literature review	6	3	3	12	7
Modelling	46	12	57	115	82
Optimization	20	8	18	46	25
Simulation	8	2	15	25	17
Agent-based system	2	0	3	5	3
Chartering	4	0	3	7	4
Multicriteria analysis	38	14	70	122	79
Maritime	2	3	2	7	3
Literature review	21	8	38	67	43
Modelling	15	5	20	40	23
Optimization	3	1	3	7	4
Simulation	2	0	2	4	2
Agent-based system					

Table 2. Bibliographic research: maritime freight and subtopics related to solution approaches

	Mendeley	Science Direct	Scopus	Total	Not repeated
Maritime freight	105	25	163	293	233
Literature review	5	3	3	11	7
Modelling	52	15	81	148	95
Modelling	11	3	14	28	19
Optimization	10	2	13	25	17
Simulation	1	0	0	1	1
Agent-based system	5	3	21	29	28
Multicriteria analysis					

For the first category, we searched for papers directly related to maritime chartering, which provided an insight into what are the most important problems for the sector and how the proposed problem fits into this context. Six articles were selected which, in general, review the literature and an

analysis of the sector. The formation and behavior of chartering prices stand out as an important factor in the choice of charter contract types. Therefore, this topic is addressed as a subcategory within the problems of maritime chartering and seven articles were chosen. The last three

categories relate specifically to the search for solution approaches to the problem. It has been found that optimization methods are the most used in transport and chartering problems. For that reason, the second category of articles corresponds to optimization solutions found in problems of this type, which can be directly applied to this problem. Eight optimization works were analyzed. The third category of articles encompasses other approaches to solving transport and chartering problems. Five papers were selected. Finally, the fourth category refers to solution approaches applied to other types of problems that, however, have some correlation with the proposed problem. For example, one of the considered articles addresses the problem of selecting an aircraft, which can be correlated to the problem of selecting types of chartering. Eight papers are selected whose solutions present potential application for part of the problem in question.

3. LITERATURE REVIEW

3.1 Maritime chartering problems

This section aims to provide an overview of the most prominent problems for the maritime chartering sector, and how the problem of offshore support fleet renewal through chartering fits into this context. Important aspects are analyzed both from the point of view of the suppliers of the maritime transport (vessels and services related) and the company that chartered the vessels to use in their logistics activities. Due to the great relevance to the industry, the formation and behavior of charter prices are addressed prominently at the end of this section in a subsection entitled the maritime chartering market.

Ozer and Cetin [16] examined the choice of type of chartering by Turkish shipowners of general cargo and dry bulk, and the criteria that affect and determine this choice. The methodology used covers a review of the literature, interviews and in-depth research on the subject. The study shows that the type of charter preferred by Turkish shipowners is voyage charter party (VCP) and that shipowners consider the risk in selecting type of chartering, charterer reliability and ship operating conditions are the most important factors for the chartering decision.

Still on the shipowners' side, Álvarez-Sanjaime et al. [17], analyze vertical integration and exclusivity in freight shipping. The authors seek to show the strategic advantages that a shipping provider can gain from building their own maritime terminal. In the same issue of the journal, these authors published another article [18], this one about competition and horizontal integration in maritime transport. The article models the competition for freight of goods between the road and maritime sectors. In the horizontal integration model presented in the article, operators offer differentiated services and, through oligopoly, use economies of scale in the sector as a competitive advantage.

Pantuso et al. [19] present a bibliographical research on the problem of mix and dimensioning of the fleet in maritime transport, i.e. maritime fleet size and mix problem (MFSP), also focusing on shipping companies. They point out that market fluctuations and frequent incompatibilities between capacities and demands by vessels show the relevance of the problem and the need for more precise tools and methods to support decision making. After analyzing the literature

related to the problem and its variants and extensions, the article seeks to summarize the state of the art on the theme, highlighting the main contributions of previous research. The paper also seeks to identify important aspects that were not captured in previous research. According to the authors, most of the research works has focused on the initial composition of the fleet and has not considered market volatility. They say future research should focus more on fleet renewal, which needs to continually adapt to changing market conditions. Market-related uncertainties need to be considered in future works.

On the side of the charterer, the bibliographic review carried out by Siddiqui and Verma [11] covers two main areas: fleet management and charter contracts and options. According to the authors, at the strategic level of fleet management, Dantzig and Fulkerson [20] were the first to consider both fixed costs of fleet acquisition and variable transport costs; Jin and Kite-Powell [21] proposed a model based on optimal control theories to deal with the scheduling of vessel replacement and utilization; Meng and Wang [15] presented a dynamic programming model with scenario generation for the problem of multi-period fleet development and deployment; Fagerholt et al. [22] considered uncertainty in planning and developed a decision support methodology that combined Monte Carlo simulation for the parameter estimation and an optimization model for industrial shipping applications. At the tactical level, the authors cite Al-Yakoob and Hassan [23], who assessed charter contracts to facilitate routing and scheduling a fleet of heterogeneous vessels, and indicate the readings by Christiansen, Fagerholt and Ronen [24] and Christiansen, Fagerholt, Nygreen and Ronen [25]. Siddiqui and Verma [11] also point out that although much of the works on the subject indicates spot contracts in fleet adjustment decisions, complex contracts and their options are also being used for this purpose.

Dinwoodie et al. [26] attempt to synthesize maritime experts' perceptions of changing patterns of maritime oil freight flows to 2050 through a classic Delphi study. The debate covers the global maritime oil flows; and factors related to future, including economic growth, changes in the shipping market and haul lengths. Briefly, perceptions indicate a gradual reduction in long-range maritime freight of oil, mainly due to the increasing intolerance of fossil fuels and local sources of oil supply. This trend, if confirmed, could affect the oil supply market in the world and, consequently, the offshore support vessels chartering.

References describing the maritime freight market

According to Adland et al. [27], unlike the financial market, where the volume of transactions is large and the related assets are homogeneous, allowing the direct and almost continuous derivation of indices that measure the movements of prices, transactions in the maritime freight market are heterogeneous occurring at irregular and low frequency intervals. Each signed contract is typically different from the latter, as the technical specifications and route of each ship can be substantially different. For this reason, the construction of market indices is usually done by shipbrokers – who act as intermediaries between buyers and sellers of shipping. Despite the difficulties, it is possible to find in the literature some works on prediction and construction of maritime freight rates indices.

Nomikos et al. [28] discuss an extension of the traditional

lognormal representation of the neutral risk of the dynamics of spot freight rates to a diffusion model with jumps of magnitudes and random arrivals. They then develop a stock option structure on the average spot freight rate, which are commonly traded in the freight derivatives market. By exploring the computational efficiency of the proposed pricing scheme, they calibrate the jump diffusion model using market quotes of options on the trip-charter route average Baltic Capesize, Panamax and Supramax Indices. They show that the jump-extended setting produces important model improvements over the basic lognormal setting.

Kavussanos et al. [29] investigate economic spillovers between the freight and commodity derivatives markets. The economic relationship tested relates the derivative price of the commodity transported with the derived price on the freight rate. High frequency commodity data is synchronized with freight data, and freight rates for different vessels are combined with portfolios of commodities that these ships carry. The results of this work can help improve the understanding of the mechanisms of information transmission between the commodity and freight markets.

In the oil transportation sector, according to Siddiqui and Verma [11], a variety of short to medium term charter contracts, such as single voyage spot charter and over-the-counter contracts, and freight futures contracts are traded on several freight exchanges. The authors point out, however, that because of the lower hedge efficiency and the difficulty of the market to deal with the demand for specific route contracts, the future contracts were replaced by the mostly over-the-counter freight agreements [30-31].

Adland et al. [32] propose a freight rate formation model in individual contracts that incorporates charterer and owner heterogeneity and the corresponding owner-charter effects for the VLCC and Capesize market. Although market conditions and routes remain the most influential covariates, these paper shows that charterers, owners and their equivalents are also significant microeconomic determinants of the freight rate level.

The Offshore Support Vessels (OSV) market is very different from the traditional long distance navigation market. This type of vessel supports crucial logistic activities for the exploration and production of oil and gas; OSV spot markets are highly dependent on local climate and nature, generating high volatility; vessels are quite heterogeneous in terms of technical specification and can carry different types of cargo at the same time (e.g. liquids, chemicals and general cargo). These peculiar characteristics make it difficult to create objective price indexes for the market and make the analysis of price formation for individual contracts an even more important task [27]. The limits imposed by the cabotage regulations of some countries restrict this activity, imposing conditions that are reflected in the supply, cost and time of closing contracts.

In his last article, Adland et al. [27] discuss the construction of price indexes for the OSV market. In this work, the authors estimate a hedonic price regression to generate an index based on heterogeneous data from the OSV freight market. According to the results obtained by the application of the method in a data set with more than 30,000 transactions, the spot freight rates increase with the engine power and transport capacity of the vessels. The market volatility is seasonal and positively correlated to both oil prices and production volumes.

3.2 Optimization solution for similar problems

The optimization methods were the most frequent methods in the papers on shipping and chartering, similar to the proposed problem. In this section, some of these works are presented.

Caramia and Dell'Olmo [33] discuss optimization methods applied to freight transport systems, with specific focus on multi-objective modeling. The purpose of the book is, according to the authors, to provide decision makers with methods and tools to implement multi-objective optimization models in logistics, combining theoretical aspects with specific applications. The book presents a chapter on maritime transport, but does not deal specifically with maritime chartering.

Meng and Wang [15] propose a planning problem of multi-period liner ship fleet for a container shipping company more realistic than the studies in previous literature. According to the authors, this type of problem has been studied for some decades, but due to the simplifications required by the solution approaches used, the modeling of the problem distances itself from reality. The proposed problem is formulated as a scenario-based dynamic programming model, consisting of a series of integer linear programming formulations for each single planning period; and the model can be efficiently solved by a shortest path algorithm on an acyclic network. The results obtained in numerical examples show that chartering ships is not always the best policy for a long-term planning horizon, although it is much cheaper than buying ships in the short term. The purchase of ships seems to be a more profitable investment in the long run.

Özpeynirci et al. [34] present a mathematical model that searches for the ideal multimodal transport plan by chartering to manufacturing companies for a given planning horizon. The model considers the options of transport by road and sea. Sea transport requires chartering at least one vessel between the candidate vessel and chartered vessels operate on several predefined routes during the planning horizon. The mathematical model is applied to a company that delivers its products to customers by road, and is considering the option of using multimodal transport. The company plans to charter ships annually and operate them between national ports. The authors made a sensitivity analysis on several cases and observed that the proposed plan does not change for moderate variations in the data.

Bakkehaug et al. [35] propose a new formulation of multi-stage stochastic programming for the strategic fleet renewal for shipping companies. The new formulation explicitly addresses uncertainty in parameters such as future demand, freight rates and vessel prices. Computational tests are performed, comparing different discretizations of stochastic variables and different sizes of planning horizon. It is shown that significantly better results are obtained when considering the uncertainties of future parameters, compared to the use of expected values.

In order to analyze and improve the freight transportation plan considering multimodal transportation, Tokcaer and Özpeynirci [36] develop a biobjective mathematical model, whose objectives are to minimize the total cost and the number of operations of handling (an indicator of operational difficulty). The model decides on the ideal multimodal transport plan, including ship chartering and decisions on the mode of transport. To obtain an overview of the trade-offs in the change of the transportation mix, the Pareto Frontier was

generated. The model was tested in an instance of a real problem of a Turkish petrochemical company producing ethylene.

Pantuso et al. [37] dealt with the problem of fleet renewal and, in particular, the treatment of uncertainty in the maritime case. Their main contribution is to evaluate if the use of stochastic optimization brings, in fact, better results than deterministic models. The assessment was conducted on the case of Wallenius Wilhelmsen Logistics, one of the largest shipping companies in the world.

Wang et al. [38] also present a chartering problem involving the composition and deployment of the marine fleet, taking into account market uncertainties. The authors propose a two-stage stochastic programming model and present a computational study based on the case of Odfjell, a leading chemical transport company in Bergen, Norway. The authors seek to show how the charter plans produced can change according to the different modeling choices; and also why and how different charter plans affect the company performance.

Siddiqui and Verma [11] deal with the tactical planning of a tanker fleet. This article presents a similar problem with the proposed problem. Oil producers generally meet intercontinental demand through a fleet of ocean oil tankers that not only have very high fixed and operating costs but also present considerable financial risks due to the volatility of oil demand and local freight markets. Thus, most petroleum suppliers maintain a low capacity fleet and manage additional requirements by periodically adjusting a combination of various charter contracts and / or their purchase options. For the problem of periodic adjustment of the fleet, the article proposes a methodology based on the conditional value-at-risk for protection against extreme losses. More specifically, it develops a mixed integer nonlinear programming model, where parameters are estimated through Monte-Carlo simulation to minimize both chartering costs and associated financial risks. The proposed methodology was applied to several instances of the problem and it was noted that the full use of the combination of charter contracts and their purchase options significantly reduces the financial risk due to the volatility of the spot freight market. On the other hand, they substantially increase the company's specific risks (financial risk due to the uncertainties of the demands of oil and oil tankers).

3.3 Other approaches to solving similar problems

This section presents other solution approaches found in transport and chartering problems, which can be directly applied to the proposed problem.

Maisiuk and Gribkovskaia [39] address a problem of supply vessel planning for offshore oil and gas installations through discrete event simulation. The implementation of weekly supply schedules for offshore installations during the year is affected by climatic conditions, influencing on sailing time and service duration at installations. When the contract vessel cannot complete a voyage before the start of the next planned voyage, a vessel from spot market must be hired to execute it. The problem is to evaluate alternative fleet size configurations, taking into account uncertainties in weather conditions and future spot market rates for support vessels.

Caramia and Dell'Olmo [33] cite the use of multi-agent approaches in modeling logistics problems. According to the authors, there are several documented experiments on the

implementation of multi-agent systems to solve transport logistic problems, such as Bergkvist et al. [40], Buchheit et al. [41] and Burckert et al. [42]. However, as also pointed out by Davidsson et al. [43], most of these experiments refer to small-scale experimentation, conducted without using data from real-world problems.

Di Febbraro et al. [44] propose a model framework for cooperation in intermodal freight transport chains as multi-actor systems. In this context, the problem of optimizing freight transportation is decomposed into an appropriate set of subproblems, each representing the operations of an actor that connects using a negotiation scheme. A discrete event model is developed to simulate the system on a continuous horizon basis to explain the dynamics of intermodal freight transport operations. This framework allows planning of intermodal transport chains driven by short/medium term events. The methodology is evaluated using a realistic case study, and the results are compared to the First-Come-First-Served strategy, highlighting the significance of cooperation in systems operating close to capacity.

Sardis et al. [45] propose a semi-automatic e-chartering system in maritime markets. Using a multi-agent system distributed to the Internet Virtual Chartering Markets (MAVCM) in each seaport and satellite information of participating vessels, they provide a mechanism for semi-automatic control and the creation of e-chartering contracts services. The proposed system is based on maritime contracts between shipowners and charterers through the MAVCM infrastructure, maritime services and satellite monitoring.

Parthibaraj et al. [46] propose to develop a sustainable decision model for allocating the ship's capacity to meet shipping demand and to generate a route plan. The work uses multiagent system modeling and an iterative combinatorial auction mechanism with Vickrey-Clarke-Groves payments to insert economically effective ships in the age of information exchange systems. To address the computational complexity of the multiagent system model with auction mechanism, the article proposes an enumerative search algorithm.

3.4 Approaches to related solutions

The articles in this section present solution approaches applied to other problem types which, however, have some correlation with the proposed problem, i.e., that can be applied to similar parts of the problem.

Chou et al. [47] formulated a combined fuzzy multiple criteria decision making and optimization programming model to solve the container transportation demand split problem. There are two stages in this combined model: in the first phase, the rate of division of the container transport demand is calculated using the MCDM (multicriteria fuzzy decision method) method; while in the second phase, an optimization mathematical programming network model is proposed to determine the origin / destination (O-D) for import / export of containers. The use of the proposed model is demonstrated in a case study of Taiwanese ports.

Gomes et al. [48] address the problem of decision support for the selection of an aircraft faced by an airline that is investing in chartering regional flights in Brazil. The problem has eight alternatives to be evaluated under 11 different criteria, the measures of which may be exact, stochastic, or fuzzy. The technique chosen to analyze and then find a solution to the problem is the multicriteria decision support method, called NAIADE (Novel Approach to Imprecise

Assessment and Decision Environments). The method used allows approaching the problems working with quantitative and qualitative criteria under uncertainty and imprecision. Another important advantage of NAIAD in relation to other multicriteria methods is its characteristics of not requiring a prior definition of weights by the decision maker.

Also on air transport, Ozdemir and Basligil [49] study the purchase of aircraft in a Turkish airline using fuzzy numbers. Multicriteria decision techniques, Fuzzy ANP and Choquet integral methods are used for the evaluation and the results of both algorithms are compared using Fuzzy AHP. The main contribution of the study, according to the authors, is to determine the interdependence between the main criteria and subcriteria, the nonlinear relationship between them and the environmental uncertainties.

Gomez Padilla et al. [50] analyze the impact of an option contract for two companies in a supply chain: a retailer and a supplier. With an option contract, the retailer requests a number of units and has the right to modify your order if necessary. The paper presents a model for calculating the performance of an option contract in terms of contract value for the two companies involved. Two cases are analyzed: multiple suppliers and one retailer; and one supplier and one retailer. The performance improvement obtained using this type of contract is compared by simulation.

Using Stackelberg's staging model, which is established based on the assumption that freight forwarders are risk averse, Lei and Zhou [51] analyze the optimal air freight supply, the ideal quantity of option orders, and the options purchased quantity of the intermediary. The analysis shows that air cargo industry under risk aversion applying option contracts can effectively avoid the risks of cost increasing and spot price rising, as well as increase the revenue of the whole system and further reach the Pareto optimal of society.

Hellermann et al. [52] propose the use of option contracts to improve the profitability of cargo airlines, which faces high asset costs and substantial uncertainties on demand. The proposed model seeks to capture the main features of cargo trade between an airline and a freight forwarder and then obtain an optimal transport reservation policy. The model also looks at the impact of overbooking on airline vendor profitability. By applying the model to the real-life booking data of a major cargo carrier, the authors compare the contractual arrangements used by the company with those provided by the model; and analyze, through a numerical study, the impact of overbooking on the parameters of contract and on the profitability of the company.

The article by Hu et al. [53] considers a decentralized supply chain, with a retailer and a manufacturer, where the producer's production yield and the retailer's demand are both stochastic. At the beginning of the selling season, the retailer places an order and buys an option contract with the manufacturer. After the selling season, the excess demand is partially ordered and the retailer exercises his option order and then places an instant order for the backorders. The ideal ordering policy for the retailer and the corresponding production decision for the manufacturer are studied. Numerical examples are performed to show the impact of model parameters on optimal policies.

The research conducted by Nosoohi and Nookabadi [54] considers a supply chain consisting of one supplier and one manufacturer producing a type of product (e.g. innovative products) with a long lead-time of supply, a short selling season and a stochastic demand. The complete production of

the finished product requires two processing operations: initial operation and final operation. The manufacturer performs the initial operation at a deterministic cost. The final operation can be performed by the manufacturer or assigned to an outside company through an auction process. At the time of the supply contract, the final cost of processing (FPC) is estimated as a stochastic variable. The uncertainty about the FPC is removed before the start of the sales period. The study conducted is an attempt to determine how the vendor should place supply orders within the wholesale price, placement, call, and bidirectional options framework. Option contracts offer the manufacturer the flexibility to adjust their initial orders by exercising options purchased after the FPC. Optimized orders were obtained with each option contract, in addition to the equations in which initial and optimal option orders are valid. According to the authors' analysis, if the realized FPC is higher (lower) than a specific level, the manufacturer should decrease (increase) their initial orders. These specific levels were obtained for all types of option contracts. Numerical analysis and managerial perceptions clarify the value of the option contracts considering different parameter settings.

4. SUMMARY AND DISCUSSION

In this section, a summary of the results found in the literature review is presented. In order to do this, we sought to relate the references analyzed throughout the article with the most relevant aspects to the problem and to the search of the solution of the problem. The choice of these aspects is based on the definition and characterization of the problem and its envelopment presented in the first chapter. Table 3 (Appendix) contains the description of each aspect and related publications. In addition to the most relevant aspects, the publications were also related to the different approaches and solution techniques encountered. See Table 4 (Appendix). Table 5 (Appendix) is a cross-referencing of tables 3 and 4, presenting the number of publications for each aspect /approach pair. The same publication can cover more than one aspect and also present more than one solution approach. There were 36 distinct publications (the publications prior to 2008, referenced by other authors, did not appear in the tables). The following is an analysis and a discussion about what the literature offers about the problem and its envelopment.

In publications related to maritime transport, there is interest in themes such as: fleet sizing, ship routing and multimodal transport. The decision on the composition of types of charter contracts, when approached, is treated in a secondary way; except for the article published by Siddiqui and Verma [11].

Long-haul shipping is the type of shipping of most publications found on maritime chartering. Maritime offshore support, which is the subject of the proposed problem, is addressed only by Maisiuk and Gribkovskaia [39], who analyze the impact of uncertainties (weather conditions and freight rates) on travel times and planning of offshore support vessels (OSV); and Adland et al. [27], which present a discussion on the construction of price indexes for the OSV market.

Most of the work on maritime chartering involves studies on chartering price behavior and prediction [27-29, 32]. Only one paper deals with the problem of optimization of the

composition of charter contracts: the article by Siddiqui and Verma [11].

In fact, the problem addressed by Siddiqui and Verma [11] addresses several aspects of the problem proposed in this paper: it is an optimization problem of the mix of charter contracts, which considers the uncertainties related to demand and charter prices and which seeks to minimize charter costs and associated financial risks. However, some important differences for modeling and for choosing the solution approach should be observed:

- (1) The article deals with a fleet of oil tankers whose market (supply-demand ratio) of vessels is quite different from the market for offshore support vessels;
- (2) In the article, the demand to be met by the fleet of ships corresponds basically to the demand for oil, a commodity of well-defined behavior. In the proposed problem, it corresponds to the number of maritime oil production and exploration units demanded by a certain oil exploration and production plan (strategic decision) and the inputs consumed by each maritime unit (the demands of the exploration units have high variability);
- (3) The problem of the article considers an own fleet of ships to meet the regular demand, resorting to the chartering market or options only in case of necessity; in the problem that is the object of this work, the fleet is all chartered, with a certain annual renewal rate, with the aim of optimizing the mix of charter contracts in the renewal of the fleet over time; and
- (4) The time analysis of the article is one year. The problem

demands medium- and long-term chartering plans, with time periods longer than one year.

With respect to solution approaches, Siddiqui and Verma [11] developed a mixed integer nonlinear programming model with conditional risk value to minimize chartering costs and associated financial risks, and used Monte Carlo simulation to generate the stochastic parameters related to oil prices and demand and to the spot rates of chartering. They also used option contracts to mitigate risks due to uncertainties in demand and charter prices.

Also on chartering, two studies on the use of supply contracts with options in air freight supply were analyzed [51, 52]; two studies that use multiagent systems for e-chartering [45] and for capacity allocation and route planning [46]; a qualitative analysis of the criteria for choosing types of charter [16]; a work on multicriteria decision to select chartering aircraft [48] and another on multi-period planning and ship routing [15].

In the literature on chartering price behavior and prediction, most of the analyzes found consider the global chartering market. Specific requirements encountered in local markets that may affect price behavior – such as the priority for national flag vessels required in the Brazilian cabotage market – are not addressed.

The reliability and operating conditions of the ship were important aspects pointed out by Ozer and Cetin [16] in the choice of shipping suppliers. Like these, other qualitative factors pointed out by the transport taker must be considered in the search method for the adequate set of charter contracts.

Table 3. Relevant aspects versus publications

Aspects to consider	Description	Authors
Chartering problems	Problems directly related to chartering theme (maritime or not).	Sardis et al. (2009); Lei and Zhou (2010); Meng and Wang (2011); Ozer and Cetin (2012); Nomikos et al. (2013); Hellermann et al. (2013); Kavussanos et al. (2014); Özpeynirci et al. (2014); Bakkehaug et al. (2014); Gomes et al. (2014); Adland et al. (2016); Adland et al. (2017); Siddiqui and Verma (2017); Parthibaraj et al. (2018) [13 PUBLICATIONS]
Maritime transport: offshore support vessels	Maritime transport market to support of E&P maritime units (OSV). The chartering of vessels of this type is the focus of this work.	Lopes (2011); Aguiar (2013); Ares (2013); Maisiuk and Gribkovskaia (2014); Arpini (2015); ABEAM (2017); Adland et al. (2017) [7 PUBLICATIONS]
Maritime transport: long-haul vessels	Long-haul shipping market, mainly related to commodities such as oil, natural gas and derivatives. Most of the publications on maritime chartering are concerned with long-haul shipping.	Sardis et al. (2009); Meng and Wang (2011); Dinwoodie et al. (2013); Álvarez-Sanjaime et al. (2013a); Álvarez-Sanjaime et al. (2013b); Nomikos et al. (2013); Kavussanos et al. (2014); Özpeynirci et al. (2014); Bakkehaug et al. (2014); Pantuso et al. (2014); Adland et al. (2016); Pantuso et al. (2016); Wang et al. (2017); Siddiqui and Verma (2017); Parthibaraj et al. (2018) [15 PUBLICATIONS]
Local charter market	Many countries have strong restrictions on cabotage shipping (including OSV) and, consequently, chartering market.	Lopes (2011); Ozer and Cetin (2012); Aguiar (2013); Kavussanos et al. (2014); Arpini (2015); Tokcaer e Özpeynirci (2016); ABEAM (2017) [7 PUBLICATIONS]
Reliability of suppliers	The reliability of shipping suppliers (reputation and capacity) is a relevant aspect for charterers.	Ozer and Cetin (2012); Arpini (2015); Parthibaraj et al. (2018) [3 PUBLICATIONS]
Price uncertainties	Volatility of prices of different types of chartering.	Lei and Zhou (2010); Nomikos et al. (2013); Pantuso et al. (2014); Kavussanos et al. (2014); Bakkehaug et al. (2014); Maisiuk and Gribkovskaia (2014); Di Febbraro et al.

Aspects to consider	Description	Authors
		(2016); Adland et al. (2016); Adland et al. (2017); Wang et al. (2017); Siddiqui and Verma (2017) [11 PUBLICATIONS]
Uncertainty of demand	Uncertainties related to the demand for maritime transport: variability of demand for UM's and consumption of each MU, and climatic factors.	Fagerholt et al. (2010); Hellermann et al. (2013); Hu et al. (2014); Pantuso et al. (2014); Bakkehaug et al. (2014); Nosoochi and Nookabadi (2016); Wang et al. (2017); Siddiqui and Verma (2017) [8 PUBLICATIONS]
Chartering prices prediction	Determination of chartering price indices in its various modalities.	Nomikos et al. (2013); Kavussanos et al. (2014); Adland et al. (2016); Adland et al. (2017) [4 PUBLICATIONS]
Risk of not meeting demand	Quantification of risk and impacts of not meeting the demand	Siddiqui and Verma (2017)
Associated financial risks	Expected financial values of the market risks (freight rates) and of the company (not meeting the demand and underutilization of the fleet).	Gomez Padilla et al. (2009); Lei and Zhou (2010); Hellermann et al. (2013); Siddiqui and Verma (2017) [4 PUBLICATIONS]
Minimization of associated costs	The composition of charter contracts to meet the company's maritime transportation needs should be made at the lowest possible cost.	Gomez Padilla et al. (2009); Nosoochi and Nookabadi (2016); Pantuso et al. (2014); Bakkehaug et al. (2014); Wang et al. (2017); Siddiqui and Verma (2017) [6 PUBLICATIONS]
Minimization of risks	The minimization of the aforementioned risks is also one of the objectives pursued by the companies.	Gomez Padilla et al. (2009); Lei and Zhou (2010); Hellermann et al. (2013); Hu et al. (2014); Nosoochi and Nookabadi (2016); Siddiqui and Verma (2017) [6 PUBLICATIONS]
Optimization of the charter contracts mix	Determination of the appropriate mix of charter contracts for types, quantities and contract duration.	Wang et al. (2017); Siddiqui and Verma (2017) [2 PUBLICATIONS]
Mix problems	The problem of determining the most suitable composition of charter contracts can be understood as a classic mix problem, where the best combination of diverse resources is sought.	Fagerholt et al. (2010); Meng and Wang (2011); Pantuso et al. (2014); Özpeynirci et al. (2014); Bakkehaug et al. (2014); Maisiuk and Gribkovskaia (2014); Tokcaer e Özpeynirci (2016); Pantuso et al. (2016); Di Febraro et al. (2016); Wang et al. (2017); Siddiqui and Verma (2017); Parthibaraj et al. (2018) [12 PUBLICATIONS]
Optimization under uncertainties	Considering the uncertainties mentioned above, the presented problem can be treated as an optimization problem under uncertainties, for which the literature presents some solution techniques.	Caramia and Dell'Olmo (2008); Fagerholt et al. (2010); Bakkehaug et al. (2014); Pantuso et al. (2014); Pantuso et al. (2016); Di Febraro et al. (2016); Wang et al. (2017); Siddiqui and Verma (2017) [8 PUBLICATIONS]
Multiobjective / multicriteria analysis	The problem can be formulated as a multiobjective problem (eg minimization of both costs and risks) or as a multicriteria analysis (prioritization of alternative modes of chartering).	Caramia and Dell'Olmo (2008); Chou et al. (2010); Gomes et al. (2014); Tokcaer and Özpeynirci (2016); Ozdemir and Basligil (2016) [5 PUBLICATIONS]

Table 4. Solution approaches versus publications

Solution approach	Description	Authors
Qualitative analysis	Analysis of the problem regarding concepts, perceptions and related theoretical and subjective aspects.	Lopes (2011); Ozer and Cetin (2012); Álvarez-Sanjaimé et al. (2013a); Álvarez-Sanjaimé et al. (2013b); Aguiar (2013); Ares (2013); Dinwoodie et al. (2013); Pantuso et al. (2014); Arpini (2015); ABEAM (2017) [9 PUBLICATIONS]
Price modeling	Statistical and mathematical techniques for predicting and constructing price indices.	Nomikos et al. (2013); Kavussanos et al. (2014); Adland et al. (2016); Adland et al. (2017) [4 PUBLICATIONS]
Heuristic methods	Algorithms that provide solutions without a formal quality limit, generally evaluated empirically in terms of the complexity and quality of the solutions. They are often used in conjunction with other optimization methods to improve the search for solutions.	Caramia and Dell'Olmo (2008); Fagerholt et al. (2010); Bakkehaug et al. (2014); Wang et al. (2017); Parthibaraj et al. (2018) [5 PUBLICATIONS]
Nonlinear mixed integer programming	Mathematical programming (optimization) where the problem presents non-linear correlation between variables, and part of the variables	Siddiqui and Verma (2017)

Solution approach	Description	Authors
	belongs to the set of integers.	
Multiobjective optimization	Optimization techniques for problems with more than one objective function.	Caramia and Dell'Olmo (2008); Chou et al. (2010); Özpeynirci et al. (2014); Tokcaer and Özpeynirci (2016) [4 PUBLICATIONS]
Dynamic programming with scenario generation	Dynamic programming seeks to solve the optimization problem by analyzing a sequence of problems that is simpler than the original problem. This technique can be combined with the generation of scenarios to solve problems under uncertainties (stochastic problems).	Fagerholt et al. (2010); Meng and Wang (2011) [2 PUBLICATIONS]
Stochastic programming (two or multi-stage)	Stochastic programming seeks a solution that is balanced for all possible realizations of uncertainties. At each realization of uncertainty, more information is available, which is known as the stage.	Bakkehaug et al. (2014); Pantuso et al. (2016); Wang et al. (2017) [3 PUBLICATIONS]
Simulation of Monte-Carlo	Method of statistical simulation that allows simulating a process that depends on random variables, and generates sampling experiments.	Fagerholt et al. (2010); Siddiqui and Verma (2017) [2 PUBLICATIONS]
Multiagent systems	It addresses the problem (or part of it) as a system composed of agents, which interact with each other and with the environment and are capable of autonomous actions to meet certain objectives [55].	Caramia and Dell'Olmo (2008); Sardis et al. (2009); Di Febbraro et al. (2016); Parthibaraj et al. (2018) [4 PUBLICATIONS]
Discrete event simulation	Method for simulating the operation of a given real system by means of discrete events that take place over time. Also known as stochastic simulation, it allows the use of stochastic variables to represent the uncertainties inherent to the modeling system.	Maisiuk and Gribkovskaia (2014); Di Febbraro et al. (2016) [2 PUBLICATIONS]
Risk analysis	Risk measures such as value-at-risk (VaR) and conditional value-at-risk (CVaR), can be used to represent the company's risk aversion policy.	Siddiqui and Verma (2017)
Multicriteria Decision Analysis	Methods of hierarchical analysis for problems involving the choice of alternatives, which allow the use of quantitative and qualitative data, tangible or not, for the decision criteria analysis.	Chou et al. (2010); Gomes et al. (2014); Ozdemir and Basligil (2016) [3 PUBLICATIONS]
Supply contracts with options	Also called flexible supply contracts, they bring flexibility to the management of contracted products and services. The use of options reduces the risk of under-utilization and high costs due to price volatility.	Gomez Padilla et al. (2009); Lei and Zhou (2010); Hellermann et al. (2013); Hu et al. (2014); Nosoohi and Nookabadi (2016); Siddiqui and Verma (2017) [6 PUBLICATIONS]
Multi-approach solution	Methods that combine more than one approach aiming at the best solution to the problem. (Heuristic methods combined with other methods are not considered here)	Fagerholt et al. (2010); Di Febbraro et al. (2016); Siddiqui and Verma (2017) [3 PUBLICATIONS]

The optimization techniques were the most used solution approaches in the maritime transport problems where the aspects pointed out in Table 3 were observed. Some techniques with great potential to be used in the proposed problem were identified, such as those that consider the uncertainties in the method itself: dynamic programming with scenario generation [15], multi-stage stochastic programming [35] and two-stage stochastic programming [38]; the technique that addresses uncertainties by combining different methods: mixed integer nonlinear programming, Monte Carlo simulation, and conditional risk analysis [11]; and those that consider more than one objective in the mathematical modeling of the problem: multi-objective optimization [33-34, 36-37].

Other approaches have also been found in this type of problem: discrete event simulation [39], which, in the

modeling process, considers the uncertainties of the problem through events and stochastic variables determined by probability distribution functions; and multiagent systems [33, 44-46], where the agent paradigm is used in the control process of supply and demand for chartering.

Not related to the theme maritime chartering, we searched for works on approaches to treat similar problems to the proposed one. In the literature on multicriteria decision analysis [47-49], studies were found that combine multicriteria decision with optimization and a method that allows the use of quantitative and qualitative criteria decision-making. The work on flexible supply options, or contracts of supply with options [50-54] show that the use of option contracts can minimize risks related to uncertainty of demand and charter prices.

Table 5. Number of publications by aspect (line) and solution approach (column)

	Chartering Problems	Offshore support navigation	Long-haul navigation	Local charter market	Reliability of suppliers	Price uncertainties	Uncertainty of demand	Prediction of charter prices	Risk of not meeting demand	Associated financial risks	Minimization of associated costs	Minimization of risks	Optimization of charter contracts mix	Mix problem	Optimization under uncertainties	Multicriteria / multicriteria analysis
Qualitative analysis	1	5	4	5	2	1	1				1			1	1	
Price modeling	4	1	3	1		4		4								
Heuristic/ metaheuristic methods	1		3		1	2	3				3		1	3	3	1
Nonlinear mixed integer programming	1		1			1	1		1	1	1	1	1	1	1	
Multicriteria optimization	1		1	1										2	1	3
Dynamic programming with scenario generation	1		1											1		
Stochastic programming (two or multi-stage)	1		3			2	2				2		1	3	3	
Simulation of Monte-Carlo	1		1			1	1		1	1						
Multiagent systems	2		2		1	1								2	2	1
Simulation by discrete events		1				2								1		
Risk analysis	1		1			1	1		1	1	1	1	1	1	1	
Multicriteria decision analysis	1													1		3
Supply contracts with options	2		1			2	3			4	2	6				
Multi-approach solution	1		1			2	2		1	1	1	1	1	3	3	

5. CONCLUSIONS

The optimization of the mix of charter contracts (types, quantities and duration) for fleet renewal, subject to uncertainty conditions related to the company (variation of demand) and to the market (variation of charter prices) is a problem of combinatorial optimization under uncertainties, difficult to be treated mathematically and computationally.

The objective of this research was to search the literature for possible solutions to the problem. In the area of maritime transport, there is great interest in issues such as fleet sizing and ship routing. On maritime chartering, most of the work is concerned with the formation and behavior of charter prices. In fact, this is a very relevant topic for the problem presented, but it is only one aspect to be considered. The article by Siddiqui and Verma [11] was the only work found on the optimal composition of charter contracts, which, as shown in the previous section, addresses several aspects but also presents important differences in relation to the problem studied.

The analysis of the characteristics of the problem and its envelopment and the findings of the literature review indicate that the construction of a solution multi-approach method is the best way to treat the complexity of this problem.

A qualitative approach is necessary for the preliminary analysis of the decision criteria and the information for the planning of the experiments. Multicriteria decision-making techniques were found that allow the use of qualitative and quantitative decision criteria. The demand to be met and the related uncertainties must be addressed at its three levels: number of E&P UMs, which is a function of the company's plans for the future; consumption pattern of each type of UM; and, lastly, the number of vessels required, resulting from the two previous levels. The pricing prediction of the various types of charter is also fundamental for the choice of the mix of contracts. The search for methods of quality prediction is a subject much discussed in the literature. There is a consensus that this is not an easy task, especially for offshore support vessel markets, where local shipping restrictions and vessel diversity are considerable. Finally, for the decision of the optimal mix of charter contracts, considering the uncertainties related to the variables, several approaches and techniques with potential of use was identified, such as those that consider the uncertainties in the own method (dynamic programming with scenario generation, stochastic programming of two and several stages); those that consider more than one objective in the mathematical modeling of the problem (multiobjective optimization); and those that address uncertainties by combining with other methods (simulation, multi-agent systems, conditional risk analysis). The first two generally have good results, but they require great computational power when applied to very complex problems. In the combined methods, the processing capacity is mitigated by the greater flexibility of modeling. On the other hand, computational modeling and implementation are more laborious.

As a future work, it is suggested: (a) the study of price prediction techniques and the characteristics of a local market for offshore support vessels (prices, related variables, regulations, etc.) aiming at the development of a predictive model for this Marketplace; and (b) a more in-depth analysis of the solutions found in this work, aiming at the development of a multi-approach method that combines quantitative approaches with qualitative analysis approaches

to adequately address the complexity of the problem.

REFERENCES

- [1] IEA, World Energy Investment 2017. (2017). <https://www.iea.org/publications/wei2017/>, accessed on 15 June, 2019.
- [2] ANP, Exploração e produção de óleo e gás. (2018). <http://www.anp.gov.br/wwwanp/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas>, accessed on 2 May, 2019.
- [3] IHS Markit, Petrodata Offshore Rig Day Rate Trends. (2017). <https://www.ihs.com/products/oil-gas-drilling-rigs-offshore-day-rates.html>, accessed on 6 May, 2019.
- [4] IHS Energy, IHS Petrodata Offshore Marine Monthly - January 2015. (2015). <https://www.ihs.com/products/offshore-marine-monthly-news.html>, accessed on 8 May, 2019.
- [5] ANP, Dados de E&P. (2018). <http://www.anp.gov.br/wwwanp/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/gestao-de-contratos-de-e-p/dados-de-e-p>, accessed on 2 May, 2019.
- [6] Ares G, Logística de apoio offshore – integração e sincronização da cadeia de atendimento às unidades marítimas, ILOS. (2013). <http://www.ilos.com.br/web/logistica-de-apoio-offshore-integracao-e-sincronizacao-da-cadeia-de-atendimento-as-unidades-maritimas/>, accessed on September 13, 2017.
- [7] Arpini BP, Planejamento da logística de suprimento de plataformas offshore por meio de um modelo matemático 2L - CVRP com frota heterogênea e equilíbrio náutico, Universidade Federal do Espírito Santo. (2015). [http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/1688/1/PLANEJAMENTO DA LOGÍSTICA DE SUPRIMENTO DE PLATAFORMAS OFFSHORE POR MEIO DE UM MODELO MATEMÁTICO 2L-CVRP COM FROTA HETEROGÊNEA E EQUILÍBRIO NÁUTICO.pdf](http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/1688/1/PLANEJAMENTO%20DA%20LOGÍSTICA%20DE%20SUPRIMENTO%20DE%20PLATAFORMAS%20OFFSHORE%20POR%20MEIO%20DE%20UM%20MODELO%20MATEMÁTICO%202L-CVRP%20COM%20FROTA%20HETEROGÊNEA%20E%20EQUILÍBRIO%20NÁUTICO.pdf).
- [8] P.H.M. Lopes, Uma Solução para o Problema de Roteamento de Embarcações de Apoio "Offshore" Através da Metaheurística RTR, Universidade Federal do Rio de Janeiro. (2011). <http://pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2011101001.pdf>.
- [9] ANTAQ, RESOLUÇÃO NORMATIVA No 01-ANTAQ, DE 13 FEVEREIRO DE 2015. (2015). http://antaq.gov.br/Portal/pdfSistema/Publicacao/Resolucoes_Normativas/20150806_Resolucao_Normativa_001_2015.pdf.
- [10] Collyer, W.O. (2013). A importância do direito marítimo e da regulação dos transportes e portos para o desenvolvimento da logística. *J. Transp. Lit.*, 7: 194–201. <http://dx.doi.org/10.1590/S2238-10312013000100012>
- [11] Siddiqui, A.W., Verma, M. (2017). A conditional value-at-risk based methodology to intermediate-term planning of crude oil tanker fleet. *Computers & Industrial Engineering*, 113: 405-418. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.09.021>
- [12] Aguiar, R.A. (2013). Estudo do Impacto da Ampliação de Berço e de Área de Pátio no Aumento da Capacidade Operacional de uma Base de Apoio Offshore.

- Universidade Federal do Espírito Santo. <http://repositorio.ufes.br/handle/10/3963>.
- [13] A.B. das E. de A.M. ABEAM, Frota de Embarcações de Apoio Marítimo no Brasil - Agosto / 2017. (2017). <http://www.abeam.org.br/>, accessed on 2 May, 2019.
- [14] Sawik, T. (2018). Supply chain disruption management using stochastic mixed integer programming. Springer International Publishing, Cham. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-58823-0>
- [15] Meng, Q., Wang, T. (2011). A scenario-based dynamic programming model for multi-period liner ship fleet planning. *Transportation Research Part E: Logistics Transportation Review*, 47(4): 401-413. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2010.12.005>
- [16] Ozer, T., Cetin, I.B. (2012). A study on the charter type choice of Turkish General Cargo and Drybulk Shipowners. *The Asian Journal Shipping Logistics*, 28(2): 203-226. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ajsl.2012.08.004>
- [17] Álvarez-SanJaime, Ó., Cantos-Sánchez, P., Moner-Colonques, R., Sempere-Monerris, J.J. (2013). Vertical integration and exclusivities in maritime freight transport. *Transportation Research Part E: Logistics Transportation Review*, 51: 50-61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2012.12.009>
- [18] Álvarez-SanJaime, Ó., Cantos-Sánchez, P., Moner-Colonques, R., Sempere-Monerris, J.J. (2013). Competition and horizontal integration in maritime freight transport. *Transportation Research Part E: Logistics Transportation Review*, 51: 67-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2012.12.008>
- [19] Pantuso, G., Fagerholt, K., Hvattum, L.M. (2014). A survey on maritime fleet size and mix problems. *European Journal of Operational Research*, 235(2): 341-349. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.04.058>
- [20] Dantzig, G.B., Fulkerson, D.R. (1954). Minimizing the number of tankers to meet a fixed schedule. *Naval Research Logistics Quarterly* banner, 1: 217-222. <http://dx.doi.org/10.1002/nav.3800010309>
- [21] Jin, D., Kite-Powell, H.L. (2000). Optimal fleet utilization and replacement. *Transportation Research Part E: Logistics Transportation Review*, 36(1): 3-20. [https://doi.org/10.1016/S1366-5545\(99\)00021-6](https://doi.org/10.1016/S1366-5545(99)00021-6)
- [22] Fagerholt, K., Christiansen, M., Magnus Hvattum, L., Johnsen, T.A.V., Vabø, T.J. (2010). A decision support methodology for strategic planning in maritime transportation. *Omega*, 38(6): 465-474. <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2009.12.003>
- [23] Sherali, H.D., Al-Yakoob, S.M., Hassan, M.M. (1999). Fleet management models and algorithms for an oil-tanker routing and scheduling problem. *IIE Transactions*, 31(5): 395-406. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1007502205917>
- [24] Christiansen, M., Fagerholt, K., Ronen, D. (2004). Ship routing and scheduling: Status and perspectives. *Transportation Science*, 38(1): 1-18. <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.1030.0036>
- [25] Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., Ronen, D. (2007). Chapter 4 Maritime Transportation. in: C. Barnhart, G. Laporte (Eds.), *Transportation (Amst)*, Elsevier, pp. 189-284. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14004-9](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14004-9)
- [26] Dinwoodie, J., Tuck, S., Rigot-Müller, P. (2013). Maritime oil freight flows to 2050: Delphi perceptions of maritime specialists. *Energy Policy*, 63: 553-561. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.08.068>
- [27] Adland, R., Cariou, P., Wolff, F.C. (2017). What makes a freight market index? An empirical analysis of vessel fixtures in the offshore market. *Transportation Research Part E: Logistics Transportation Review*, 104: 150-164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2017.06.006>
- [28] Nomikos, N.K., Kyriakou, I., Papapostolou, N.C., Pouliaxis, P.K. (2013). Freight options: Price modelling and empirical analysis. *Transportation Research Part E: Logistics Transportation Review*, 51: 82-94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2012.12.001>
- [29] Kavussanos, M.G., Visvikis, I.D., Dimitrakopoulos, D.N. (2014). Economic spillovers between related derivatives markets: The case of commodity and freight markets. *Transportation Research Part E: Logistics Transportation Review*, 68: 79-102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2014.05.003>
- [30] Kavussanos, M.G., Visvikis, I.D., Batchelor, R.A. (2004). Over-the-counter forward contracts and spot price volatility in shipping. *Transportation Research Part E: Logistics Transportation Review*, 40(4): 273-296. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2003.08.007>
- [31] Koekebakker, S., Adland, R., Sødal, S. (2007). Pricing freight rate options. *Transportation Research Part E: Logistics Transportation Review*, 43(5): 535-548. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.03.005>
- [32] Adland, R., Cariou, P., Wolff, F.C. (2016). The influence of charterers and owners on bulk shipping freight rates. *Transportation Research Part E: Logistics Transportation Review*, 86: 69-82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2015.11.014>
- [33] Caramia, M., Dell'Olmo, P. (2008). Multi-objective optimization. in: *Multi-Objective Manag. Freight Logist.*, Springer London, London, 2008, pp. 11-36. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84800-382-8_2
- [34] Özpeynirci, Ö., Üçer, K., Tabaklar, T. (2014). Multimodal freight transportation with ship chartering. *Maritime Economics Logistics*, 16(2): 188-206. <http://dx.doi.org/10.1057/mel.2013.24>
- [35] Bakkehaug, R., Eidem, E.S., Fagerholt, K., Hvattum, L.M. (2014). A stochastic programming formulation for strategic fleet renewal in shipping. *Transportation Research Part E: Logistics Transportation Review*, 72: 60-76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2014.09.010>
- [36] Tokcaer, S., Özpeynirci, Ö. (2016). A bi-objective multimodal transportation planning problem with an application to a petrochemical ethylene manufacturer. *Maritime Economics Logistics*, 20(1): 72-78. <http://dx.doi.org/10.1057/s41278-016-0001-4>
- [37] Pantuso, G., Fagerholt, K., Wallace, S.W. (2016). Uncertainty in fleet renewal: A case from maritime transportation. *Transportation Science*, 50(2): 390-407. <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.2014.0566>
- [38] Wang, X., Fagerholt, K., Wallace, S.W. (2017). Planning for charters: A stochastic maritime fleet composition and deployment problem. *Omega*, 79: 54-66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2017.07.007>
- [39] Maisiuk, Y., Gribkovskaia, I. (2014). Fleet sizing for offshore supply vessels with stochastic sailing and service times. *Procedia Computer Science*, 31: 939-948. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.346>
- [40] Bergkvist, M., Davidsson, P., Persson, J.A., Ramstedt, L. (2005). A hybrid micro-simulator for determining the

- effects of governmental control policies on transport chains. *Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation*, 236–247. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-32243-6_19
- [41] Buchheit, M., Kuhn, N., Muller, J.P., Pischel, M. (1992). MARS: Modeling a multiagent scenario for shipping companies. in: *Eur. Simul. Symp.*, Society for Computer Simulation.
- [42] Burckert, H.J., Funk, P., Vierke, G. (2000). An intercompany dispatch support system for intermodal transport chains. in: *Proc. 33rd Annu. Hawaii Int. Conf. Syst. Sci.*, IEEE Comput. Soc., p. 10. <http://dx.doi.org/10.1109/HICSS.2000.926672>
- [43] Davidsson, P., Henesey, L., Ramstedt, L., Törnquist, J., Wernstedt, F. (2005). An analysis of agent-based approaches to transport logistics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 13(4): 255–271. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2005.07.002>
- [44] Di Febbraro, A., Sacco, N., Saeednia, M., Di Febbraro, A., Sacco, N., Saeednia, M. (2016). An agent-based framework for cooperative planning of intermodal freight transport chains. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 64: 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.12.014>
- [45] Sardis, M., Vouyioukas, D., Anagnostopoulos, I. (2009). Semi-automatic e-chartering through multi-agent systems and satellite IP networks. *International Journal Internet Protocol Technology*, 4(3): 193. <http://dx.doi.org/10.1504/IJIPT.2009.028658>
- [46] Parthibaraj, C.S., Subramanian, N., Palaniappan, P.L.K., Lai, K.K.H. (2018). Sustainable decision model for liner shipping industry. *Computer & Operation Research*, 89: 213–229. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2015.12.005>
- [47] Chou, C.C., Kuo, F.T., Gou, R.H., Tsai, C.L., Wong, C.P., Tsou, M.C. (2010). Application of a combined fuzzy multiple criteria decision making and optimization programming model to the container transportation demand split. *Applied Soft Computing*, 10(4): 1080–1086. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2010.05.021>
- [48] Gomes, L.F.A.M., de Mattos Fernandes, J.E., de Mello, J.C.C.B.S. (2014). A fuzzy stochastic approach to the multicriteria selection of an aircraft for regional chartering. *Journal of Advanced Transportation*, 48(3): 223–237. <http://dx.doi.org/10.1002/atr.206>
- [49] Ozdemir, Y., Basligil, H. (2016). Aircraft selection using fuzzy ANP and the generalized choquet integral method: The Turkish airlines case. *Journal Intelligent & Fuzzy Systems*, 31(1): 589–600. <http://dx.doi.org/10.3233/IFS-162172>
- [50] Gomez Padilla, A., Mishina, T., Gomez Padilla, A., Mishina, T., Gomez Padilla, A., Mishina, T. (2009). Supply contract with options. *International Journal of Production Economics*, 122(1): 312–318. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.06.006>
- [51] Lei, L.C., Zhou, J. (2010). Stackelberg game model of capacity options for air cargo under risk aversion. *Xitong Gongcheng Lilun Yu Shijian/System Eng. Theory Pract.*, 30: 264–271. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77952383329&partnerID=40&md5=7533f45a0aa195f37dc4c52fea9c114a>
- [52] Hellermann, R., Huchzermeier, A., Spinler, S. (2013). Options contracts with overbooking in the air cargo industry. *Decision Science*, 44(2): 297–327. <http://dx.doi.org/10.1111/deci.12008>
- [53] Hu, F., Lim, C.C., Lu, Z. (2014). Optimal production and procurement decisions in a supply chain with an option contract and partial backordering under uncertainties. *Applied Mathematics Computer*, 232: 1225–1234. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2014.01.149>
- [54] Nosoohi, I., Nookabadi, A.S. (2016). Outsource planning through option contracts with demand and cost uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 250(1): 131–142. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.10.030>
- [55] IEA, World Energy Investment 2017. (2017). <https://www.iea.org/publications/wei2017/>. accessed on 2 May, 2018.