

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

EMANUEL FINATTO

**MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA OTIMIZAÇÃO DO MIX DE
AFRETAMENTO DE EMBARCAÇÕES *OFFSHORE* COM RESTRIÇÃO DE RISCO
DE MERCADO *SPOT***

BENTO GONÇALVES

2020

EMANUEL FINATTO

**MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA OTIMIZAÇÃO DO MIX DE
AFRETAMENTO DE EMBARCAÇÕES *OFFSHORE* COM RESTRIÇÃO DE RISCO
DE MERCADO *SPOT***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador Prof. Dr. Leonardo Dagnino
Chiwiacowsky

BENTO GONÇALVES

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

F491m Finatto, Emanuel

Modelo de programação linear para otimização do mix de afretamento de embarcações *offshore* com restrição de risco de mercado *spot* [recurso eletrônico] / Emanuel Finatto. – 2020.

Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2020.

Orientação: Leonardo Dagnino Chiwiacowsky.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Contratos de afretamento. 2. Logística. 3. Indústria petrolífera. I. Chiwiacowsky, Leonardo Dagnino, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 658.788

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Paula Fernanda Fedatto Leal - CRB 10/2291

EMANUEL FINATTO

**MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA OTIMIZAÇÃO DO MIX DE
AFRETAMENTO DE EMBARCAÇÕES *OFFSHORE* COM RESTRIÇÃO DE RISCO
DE MERCADO *SPOT***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador Prof. Dr. Leonardo Dagnino
Chiwiacowsky

Aprovado em

Banca Examinadora

Prof. Dr. Marcelo Oliveira de Souza
Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRAS

Prof. Dr. José Vicente Canto dos Santos
Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Prof. Dr. Gabriel Vidor
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Alexandre Mesquita
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

A contratação de embarcações de apoio *offshore* é um desafio para companhias de petróleo, pois representam até 80% do custo de sua cadeia logística, visto que em muitos casos a extração do petróleo ocorre em alto mar. O presente trabalho visa à implementação de um modelo de programação linear para a otimização do mix de afretamento de embarcações *offshore* utilizando contratos TCP e do mercado *spot*, considerando o risco *CVaR* como um parâmetro de decisão para contratos *spot*. Para a resolução do problema, foi desenvolvido um modelo de programação linear utilizando a ferramenta CPLEX, com o qual foram avaliados cenários definidos com base na demanda por embarcações e nas taxas de afretamento, sendo considerados horizontes de análise de até 60 meses. Foi possível verificar uma redução de até 5,52% no custo do mix afretamento das embarcações, o que representa mais de 170 bilhões de dólares em um período de 5 anos. Os melhores resultados foram obtidos com a utilização combinada de contratos na modalidade TCP e *spot*, com o uso da restrição de risco proposta neste trabalho.

Palavras-chave: Mix de Afretamento, Embarcações de Apoio *Offshore*, *CVaR*, Medida de Risco, Programação Linear.

ABSTRACT

Hiring offshore support vessels is a challenge for oil companies, as they represent up to 80% of the cost of their logistics chain, since in many cases oil extraction takes place on the high seas. The present work aims to implement a linear programming model to optimize the offshore vessel charter mix using TCP and spot market contracts, considering CVaR risk as a decision parameter for spot contracts. To solve the problem, a linear programming model was developed using the CPLEX tool, with which scenarios defined based on the demand for vessels and charter rates were evaluated, being considered horizons of analysis of up to 60 months. It was possible to verify a reduction of up to 5.52% in the cost of the vessel chartering mix, which represents more than 170 billion dollars in a period of 5 years. The best results were obtained combining the use of contracts in TCP and spot mode, using risk restriction proposed in this work.

Palavras-chave: Chartering mix, Offshore Support Vessels, CVaR, Risk Measurement, Linear Programming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fatores para determinar a composição do mix de contratos	12
Figura 2 – Número de contratos de afretamento na modalidade <i>spot</i> no Brasil – novembro/2016 a outubro/2017.....	17
Figura 3 – Histórico do valor do petróleo em US\$.....	19
Figura 4 – Valores médios mensais das taxas diárias de frete marítimo no Brasil	20
Figura 5 – Quantidade de publicações por ano.....	22
Figura 6 – Etapas de um estudo de modelagem e simulação	29
Figura 7 – Horizonte de planejamento do otimizador de mix contratual	31
Figura 8 – Representação gráfica do significado de <i>VaR</i> e <i>CVaR</i>	37
Figura 9 – Representação da incerteza da demanda através de valores de mínimo, máximo e esperado e restrição de disponibilidade.....	39
Figura 10 – Demanda por embarcações e Disponibilidade de embarcações.....	42
Figura 11 – Configuração 1: taxas de afretamento oscilatórias.....	44
Figura 12 – Configuração 2: taxas de afretamento crescentes	44
Figura 13 – Configuração 3: taxas de afretamento decrescentes.....	45
Figura 14 – Mix de contratação cenário 3.1.1	50
Figura 15 – Mix de contratação cenário 3.1.2	51
Figura 16 – Mix de contratação cenário 3.1.3	52
Figura 17 – Mix de contratação - cenário 1	54
Figura 18 – Mix de contratação - cenário 2.....	55
Figura 19 – Mix de contratação - cenário 3.....	56
Figura 20 – Mix de contratação - cenário 4.....	57
Figura 21 – Mix de contratação - cenário 5.....	58
Figura 22 – Mix de contratação - cenário 6.....	59
Figura 23 – Mix de contratação - cenário 7.....	60
Figura 24 – Mix de contratação - cenário 8.....	61
Figura 25 – Mix de contratação - cenário 9.....	62
Figura 26 – Novas taxas de contratação <i>spot</i>	66
Figura 27 – Mix de contratação com restrição de disponibilidade.....	67
Figura 28 – Mix de contratação com 60 vigências e taxas oscilantes	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Artigos e trabalhos relacionados ao tema da presente dissertação	24
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação das taxas de utilização e preços no mercado internacional	20
Tabela 2 – Número de trabalhos relacionados ao termo <i>Fleet Management Optimization</i>	21
Tabela 3 – Número de trabalhos relacionados aos termos <i>Maritime Fleet Size</i> e <i>Mix Problems</i>	21
Tabela 4 – Número de trabalhos relacionados ao termo <i>Marine Fleet Optimization</i>	22
Tabela 5 – Demanda por embarcações e Disponibilidade de embarcações	43
Tabela 6 – Tabela de possibilidades de contrato	47
Tabela 7 – Comparativo de cenários com taxas de afretamento crescentes	63
Tabela 8 – Comparativo de cenários com taxas de afretamento decrescentes	64
Tabela 9 – Comparativo de cenários com taxas de afretamento oscilantes.....	65
Tabela 10 – Comparativo de cenários com taxas de afretamento oscilantes e novo <i>spot</i>	66
Tabela 11 – Comparativo de quantidade de vigências TCP	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHTS	<i>Anchor Handling and Tug Supply</i>
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
CB	<i>Crewboat</i>
CP	Curto Prazo
CVaR	<i>Conditional Value at Risk</i>
E&P	Exploração e Produção
EBN	Empresa Brasileira de Navegação
EUA	Estados Unidos da América
IEA	International Energy Agency
LP	Longo Prazo
MVP	<i>Mean-Variance Portfolio</i>
OSRV	<i>Oil Spill Response Vessel</i>
OSV	<i>Offshore Supply Vessel</i>
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
PSV	<i>Platform Supply Vessel</i>
TBP	Toneladas de Porte Bruto
TCP	<i>Time Charter Party</i>
UCS	Universidade de Caxias do Sul
UT	<i>Utility Boat</i>
VaR	<i>Value at Risk</i>
VCP	<i>Voyage Charter Party</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Contextualização.....	12
1.1.1	Demanda por embarcações	12
1.1.2	Regulamentação do transporte de cabotagem	14
1.1.2.1	Afretamento por Tempo	14
1.1.2.2	Afretamento por Viagem	15
1.1.3	Preços de afretamento	15
1.2	Definição de mix de contrato e análise de risco	18
1.3	Justificativa	18
1.3.1	Justificativa teórica.....	19
1.3.2	Justificativa prática	23
1.4	Questão de pesquisa.....	25
1.5	Objetivos.....	26
1.5.1	Objetivo geral.....	26
1.5.2	Objetivos específicos	26
1.6	Estrutura do texto.....	27
2	MÉTODO	28
2.1	metodologia de pesquisa.....	28
2.2	Etapas do Método	28
2.3	Definição do Problema	30
2.3.1	Modelagem conceitual	31
2.3.2	Contratos por tempo.....	32
2.3.3	Contratos <i>spot</i>.....	33
2.3.4	Modelagem conceitual do Risco em contratação <i>spot</i>	33
2.3.4.1	Teoria de Markowitz.....	34
2.3.4.2	Value at Risk (VaR).....	35
2.3.4.3	Conditional Value at Risk (CVaR).....	35
2.3.5	Demanda por embarcações de apoio <i>offshore</i>	38
2.4	modelo MATEMÁTICO	39
2.5	Solução do modelo DE OTIMIZAÇÃO	41
2.5.1	Análise e tratamento dos dados de entrada.....	41

2.5.2	Otimização do modelo	46
3	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	48
3.1	Experimentos de Validação	48
3.1.1	Contratos de 2 meses e 4 anos.....	49
3.1.2	Contratos de 2 meses, 4 anos e <i>spot</i> sem restrição de risco	50
3.1.3	Contratos de 2 meses, 4 anos e <i>spot</i> com restrição de risco.....	51
3.1.4	Análise dados da validação	52
3.2	Simulação de Cenários	53
3.2.1	Todos os tipos de contrato TCP e sem contratos <i>spot</i>	54
3.2.1.1	Cenário 1 – taxas de afretamento crescentes	54
3.2.1.2	Cenário 2 – taxas de afretamento decrescentes	54
3.2.1.3	Cenário 3 – taxas de afretamento oscilantes.....	55
3.2.2	Todos os tipos de contrato TCP, com contratos <i>spot</i> e sem restrição de risco	56
3.2.2.1	Cenário 4 – taxas de afretamento crescentes	56
3.2.2.2	Cenário 5 – taxas de afretamento decrescentes	57
3.2.2.3	Cenário 6 – taxas de afretamento oscilantes.....	58
3.2.3	Todos os tipos de contrato TCP, com contratos <i>spot</i> e com restrição de risco.....	59
3.2.3.1	Cenário 7 – taxas de afretamento crescentes	59
3.2.3.2	Cenário 8 – taxas de afretamento decrescentes	60
3.2.3.3	Cenário 9 – taxas de afretamento oscilantes.....	61
3.2.4	Análise dos resultados	62
3.2.5	Restrição de disponibilidade.....	66
3.2.6	Uso de contratos TCP com múltiplas vigências	67
4	CONCLUSÃO	70
4.1	trabalhos futuros	72
	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICE A - Código CPLEX	77

1 INTRODUÇÃO

A Agência Internacional de Energia (IEA) afirma que até meados de 2020 a demanda por óleo continuará crescendo de maneira robusta (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018). Após 2020, apesar do grande apelo pelo uso de fontes alternativas de energia, como, por exemplo, a eletricidade para veículos de passageiros, outros setores terão impulso suficiente para manter a demanda de petróleo em crescimento até o ano de 2040 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017).

Com a retomada do crescimento da demanda global por petróleo, depois de uma queda brusca nos investimentos em *upstream* (de extração) de 25% em 2015 e de 26% em 2016, decorrentes de uma baixa na demanda mundial por petróleo nesse período, a IEA vislumbra um problema a longo prazo, prevendo que os atuais investimentos em *upstream* não serão suficientes para suprir a demanda de petróleo no ano de 2023. Países como China, México e Venezuela vêm reduzindo a produção de petróleo devido aos baixos investimentos verificados nos últimos anos. Em contrapartida, Brasil, Canadá e Noruega, juntamente com os Estados Unidos, vêm contribuindo para o crescimento do fornecimento desta matéria-prima, se tornando figuras importantes no cenário mundial (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018).

De acordo com o relatório da IEA de 2013, espera-se que a produção de petróleo no Brasil triplique até 2035 (ARPINI, 2015). No ano de 2017, o Brasil estava situado na 10ª posição do ranking mundial de extração de petróleo, após o acréscimo de 4,8% no volume de óleo produzido, totalizando 2,7 milhões de barris/dia (3% do total mundial). Neste mesmo ano, as reservas totais de petróleo do Brasil foram contabilizadas em 23,6 bilhões de barris, volume 4,1% maior que em 2016. Por sua vez, as reservas comprovadas totalizaram 12,8 bilhões de barris, representando um aumento de 1,3% em relação ao ano de 2016, dos quais 597 milhões em terra e 12,2 bilhões de barris no mar, ou seja, mais de 95% das reservas de petróleo do Brasil, hoje, estão sob o leito marítimo (MIGUEL *et al.*, 2018).

Por conta das características das reservas de petróleo em território nacional, a exploração de petróleo no Brasil se fundamenta principalmente na exploração em águas profundas, nas quais se estabelecem unidades marítimas *offshore*, podendo ser de diferentes tipos e finalidades distintas, representadas por plataformas e sondas. Essas unidades marítimas, possuem demanda regular de suprimentos cujo abastecimento é realizado por uma frota de embarcações de apoio *offshore* (ARPINI, 2015). Essas embarcações formam uma rede complexa de logística de suprimentos, combustível e pessoas. Composto os custos dessa operação, apenas a contratação de navios chega na casa dos 600 milhões de dólares ao ano

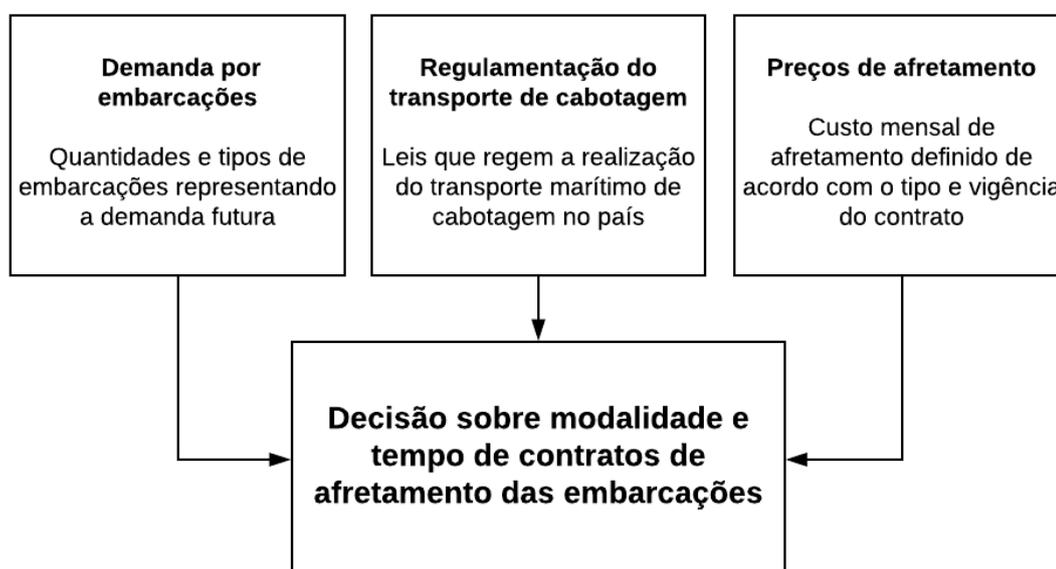
(IACHAN, 2009). Devido a isso, a logística de apoio *offshore* vem se tornando uma nova área de estudo no segmento de petróleo e gás (ARPINI, 2015), e carece de atenção especial, não apenas porque representa até 80% do custo total da cadeia, mas devido à complexidade das atividades e decisões envolvidas. Neste contexto, é preciso decidir sobre os tipos de embarcações necessários ao apoio marítimo, as quantidades exigidas de cada um e as formas de contratação destas embarcações, isto é, as modalidades de contratos e respectivas vigências para cada embarcação (SOUZA, 2019).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Do ponto de vista do tomador de decisões quanto à contratação de embarcações de apoio *offshore*, podem ser destacados três principais fatores conforme representado na Figura 1.

Os fatores de demanda por embarcações, regulamentação e preços de afretamento compõem aspectos relevantes na definição do problema de decisão, onde cada um tem um papel na escolha do decisor a respeito da modalidade e dos tempos de contratos de afretamento das embarcações de apoio *offshore*.

Figura 1 – Fatores para determinar a composição do mix de contratos



Fonte: Elaborado pelo autor

1.1.1 Demanda por embarcações

Operações de apoio *offshore* englobam as atividades relacionadas a armazenamento e transporte de suprimentos dos mais variados tipos, tamanhos e pesos. O transporte destes suprimentos é essencial para a execução adequada das atividades de exploração e produção

(E&P) realizadas nas plataformas *offshore*. Por conta da variedade de itens transportados, embarcações com diferentes especialidades são demandadas (SOUZA, 2019).

Conforme o tipo de suprimento a ser transportado, uma classe diferente de embarcação é designada. A classe de embarcações mais utilizada é o *Platform Supply Vessel* (PSV), embarcações de propósitos variados, cuja capacidade varia de 1000 a 6000 Toneladas de Porte Bruto (TBP). As mais comuns são PSV 1000, PSV 3000 e PSV 4500 (ARPINI, 2015).

Além desta classe, outros tipos de embarcações também merecem destaque:

- *Utility Boat* (UT): supridor de pequeno porte, mais veloz que o PSV, usado para efetuar entregas rápidas de carga;
- *Anchor Handling and Tug Supply* (AHTS): utilizado para rebocar e posicionar plataformas, e também no transporte de suprimentos;
- *Crewboat* (CB): transporta tripulantes para as plataformas;
- *Oil Spill Response Vessel* (OSRV): é usado no combate ao derramamento de óleo.

No presente trabalho, o foco é dado às embarcações do tipo PSV que, embora em diferentes capacidades, terão suas capacidades abstraídas para uma demanda genérica por embarcações, levando em conta incertezas relacionadas a quantidades futuras necessárias.

Uma empresa produtora de petróleo precisa ter a sua disposição, em todo o momento, uma frota de embarcações suficiente para atender às demandas das unidades marítimas, uma vez que os custos de não atendimento podem ser incalculáveis (SOUZA, 2019). Por outro lado, devido às constantes mudanças de cenário econômico, relacionadas a variações no mercado de petróleo e atividade de exploração e produção (E&P), e também devido à estratégia da empresa, a frota de embarcações de apoio *offshore* precisa ser flexível, sob a pena de incorrer em custos incompatíveis com as receitas, devido à empresa estar com embarcações ociosas (SOUZA, 2019).

Entretanto, outras empresas também atuam no mercado na busca por embarcações de apoio *offshore*, contratando fornecedores de acordo com suas próprias estratégias. Como consequência, em certas condições, a oferta pode se tornar escassa. Por isso, o modelo de otimização desenvolvido precisa considerar as incertezas relacionadas à demanda, decorrente da efetivação ou não da política estratégica da empresa, e as relacionadas aos preços, decorrente da dinâmica do mercado de embarcações *offshore*, devendo ser capaz de indicar a política de contratação que minimize o custo total de contratação (ARPINI, 2015; IACHAN, 2009; SOUZA, 2019).

1.1.2 Regulamentação do transporte de cabotagem

Em um sentido amplo, existem dois modelos principais de regulamentação do transporte de cabotagem:

- Cabotagem Restrita: no regime restrito, a presença de navios e tripulação de outros países é proibida por lei. Um regime como este estipula que o transporte nacional só pode ser feito por barcos construídos, de posse e operados por cidadãos de determinado país. Um exemplo desse tipo de regulamentação para o transporte de cabotagem é o que acontece nos EUA (AGAMA; ALISIGWE, 2018).
- Cabotagem relaxada ou liberal: ao contrário do regime restrito, neste modelo a regulamentação não impede o envolvimento de outros países, mas, estabelece restrições ou requisitos para contratação de barcos e tripulação estrangeira (AGAMA; ALISIGWE, 2018).

No Brasil, por exemplo, a cabotagem é relaxada, porém ainda está entre as mais rígidas do mundo. Segundo a ANTAQ (2015), o afretamento de embarcação estrangeira é permitido, porém este deve ser feito apenas por Empresa Brasileira de Navegação (EBN) e somente obedecendo alguns critérios específicos, entre os quais estão:

- i. não existir embarcação de bandeira brasileira disponível;
- ii. ser realizado nas modalidades *Time Charter Party* (TCP) e *Voyage Charter Party* (VCP), isto é, por tempo ou por viagem, respectivamente;

A Resolução Normativa N° 01 da ANTAQ¹, de 13/02/2015, estabelece os critérios e restrições para afretamento por EBN na navegação de apoio marítimo. Essas restrições dificultam o processo de contratação de afretamento de embarcações uma vez que o grande número de condições e exigências faz com que os processos de contratação de afretamento sejam demorados e dispendiosos no país (MACIEL *et al.*, 2014; SOUZA, 2019).

1.1.2.1 Afretamento por Tempo

O afretamento por tempo é a modalidade contratual onde o afretador recebe a embarcação pronta para a operação, para operá-la por tempo determinado na data acordada em contrato. Normalmente, para referir este tipo de contrato se utiliza a sigla TCP que corresponde

¹ <http://portal.antaq.gov.br/>

às iniciais da denominação desta modalidade na língua inglesa: *Time Charter Party*. Nessa modalidade contratual, as obrigações do fretador são: manter a embarcação tripulada e com todos os equipamentos em perfeito funcionamento, a fim de garantir a sua plena operacionalidade. Por parte do afretador, cabe o pagamento do aluguel da embarcação, bem como todas as despesas relativas às viagens realizadas (VIEIRA, 2014).

Esta modalidade de contrato é normalmente utilizada quando existe, por parte do afretador, uma certeza da necessidade de transporte por um determinado período, pois ele tem a garantia do custo durante todo o período de contrato. Isso pode ser interessante em momentos de alta de preços do mercado, mas pode significar grandes perdas se houver queda dos preços no mercado de afretamento (SOUZA, 2019).

1.1.2.2 Afretamento por Viagem

O afretamento por viagem é a modalidade contratual onde a obrigação do fretador é colocar o todo, ou parte, de uma embarcação com tripulação, à disposição do afretador para efetuar transporte em uma ou mais viagens. Para se referir a esta modalidade de contrato, é normalmente utilizada a sigla VCP, do inglês: *Voyage Charter Party*. Esses contratos são também conhecidos como contratos *spot* (SOUZA, 2019).

Nessa modalidade contratual, o afretador não interfere na operação da embarcação. Esta permanecerá sob total controle do fretador, 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, que variam de acordo com a legislação de cada país (VIEIRA, 2014).

1.1.3 Preços de afretamento

A previsão do comportamento dos preços de afretamento é de fundamental importância para as decisões relativas à forma e ao tempo dos contratos de embarcações de apoio *offshore*. A análise de preços do mercado de afretamento é substancialmente diferente daquela realizada no mercado financeiro, onde o volume de transações é grande e os ativos são semelhantes – no mercado financeiro os produtos são expostos de maneira clara e direta – permitindo a derivação direta e quase contínua dos índices que medem as tendências de preços. Já no contexto de contratação de embarcações de apoio *offshore*, o mercado possui baixa liquidez na realização das contratações, isto é, os contratos são relativamente longos (durando até alguns anos) e o

intervalo entre duas contratações também é longo. Além disso, cada contrato firmado não costuma apresentar características semelhantes aos demais negociados anteriormente (ADLAND; CARIU; WOLFF, 2016; SOUZA, 2019).

Além das diferenças em relação ao mercado financeiro, o mercado de navios de apoio *offshore* – do inglês *Offshore Support Vessels* (OSV) – é muito diferente do mercado tradicional de navegação de longas distâncias (SOUZA, 2019). Os OSV suportam atividades logísticas de fundamental importância para a E&P de petróleo e gás e os tipos de navios existentes são bastante heterogêneos em termos de especificação técnica, podendo transportar apenas um tipo de carga ou, ainda, diferentes tipos de carga ao mesmo tempo. Essas características dificultam a criação de índices mais claros de preços para o mercado (ADLAND; CARIU; WOLFF, 2016; SOUZA, 2019).

As restrições impostas pela regulamentação de cabotagem de alguns países, como apresentado anteriormente, restringem a contratação de OSV, impondo condições que se refletem em oferta, preço ou duração de contratos. Portanto, a formação da frota de navios afretados, além das especificidades da demanda a ser atendida e da regulamentação do transporte marítimo vigente no país, é fortemente impactada pelo comportamento dos preços de afretamento (SOUZA, 2019).

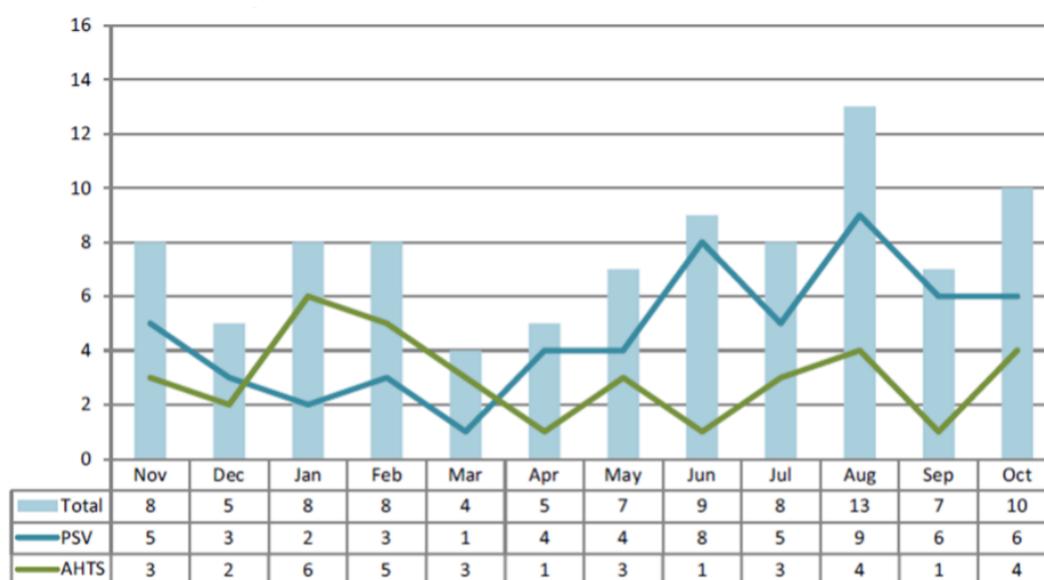
Contratos TCP de longo prazo tendem a ser mais baratos do que contratos TCP de prazos menores, mas justamente por serem normalmente de longo prazo comprometem as partes por um período mais longo. Durante esse período de contrato, podem haver variações acentuadas do valor de mercado desta modalidade de contrato, podendo ser algo positivo do ponto de vista do afretador caso o valor da taxa de afretamento tenha aumentado em relação ao negociado, e pode ser algo negativo caso o valor da taxa de afretamento diminua, pois não abre margem para nova negociação (SOUZA, 2019; VIEIRA, 2014).

Contratos *spot*, por sua vez, podem ser mais caros ou mais baratos que contratos por tempo, devido a sua natureza altamente dependente das condições climáticas e das características locais bem como de fatores de mercado como preço do barril de petróleo e demanda por embarcações, gerando altíssima volatilidade (ADLAND; CARIU; WOLFF, 2017). Porém, caso o valor da taxa de afretamento seja menor em uma janela curta de tempo, isso permitiria a celebração de um novo contrato, agora de longo prazo, em um momento onde o seu valor esteja mais propício.

As restrições impostas pela regulamentação de cabotagem de alguns países, como por exemplo o Brasil, dificultam a contratação de embarcações de apoio *offshore* na modalidade *spot*. Por outro lado, a realização das novas rodadas de concessão para embarcações PSV e

AHTS ocorridas no ano de 2017, trouxeram novas perspectivas para o mercado. Por exemplo, no mês de outubro deste ano, foram realizados 10 novos contratos de *spot* no Brasil, sendo seis de PSV e quatro de AHTS (SCANBRASIL, 2017). Esses números abrem novas perspectivas ao mercado brasileiro de afretamento de embarcações de apoio marítimo. Isso mostra que contratos de modalidade *spot* começam a se mostrar uma opção viável de contratação no contexto brasileiro. A Figura 2 apresenta, mês a mês, o número de contratos na modalidade *spot* de embarcações PSV e AHTS realizados no país, no período entre novembro/2016 e outubro/2017.

Figura 2 – Número de contratos de afretamento na modalidade *spot* no Brasil – novembro/2016 a outubro/2017



Fonte: (SCANBRASIL, 2017)

Devido à complexidade do cenário de preços no mercado de apoio *offshore*, com exigência de análise da atratividade do preço atual e a previsão de preços futuros, alguns agentes especializados surgem no mercado como, por exemplo: Clarkson Research², Drewry Shipping Consultants³ e McQuilling Partners⁴. No mercado nacional, informações análogas encontram-se compiladas em relatórios da Brazilship/Scanbrasil Comércio Marítimo⁵ (SOUZA, 2019).

² <https://www.clarksons.com/services/research/shipping-and-trade/>

³ <https://www.drewry.co.uk/>

⁴ <https://www.mcquilling.com/>

⁵ <https://www.brazilship.com.br/>

1.2 DEFINIÇÃO DE MIX DE CONTRATO E ANÁLISE DE RISCO

Conforme descrito anteriormente, a definição do mix ótimo de contratos de embarcações *offshore* resulta da correta avaliação dos fatores preço, demanda e exigências legais. Em virtude das incertezas inerentes aos dois primeiros fatores, o decisor enfrenta também o problema de quantificar o risco na escolha do conjunto de contratos, ou seja, o problema do mix ótimo de contratos pode ser entendido como um problema de seleção de portfólio (SIDDIQUI; VERMA, 2017). O problema de seleção de portfólio foi introduzido por Markowitz (1952), estabelecendo uma base fundamental para a análise de contratação de ativos em um único período.

Como enfatizado anteriormente, companhias de petróleo que utilizam uma frota de embarcações de apoio marítimo em suas operações estão expostas a riscos financeiros decorrentes da volatilidade nas taxas de afretamento. Entretanto, mesmo nesses cenários, é possível empregar uma política de controle de riscos aplicando restrições ao risco aceito enquanto busca-se minimizar o custo de afretamento (SIDDIQUI; VERMA, 2017).

Abordagens mais atuais de métodos que buscam modelar o risco são descritas no trabalho de Banihashemi et al. (2018). Em seu artigo, os autores descrevem a evolução do uso de técnicas mais recentes e que agregam medidas de variância conforme proposto por Markowitz (1952). Banihashemi et al. (2018) também mostram que estudos mais recentes introduziram outras medidas de risco, além da variância, como, por exemplo, *Value-at-Risk* (VaR), *Conditional Value-at-Risk* (CVaR), *Worst Case*, *downside coefficient*, e *semi-variância*, entre outros. Porém, como referido em Siddiqui et. al. (2017), muitas dessas medidas têm sido criticadas por vários motivos lógicos e técnicos, como: não capturar eventos raros e extremos cuja probabilidade de ocorrência se encontra na cauda da distribuição de probabilidade, e por não serem coerentes na sua forma de modelagem. Por isso, Siddiqui et. al. (2017) sugerem como estratégia mais indicada o uso da medida CVaR, onde a política de aversão ao risco leva em conta a soma ponderada dos CVaR durante todo o horizonte de planejamento.

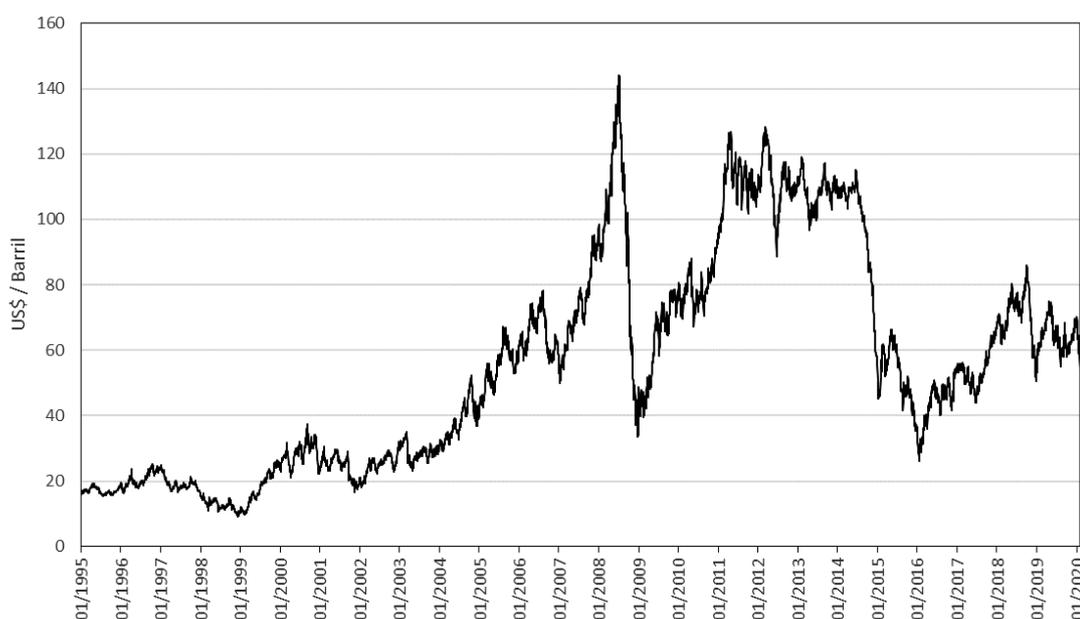
1.3 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho apresenta sua justificativa em duas frentes distintas, sendo essas uma justificativa teórica e outra prática.

1.3.1 Justificativa teórica

Intrinsicamente ligado ao custo de uma embarcação de apoio *offshore*, o valor do barril de petróleo tem oscilado muito nos últimos anos, variando de US\$ 115 em junho 2014 para US\$ 60 em janeiro 2020, conforme apresentado na Figura 3. As variações no preço do barril do petróleo, devido à sua influência sobre as decisões estratégicas das empresas produtoras, podem fazer com que haja um impacto, nem sempre direto ou proporcional, na demanda por embarcações. Esse impacto também acontece, normalmente, com um certo atraso temporal (BORDALO; DORES, 2014). Com a redução da demanda por petróleo, mais embarcações ficam disponíveis para contratação e, com isso, percebe-se uma correlação direta entre o preço do barril do petróleo e o custo da diária de uma embarcação de apoio *offshore*. Esta relação foi explicada por Bordalo e Dore (2014), que a investigaram e concluíram que as perspectivas no setor de apoio *offshore* no Brasil estão fortemente correlacionadas à evolução dos preços do petróleo nos próximos anos.

Figura 3 – Histórico do valor do petróleo em US\$



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Tabela 1, é apresentada uma comparação entre taxa de utilização e preços de diárias no mercado internacional de apoio *offshore* em dois períodos distintos, para dois diferentes tipos de embarcação, mostrando que no mercado internacional, entre Abril de 2013 e Abril de 2015, houve variação de até 69% no preço de afretamento de embarcações do tipo PSV e até 51% no preço de afretamento de embarcações do tipo AHTS. Embora no Brasil haja menos sensibilidade à volatilidade do preço de contratação de embarcações de apoio *offshore* do que

há no mercado internacional, como explicam Bordalo e Dores (2014), o mercado de apoio *offshore* é um mercado milionário, podendo um barco ocioso custar cifras na casa de 7 milhões de dólares por ano.

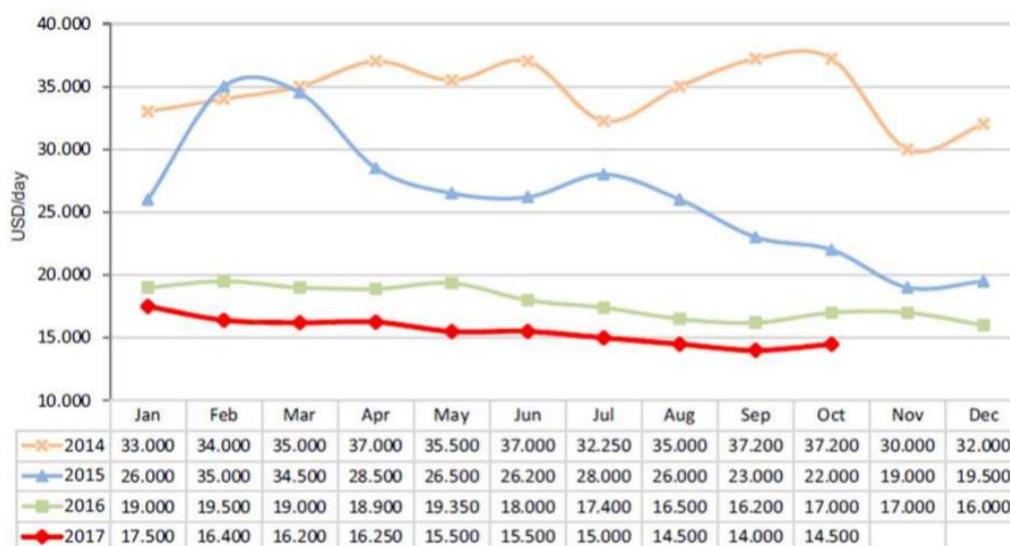
Tabela 1 – Comparação das taxas de utilização e preços no mercado internacional

	Taxa de utilização (%)		Taxa de afretamento – média janeiro a junho (US\$ mil)		
	Abr. 2013	Abr. 2015	2013	2015	Varição
PSV de médio porte	72	50	19,31	5,97	69%
PSV de grande porte	84	71	21,12	7,29	65%
AHTS de médio porte	65	55	34,94	20,82	40%
AHTS de grande porte	66	63	60,70	29,58	51%

Fonte: adaptado de (BORDALO; DORES, 2014)

Observando-se a Figura 4, nota-se que, assim como no mercado internacional, no mercado Brasileiro os preços oscilaram fortemente entre os anos de 2014 e 2015. A partir de abril/2015, nota-se uma forte queda dos preços, principalmente entre julho/2015 e novembro/2015, passando de uma média de U\$28 mil/dia para U\$19 mil/dia. Em 2017, a queda dos preços foi menos significativa, chegando ao mês de outubro com um leve aumento.

Figura 4 – Valores médios mensais das taxas diárias de frete marítimo no Brasil



Fonte: (SCANBRASIL, 2017)

Problemas de tomada de decisão, no que se referem à contratação de embarcações de apoio *offshore* e outras semelhantes a essas, já vêm sendo investigados no meio acadêmico. Para evidenciar tal aspecto, foram realizadas buscas em três bases de dados de grande relevância para a área acadêmica, sendo elas: *Scopus*, *Science Direct* e *Web of Science*. Também foram destacados os trabalhos não duplicados, ou seja, trabalhos que aparecem duplicados são contados apenas uma vez. Foram feitas buscas por publicações que se relacionam com o tema

da presente dissertação, tendo sido primeiramente pesquisado o termo “*Fleet Management Optimization*”. A janela temporal da análise compreende os anos de 1969 até dez/2019. Com o uso desse termo, a busca realizada retornou uma quantidade expressiva de trabalhos, como mostrado na Tabela 2, dificultando a filtragem por trabalhos relevantes.

Tabela 2 – Número de trabalhos relacionados ao termo *Fleet Management Optimization*

Base de Dados	Número de Trabalhos
Scopus	462
Science Direct	188
Web of Science	635
Total	1285
Não Duplicados	929

Fonte: Elaborado pelo autor

A fim de restringir a pesquisa a artigos com maior relevância ao tema da presente dissertação, foi ajustado o termo da pesquisa para a combinação de dois termos “*Maritime Fleet Size*” e “*Mix Problems*”. A busca realizada com estes novos termos retornou uma quantidade menor de resultados, conforme disposto na Tabela 3, tendo sido identificados apenas trabalhos com significativa relevância e relação com a presente pesquisa.

Tabela 3 – Número de trabalhos relacionados aos termos *Maritime Fleet Size* e *Mix Problems*

Base de Dados	Número de Trabalhos
Scopus	10
Science Direct	7
Web of Science	19
Total	36
Não Duplicados	23

Fonte: Elaborado pelo autor

Em continuidade à pesquisa bibliográfica, foi realizada outra busca nas mesmas bases de dados, porém agora com uso do termo “*Marine Fleet Optimization*”. A Tabela 4 apresenta o resultado do total de trabalhos identificados na busca, tendo sido obtido um número relevante de resultados a serem analisados, contendo publicações importantes e de grande relação com a presente pesquisa.

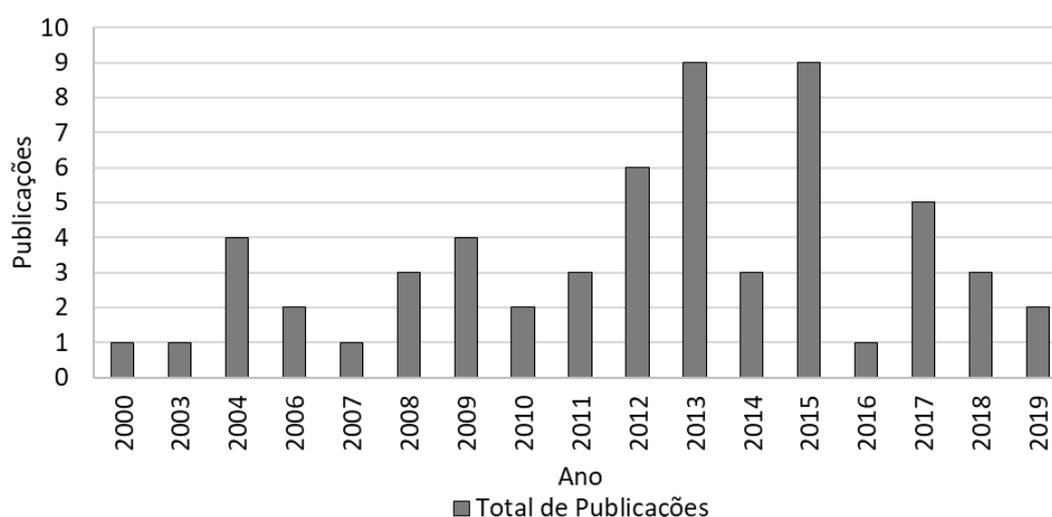
Tabela 4 – Número de trabalhos relacionados ao termo *Marine Fleet Optimization*

Base de Dados	Número de Trabalhos
Scopus	46
Science Direct	8
Web of Science	42
Total	96
Não Duplicados	65

Fonte: Elaborado pelo autor

Verificou-se também um crescente interesse pelo assunto, nos últimos anos, com extremos verificados nos anos 2013 e 2015, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Quantidade de publicações por ano



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir do conjunto de publicações encontradas pelas buscas do termo “*Marine Fleet Optimization*”, foram selecionados os artigos que mais se aproximam ao tema da presente pesquisa. Esses artigos estão listados no Quadro 1, tendo sido atribuído um peso de 0 a 10 conforme a relevância de cada um para o presente trabalho. Entre os artigos selecionados, destaca-se o trabalho de Siddiqui et. al. (2017), onde é apresentado um modelo de otimização baseado em programação linear que visa à minimizar os riscos relacionados à contratação de embarcações de apoio *offshore*, levando em conta incertezas de demanda, preço de afretamento e preço do petróleo no mercado mundial.

Outro trabalho que tem alto nível de relação com a presente pesquisa é o trabalho de Souza (2019), que explora métodos de otimização sob incertezas. Nesse trabalho, o problema é modelado com restrições aplicadas à realidade vivenciada por grandes empresas que atuam no

ramo petrolífero no Brasil, e que fazem uso de contratação de embarcações de apoio *offshore*, sendo analisado um problema semelhante ao do presente trabalho.

Os demais trabalhos explorados e elencados no Quadro 1 apresentam conceitos e abordagens importantes no tratamento do problema abordado na presente dissertação. A partir da consulta destes trabalhos, os aspectos que poderão contribuir com a presente pesquisa referem-se às abordagens para modelagem das restrições e preços, bem como as diferentes formas de análise das incertezas relacionadas à tomada de decisão.

A pesquisa bibliográfica realizada mostrou que o tema é de grande relevância, visto que é frequentemente abordado no meio acadêmico e, também, por ainda precisar ser bastante desenvolvido, conforme destacam Pantuso et. al. (2014). Os mesmos autores concluem, a partir da sua revisão bibliográfica, que pesquisas futuras devem focar, especialmente, no estudo de estratégias para renovação da frota, onde se busca a contínua adaptação da frota a mudanças na situação do mercado, além do fato de ainda existirem questões de pesquisa a serem exploradas, tais como a descrição apropriada das operações das embarcações e também metodologias oportunas para considerar e interpretar a incerteza característica do contexto em estudo.

Analisando o Quadro 1, pode-se perceber uma insuficiência de trabalhos voltados à otimização do plano de contratação de embarcações de apoio *offshore* no Brasil. Atualmente, há apenas um trabalho de tese finalizado sobre o tema em específico, mostrando a necessidade de se investigar, conforme demais referências, esse tema de extrema relevância no meio acadêmico e que pode trazer um ganho financeiro expressivo, derivado dos altos valores associados a esse tipo de atividade.

1.3.2 Justificativa prática

Empresas de petróleo podem determinar o mix ótimo de afretamento de embarcações de apoio marítimo baseadas apenas em estratégias simples, fundamentadas unicamente na taxa de afretamento, desconsiderando o horizonte de contratação e eventuais oscilações na demanda por embarcações. Embora esta abordagem funcione bem para contratações de curto prazo, este método pode favorecer políticas de contratação que irão comprometer recursos que, posteriormente, poderão resultar em despesas operacionais mais elevadas, devido a variações do mercado de petróleo, da demanda por embarcações e dos custos dessas contratações. Como apresentado em (MACIEL *et al.*, 2014), em contratações de médio e longo prazo, a escolha por adotar uma proposta baseada apenas no menor custo presente pode incorrer em altíssimos custos futuros para a organização.

Quadro 1 – Artigos e trabalhos relacionados ao tema da presente dissertação

Artigo	Autor	Ano	Tema	Abordagem	Conclusão	Rel.
Composição de contratos de afretamento para renovação de frota de embarcações de apoio marítimo: Um método de otimização sob incertezas	Souza, Marcelo Oliveira	2019	Desenvolver um método para análise e apoio à decisão no processo de renovação de frota de embarcações afretadas, dedicadas ao suprimento de unidades marítimas de exploração e produção de petróleo e gás natural, considerando as incertezas relacionadas à demanda a aos preços de afretamento.	Modelo de otimização determinística com uso de valores esperados para os parâmetros estocásticos; Modelo de otimização determinística para cenários estocásticos; Modelo de otimização estocástica.	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.	10
<i>A conditional value-at-risk based methodology to intermediate-term planning of crude oil tanker fleet</i>	Siddiqui, Atiq W. Verma, Manish	2017	Propor uma metodologia baseada em valor-em-risco condicional para proteger contra perdas extremas na renovação da frota marítima.	Modelo de programação não linear inteira mista; Parâmetros estimados através da simulação de Monte-Carlo.	O uso pleno de um mix de contratos de afretamento e suas opções de compra reduz significativamente os riscos relacionados ao mercado de afretamento spot ao mesmo tempo em que aumenta substancialmente os riscos específicos da empresa ou da demanda por petróleo.	10
<i>A stochastic programming formulation for strategic fleet renewal in shipping</i>	Bakkehaug, Rikard Eidem, Eirik Stamsø Fagerholt, Kjetil Hvattum, Lars Magnus	2014	Ajustar frota de navios para atender as demandas de transporte incertas no futuro e compensar navios envelhecidos.	Programação estocástica em múltiplos estágios.	Mostra-se que resultados significativamente melhores são obtidos quando se considera a incerteza de parâmetros futuros, comparados com os valores esperados.	8
<i>A survey on maritime fleet size and mix problems</i>	Pantuso, Giovanni Fagerholt, Kjetil Hvattum, Lars Magnus	2013	Pesquisa bibliográfica sobre o tamanho da frota e o problema de mistura no transporte marítimo.	Flutuações no mercado de transporte marítimo e desalinhamentos frequentes entre as capacidades e demandas da frota destacam a relevância do problema e exigem um apoio à tomada de decisão mais preciso.	-	7
<i>Fleet Sizing for Offshore Supply Vessels with Stochastic Sailing and Service Times</i>	Maisiuk, Yauhen Gribkovskaia, Irina	2014	Planejamento de embarcação de suprimento que surge na manutenção de instalações offshore de petróleo e gás.	Modelo de simulação de eventos discretos; Avaliação de configurações alternativas de tamanho de frota; Leva em consideração a incerteza em condições climáticas e futuras taxas de afretamento spot.	A análise de saída mostra que a decisão da empresa de contratar quatro navios de afretamento temporário no contrato de longo prazo é, de fato, a configuração mais econômica.	7
Avaliação de processos licitatórios de embarcações de apoio marítimo offshore com utilização de análise envoltória de dados	Maciel, Gustavo da Silva Lima, Gilson Brito Alves Meza, Lidia Angulo Gomes Júnior, Silvio Figueiredo	2014	Proposta de utilização da Análise Envoltória de Dados em processo licitatório para contratação de embarcações tipo PSV de apoio marítimo pela Petrobras.	Análise Envoltória de Dados; Uso da complementaridade da rede invertida para o cálculo da eficiência.	A utilização de DEA se justificou por sua capacidade de considerar variáveis econômicas e técnicas envolvidas no processo, além de não ter sido necessária a intervenção do decisor na atribuição dos pesos destas variáveis.	7
<i>Maritime fleet size and mix problems</i>	Martin-Alexander Steffensen	2012	Abordar o tamanho da frota marítima e problema de mistura (MFSMP). Encontrar o tamanho ideal da frota e a mistura de navios para necessidades futuras.	Modelo de máquina de estados finita.	A frota proposta pelo modelo de máquina de estados finita, em sua forma atual, muitas vezes é subdimensionada. Este modelo em particular funcionou melhor para períodos de tempo mais curtos.	6
<i>A periodic planning model for maritime transportation of crude oil</i>	Siddiqui, Atiq Verma, Manish Tulett, David	2013	Resolver o problema de escalonamento para um fornecedor de petróleo que enfrenta restrições de cota de fornecimento e de capacidade portuária.	Programação inteira mista; Técnicas de solução dependentes do tempo;	Resultados numéricos sugerem que o tempo de computação é uma função do número, da localização inicial e do tempo até a disponibilidade de navios-tanque nas fontes de suprimento. Uma técnica de decomposição baseada em tempo é apresentada para resolver grandes instâncias de problemas, ilustrando reduções substanciais no tempo de computação para soluções marginalmente piores.	6

Fonte: Elaborado pelo autor

O problema de otimização considerando várias modalidades e vigências de contratos de afretamento para renovação de frota, levando em conta incertezas relacionadas à demanda, ao mercado, em conjunto com o risco financeiro associado à tomada de decisão, se trata de um problema de otimização combinatória de difícil solução (SOUZA, 2019).

Porém, o desenvolvimento de um modelo capaz de auxiliar o tomador de decisão na escolha da melhor política de contratos e renovação da frota, com a utilização de uma abordagem científica fundamentada em métricas abrangentes de arranjo não trivial, é de grande importância para empresas do ramo de petróleo. Por isso, o presente trabalho justifica-se ao propor o desenvolvimento desse modelo adequado e eficaz para tratar o problema.

A escolha por um modelo de otimização baseado em programação linear está relacionada aos altos custos atrelados à contratação de embarcações de apoio *offshore*. Um modelo de otimização baseado em programação linear é capaz de encontrar a configuração ótima global para o problema de otimização do mix de contratos, garantido que, mediante os parâmetros de entrada fornecidos pelo decisor, tenha-se sempre o menor custo possível do conjunto de embarcações que suprirão uma demanda futura. Além disso, a relação entre variáveis é linear, tanto na função objetivo quanto nas restrições.

Conforme o contexto apresentado, no qual o presente estudo está inserido, o processo de contratação de embarcações de apoio *offshore* envolve vários aspectos que devem ser avaliados do ponto de vista do decisor, a fim de reduzir o custo dessa contratação. Algumas empresas realizam a sua avaliação considerando apenas o custo associado, ou seja, por meio de um processo licitatório, a proposta que apresentar o menor valor econômico ofertado vence a licitação (MACIEL *et al.*, 2014). Processos de contratação neste formato são tipicamente adotados em empresas públicas. Porém, outros aspectos importantes como, por exemplo, as incertezas associadas à variação de demanda por embarcações e ao preço, podem evidenciar a ineficiência de uma política de contratação baseada apenas em contratos de longo prazo. Portanto, essas incertezas precisam ser analisadas, avaliadas e consideradas no momento da definição da política de contratação e, devido a possíveis mudanças do cenário econômico, a frota deve ser flexível para não incorrer em custos incompatíveis com a receita (SOUZA, 2019).

1.4 QUESTÃO DE PESQUISA

Com base no cenário apresentada até aqui, a seguinte questão de pesquisa se coloca: “Qual o melhor mix de afretamento de embarcações *offshore* levando em conta incertezas

relacionadas à demanda futura por embarcações, preço futuro de contratação dessas embarcações, e qual o risco envolvido nessa decisão?”.

1.5 OBJETIVOS

Com base na questão de pesquisa definida, a seguir são apresentados os objetivos gerais e específicos da presente dissertação.

1.5.1 Objetivo geral

Desenvolver um modelo de otimização baseado em programação linear para auxiliar o tomador de decisões no processo de contratação de embarcações de apoio *offshore*, considerando incertezas sobre demanda e preço, e avaliação de risco.

1.5.2 Objetivos específicos

Para cumprir com o objetivo geral definido, foram definidos objetivos específicos com base nas entregas de cada fase do trabalho:

- a) Identificação das modalidades de contrato utilizadas no mercado brasileiro de embarcações de apoio *offshore*;
- b) Identificação do conjunto de restrições de contratação de embarcações de apoio *offshore* regularmente assumidas ou impostas às empresas que atuam na indústria de petróleo nacional;
- c) Avaliação do modelo de risco mais adequado ao problema de otimização do mix de afretamento;
- d) Desenvolvimento de um modelo conceitual, matemático e computacional para o problema do mix de afretamento de embarcações de apoio *offshore*;
- e) Avaliação de cenários com contratos por tempo com e sem o uso de contratos *spot* e com e sem o uso de restrição de risco de contratação;
- f) Avaliação de cenários com diferentes comportamentos das taxas de afretamento de embarcações de apoio *offshore*.

1.6 ESTRUTURA DO TEXTO

A estrutura adotada para a este documento difere da estrutura tradicionalmente utilizada em trabalhos acadêmicos, estando alinhada com aquela de um relatório científico de caráter profissional. Na estrutura adotada, os fundamentos teóricos que embasam a pesquisa são apresentados à medida que se faz necessário o entendimento dos conceitos utilizados em cada etapa do trabalho, não existindo, portanto, um capítulo específico de fundamentação teórica

Desta forma, este trabalho está organizado em quatro capítulos. O Capítulo 1 consiste na introdução, onde é apresentada a contextualização da pesquisa, questão de pesquisa, objetivos do trabalho e a justificativa do estudo. O Capítulo 2 aborda o método de pesquisa e o método de trabalho, detalhando as modelagens conceitual e matemática. No Capítulo 3, encontram-se descritos os experimentos realizados no desenvolvimento da pesquisa e os respectivos resultados. Por fim, no Capítulo 4, são apresentadas as considerações finais.

2 MÉTODO

O método de pesquisa é apresentado nesse capítulo conforme as seções: metodologia de pesquisa, etapas do método, especificação do problema, definição do problema, construção do modelo e abordagem de solução.

2.1 METODOLOGIA DE PESQUISA

Conforme Miguel (2018), quanto à sua natureza, a presente pesquisa é identificada como aplicada, pois apresenta um interesse prático, cuja aplicação visa à solução de um problema real aplicado. Quanto ao seu objetivo, esta pesquisa é identificada como exploratória, uma vez que permite uma maior familiaridade com o problema em estudo, tornando possível a construção de hipóteses e análise de exemplos. Quanto à abordagem, esta é quantitativa, pois todos os elementos utilizados são considerados quantificáveis, sendo qualquer informação representada de forma numérica, o que permite a sua adequada análise e classificação, o que é viabilizado pelo emprego de métodos matemáticos. O método de pesquisa adotado para o desenvolvimento deste trabalho de dissertação é a Modelagem e Simulação. Como método de pesquisa, a modelagem e simulação apoia os pesquisadores para aprimorarem o entendimento dos problemas estudados, onde os modelos gerados são representações simplificadas da realidade e permitem uma compreensão do objeto de pesquisa ou estudo (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JUNIOR, 2013). A modelagem e simulação de um sistema permite a observação e inferência do comportamento do sistema estudado sobre determinadas condições. Ela parte da premissa que é possível construir modelos que expliquem pelo menos parte do comportamento de processos reais e, com isso, entender parte dos problemas de tomada de decisão relacionados a esses processos (CAUCHICK-MIGUEL *et al.*, 2018).

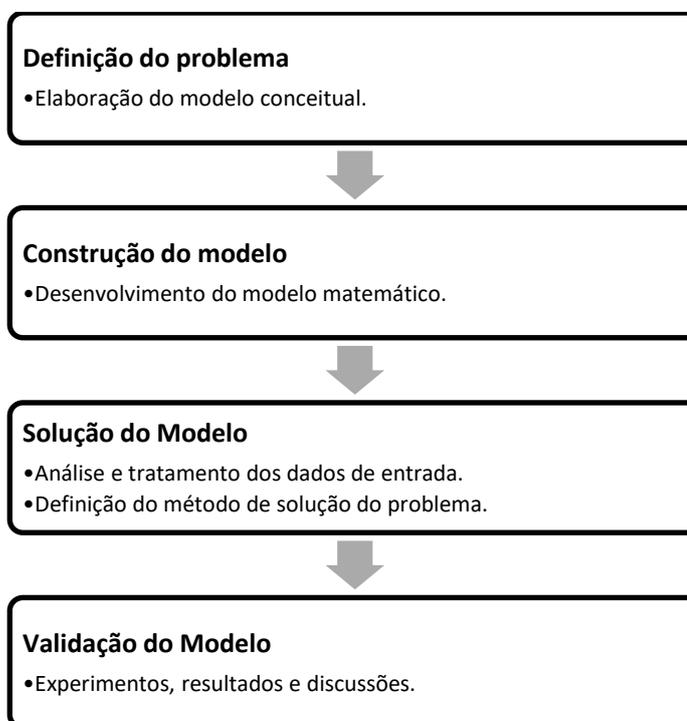
A pesquisa do presente trabalho pode ser classificada como axiomática, uma vez que é orientada primeiramente a modelos de problemas idealizados, onde o pesquisador se preocupa em obter soluções para o modelo, de modo a assegurar que tais soluções ajudem na compreensão da estrutura do problema como um todo (CAUCHICK-MIGUEL *et al.*, 2018).

2.2 ETAPAS DO MÉTODO

A abordagem de resolução de um problema sob a ótica da Modelagem e Simulação envolve algumas fases, sendo elas: definição do problema, construção do modelo, solução do

modelo e validação do modelo (CAUCHICK-MIGUEL *et al.*, 2018). O presente estudo se baseou nesta sequência de etapas, conforme apresentado na Figura 6 e descritas na sequência.

Figura 6 – Etapas de um estudo de modelagem e simulação



Fonte: Adaptado de (CAUCHICK-MIGUEL *et al.*, 2018)

DEFINIÇÃO DO PROBLEMA: nessa etapa, são definidos o escopo do problema em estudo, as decisões de interesse, os objetivos envolvidos e o modelo conceitual. Nesse modelo conceitual, estão descritas as alternativas de decisões e limitações sob as quais o sistema modelado funciona. Caso o modelo conceitual não represente adequadamente o problema real, possivelmente não será obtida uma resposta correta, por isso é importante que ele seja bem definido nessa etapa. Segundo Miguel (2018), a definição do problema é a fase mais importante e difícil do processo de modelagem. Essa etapa será desenvolvida e apresentada ao longo do capítulo 2.

CONTRUÇÃO DO MODELO: a coleta de informações, estimativas e pesquisa realizadas na fase anterior, sobre o sistema real e empregadas no modelo conceitual, são agora usadas para desenvolver e avaliar o modelo matemático do problema, seja por meio de relações matemáticas, simbólicas ou até combinações delas. Em geral, o modelo matemático construído a partir do modelo conceitual é baseado em outros modelos matemáticos da literatura de

pesquisa operacional (CAUCHICK-MIGUEL *et al.*, 2018). Nessa etapa, será desenvolvido o modelo matemático cujos procedimentos serão apresentados ao longo do capítulo 2.

SOLUÇÃO DO MODELO: nessa fase, métodos de solução e algoritmos são avaliados para resolver o modelo construído na segunda fase. Esses métodos podem ser conhecidos da literatura ou desenvolvidos especificamente para tratar o modelo matemático desenvolvido. Em geral, esta terceira fase é a mais bem definida do processo de implementação de um estudo de pesquisa operacional, uma vez que lida em grande parte com modelos matemáticos precisos e canônicos. Essa é a etapa central de pesquisas do tipo axiomáticas quantitativas, onde, resumidamente, é definido o método de solução do modelo (CAUCHICK-MIGUEL *et al.*, 2018). Esta etapa será apresentada ao final do capítulo 2.

VALIDAÇÃO DO MODELO: essa é a etapa de experimentação. Nessa fase, é verificado se o modelo proposto e o seu método de solução representam apropriadamente o problema, ou seja, se o modelo descreve adequadamente o comportamento do sistema real diante das hipóteses assumidas na primeira fase, definição do problema, e se é possível ser solucionado com o método de solução escolhido. Um método comum para verificar a validade do modelo é comparar seus resultados com dados históricos do problema e estressar o modelo com dados sintéticos a fim de testar os seus limites. Em essência, é necessário validar tanto o modelo conceitual da primeira fase quanto a solução proposta pelos resultados da pesquisa axiomática, desenvolvidos na segunda fase, e o método, definido na terceira fase. Essa fase será discutida ao longo do capítulo 3 (CAUCHICK-MIGUEL *et al.*, 2018).

2.3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O presente trabalho considera o problema de definição do mix de contratos de embarcações de apoio marítimo e análise de risco enfrentado por empresas do ramo de petróleo, que precisam, em bases regulares, abastecer suas plataformas com suprimentos. A necessidade de abastecimento dessas plataformas gera uma demanda por embarcações, destacando-se entre elas as embarcações do tipo PSV. Para suprir essa demanda, a empresa necessita ir ao mercado de afretamento para contratar embarcações que supram a sua necessidade, sabendo que os preços de afretamento oscilam temporalmente e existem diferentes vigências contratuais disponíveis, cada qual com o seu respectivo preço, incluindo a possibilidade de se contratar no mercado *spot*.

Com a aplicação do modelo desenvolvido, será possível gerar um plano de afretamento para embarcações do tipo PSV para a renovação de parte da frota existente, a partir de premissas

e informações a respeito da demanda de empresas do ramo de petróleo e de preços de afretamento de diferentes modalidades contratuais, assim como oscilações no mercado *spot*. O plano de afretamento deve considerar um conjunto ótimo de contratação, isto é, a melhor combinação possível entre tipos de contratos que apresentam custos, duração e data de início distintas, levando em conta as restrições impostas pela legislação do mercado de cabotagem e os aspectos financeiros de risco e preço. Para a formulação da melhor estratégia de composição de portfólio, serão consideradas duas modalidades de contratação, sendo essas TCP e mercado *spot*, pois são, atualmente, as mais comumente praticadas no mercado brasileiro, conforme apresentado anteriormente, na seção 1.

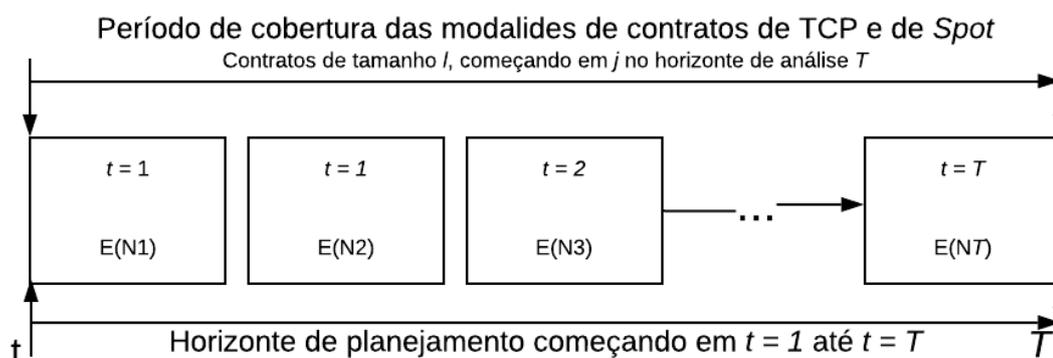
2.3.1 Modelagem conceitual

A modelagem conceitual da abordagem de solução para o problema de definição do mix de contratos de uma frota de apoio *offshore* é descrita a seguir.

A frota precisa atender às necessidades de suprimento das unidades marítimas existentes e das novas unidades com instalação futura planejada, cuja demanda por transporte varia com o tempo. Isto exigiria que fossem consideradas medidas de incerteza quanto ao tamanho da frota de apoio *offshore* necessária para o atendimento da demanda, isto é, associar a demanda a ser atendida a um grau de risco financeiro. Por ser uma informação de caráter estratégico das empresas e por questões de sigilo, o cálculo do risco associado a essa incerteza não será considerado no presente modelo.

Preliminarmente, a política de contratação considerará duas modalidades diferentes de contratação de afretamento: TCP e *spot* e um horizonte de análise de T meses.

Figura 7 – Horizonte de planejamento do otimizador de mix contratual



Fonte: Adaptado de (SIDDIQUI; VERMA, 2017)

Na Figura 7, é ilustrado o horizonte de otimização com as informações necessárias ao processo de afretamento de embarcações, com a indicação da demanda esperada para o período i , representada por $E(N_i)$. Neste contexto, as possíveis contratações por tempo possuem vigência de tamanho l e começam a vigorar no período $j \geq 1$. Já as possíveis contratações na modalidade *spot*, quando efetuadas, possuem duração de 1 mês e podem começar em períodos distintos, conforme o planejamento do decisor. Os contratos firmados anteriormente ao período da análise não são considerados diretamente no modelo, de forma que a demanda esperada $E(N_i)$ leva em conta apenas a demanda líquida esperada. Dessa forma, se deseja minimizar os custos de afretamento e os riscos associados a cada tipo de contratação e, ao mesmo tempo, satisfazer a demanda esperada por embarcações em cada período do horizonte de otimização, permitindo ao decisor o uso da ferramenta de otimização a cada nova exigência de ajuste de frota.

2.3.2 Contratos por tempo

Contratos por tempo são aqueles em que a empresa se compromete com a contratação da embarcação por um determinado período, identificados no mercado como contratos TCP. Esses contratos podem ter durações distintas como, por exemplo, 1 ano, 2 anos ou até 4 anos, além de outras possibilidades de vigência, ficando totalmente a critério do afretador definir a duração do contrato de embarcações nesta modalidade (BORDALO; DORES, 2014; SOUZA, 2019; VIEIRA, 2014). Para simplificação do problema e validação do modelo matemático, em um primeiro momento são utilizadas três modalidades de contratos de curto prazo, com vigências de 2, 3 e 6 meses, e cinco modalidades de contratos de longo prazo, com vigências de 1, 2, 3, 4 e 5 anos. Contratos por tempo são hipoteticamente firmados pelo decisor no momento da análise e podem ter seu início em qualquer período entre $t = 1$ e $t = T$.

Contratos de longo prazo não possuem risco associado ao preço, pois condições como preço de afretamento, início do contrato e vigência são definidos no momento da contratação. O risco relativo a um contrato de longo prazo está associado à não utilização das embarcações contratadas em função de variáveis de mercado ou mudança estratégica da empresa, fazendo com que, no momento de início da sua vigência, a utilização das embarcações contratadas não seja mais necessária. Com isso, o risco de uma contratação de longo prazo está associado a subutilização das embarcações contratadas.

2.3.3 Contratos *spot*

Contratos na modalidade *spot* estão associados a uma expectativa futura de preço de contratação de embarcações no mercado de curtíssimo prazo, ou seja, nessa modalidade, o decisor não firma contratações no momento da decisão, mas opta por aguardar um momento futuro para contratar as embarcações com base na expectativa do preço futuro do período analisado. Nesta estratégia, o afretador aceita o risco associado à não realização da expectativa de preço, visto que o preço pode estar acima do anteriormente esperado, a fim de atingir o melhor mix contratual.

Com base em informações sobre a tendência do preço futuro, obtidas, por exemplo, pelo emprego de modelos de predição, o decisor pode efetuar a contratação de uma determinada parcela da sua demanda de embarcações por períodos menores, não suprimindo toda a sua necessidade futura no momento de análise, ficando com uma parcela de sua demanda exposta ao mercado *spot* para um determinado período analisado. Com isso, o decisor tem a capacidade de efetuar uma nova contratação por tempo (TCP) em outro momento, assim que o preço de afretamento para contratos desta modalidade estiver mais atrativo.

A resposta gerada pelo modelo de otimização para o mix de contratação tem por objetivo fornecer ao decisor, na janela de tempo analisada, a possibilidade de redução do custo total de contratação, ao agregar embarcações do tipo *spot*, além de oferecer ao decisor a capacidade de mensurar a que risco ele estará exposto ao decidir por contratações nessa modalidade.

2.3.4 Modelagem conceitual do Risco em contratação *spot*

A exposição à volatilidade no mercado de afretamento marítimo de embarcações de apoio *offshore*, devido às incertezas de demanda por embarcações e, principalmente, às incertezas relacionadas ao mercado de petróleo, pode representar um risco financeiro considerável para as empresas do ramo.

Com isso, o modelo de otimização proposto deve contemplar este componente por meio da modelagem do risco associado à relação expectativa \times realização dos preços, a fim de mensurar o valor financeiro do risco que a empresa está suscetível ao operar no mercado de curtíssimo prazo.

Nos contratos por tempo, não será relacionado o risco, uma vez que os contratos por tempo seguem uma dinâmica diferente na modelagem, visto que no momento da análise o

decisor já define as contratações que começarão no instante $t = \text{início do contrato TCP}$ sem incorrer na expectativa de taxas futuras de contratação.

No que se refere às incertezas do mercado, as companhias de petróleo estão sujeitas a dois fatores de risco. O primeiro está relacionado à volatilidade nas taxas de afretamento, também conhecido como risco de mercado. Já o segundo, está relacionado às incertezas nas demandas por embarcações de apoio *offshore*, conhecido como risco empresarial. Embora seja aceitável que a posição conservadora adotada pelas empresas em relação às contratações no mercado de embarcações possa proporcionar retornos positivos, entende-se que as empresas estão mais preocupadas em controlar os pontos negativos desses riscos, devido às suas implicações e perdas em potenciais do que trabalhar com ajustes finos do processo de contratação de embarcações de apoio *offshore* (SIDDIQUI; VERMA, 2017).

Algumas ferramentas para análise de riscos são propostas na literatura, destacando-se algumas delas como relevantes neste trabalho.

2.3.4.1 Teoria de Markowitz

Segundo Markowitz (1952), o processo de seleção de portfólio deve ser dividido em duas etapas. A primeira etapa começa com a observação e experiência de um determinado ativo e termina com a análise do que se projeta por meio de dados sobre a performance futura do tipo de contratação escolhida. A segunda etapa começa com a acreditação sobre a performance futura dos ativos e termina com a escolha do portfólio.

Markowitz (1952) baseou seu estudo na contratação de títulos financeiros e, segundo a sua teoria, todo investidor lida com duas incertezas no processo decisório de investimentos: o retorno e o risco. Essas duas incertezas seriam quantificadas pelo retorno esperado (média) e a variância (ou desvio padrão) desse retorno, sendo o primeiro o fator desejável e o segundo o fator indesejável. É comum encontrar na literatura a teoria do portfólio de Markowitz denominada de teoria MVP (*Mean-Variance Portfolio*) ou, portfólio média-variância.

As conclusões de Markowitz ressaltam a importância da diversificação da carteira de investimento, e os resultados de sua pesquisa demonstram que seria possível obter combinações mais eficientes de alocação de investimentos com melhor relação entre retorno esperado e risco (MARKOWITZ, 1952).

2.3.4.2 Value at Risk (VaR)

O VaR é uma medida para avaliar o risco em operações financeiras, definido como o valor máximo em dinheiro que se pode perder em um específico espaço de tempo, sendo associado a um intervalo de confiança (ARSLAN; PAPAGEORGIOU, 2017). Matematicamente, o VaR é definido como o quantil de uma distribuição, normalmente calculado com valores de 95%, 99% ou 99,9% para o nível confiança. Este nível indica o percentual de não ocorrer uma perda maior que a calculada pelo VaR. Por exemplo, ao utilizar o VaR com 99% de nível de confiança, espera-se que a cada 100 observações, pelo menos uma vez a perda do investimento financeiro será superior à perda estimada pelo cálculo do VaR (BANIHASHEMI; AZARPOUR; KAVEH, 2018).

Artzner *et al.*, (1999) definem a métrica $VaR = V$ como: “Há uma certeza de $(1 - \alpha)\%$ de que não haverá perdas maiores que V unidades monetárias no período analisado”. Assumindo uma variável aleatória X qualquer, o valor do VaR é definido por:

$$VaR(x) = -\min\{x/P(X \leq x) > \alpha\} \quad (1)$$

onde x é o retorno pertencente à distribuição do portfólio analisado, $\min\{x/A\}$ é o menor limite de x dado um evento A , e $\min\{x/P(X \leq x) > \alpha\}$ indica o menor 100α percentil da distribuição de retornos. Uma vez que uma perda é definida com sinal negativo (e os ganhos com sinal positivo), a definição do VaR é multiplicada por -1 para se obter um valor positivo, assumindo um dado nível de confiança. Usando esta definição de VaR , ele também pode ser negativo se não existirem perdas dentro do intervalo de confiança (ARTZNER *et al.*, 1999).

2.3.4.3 Conditional Value at Risk (CVaR)

O $CVaR$, conhecido como perda média esperada, é uma medida que indica a perda média do excedente do VaR . A medida $CVaR$ surge para compensar uma deficiência existente na medida VaR , que é o de não fornecer uma estimativa da perda esperada uma vez que se tenha excedido o valor do VaR crítico. O $CVaR$ possui a propriedade de detectar a presença de eventos catastróficos na distribuição de perdas avaliadas, sendo este considerado uma medida coerente de risco e mais pessimista que o VaR (BANIHASHEMI; AZARPOUR; KAVEH, 2018; SIDDIQUI; VERMA, 2017).

Enquanto o *VaR* avalia a perda mínima incorrida pela carteira nos $\alpha\%$ piores cenários, o *CVaR* avalia a perda média incorrida pela carteira nos $\alpha\%$ piores cenários, para um nível de confiança de $100(1 - \alpha)\%$. O grande benefício do uso do *CVaR* em relação ao *VaR* é a detecção das perdas máximas aceitáveis (BANIHASHEMI; AZARPOUR; KAVEH, 2018).

Siddiqui e Verma (2017) expõem vários trabalhos da literatura que propõem diferentes formas de mensurar o risco, sendo algumas destas formas fortemente criticadas por razões técnicas e lógicas como, por exemplo, não conseguir capturar eventos extremos na cauda da distribuição das perdas. Porém, alguns modelos podem ser percebidos mais adequados para representar problemas semelhantes ao estudado nesta dissertação. Por isso, o modelo escolhido para mensurar as possíveis perdas advindas dos fatores destacados anteriormente é um somatório ponderado de *CVaR*'s periódicos, que representam as possíveis perdas na janela de tempo analisada. Desta forma, a função de perdas *CVaR* pode ser definida como (BANIHASHEMI; AZARPOUR; KAVEH, 2018; SIDDIQUI; VERMA, 2017):

$$\Phi_{\alpha}(x) = CVaR_{\alpha} = (1 - \alpha)^{-1} \int_{VaR_{\alpha}}^{\infty} xf(x)dx, \quad (2)$$

onde:

- $\Phi_{\alpha}(x)$: função do risco de mercado *CVaR* $_{\alpha}$;
- VaR* $_{\alpha}$: perda ocorrida na carteira nos $\alpha\%$ piores cenários;
- x : medida das perdas associadas à oscilação dos preços do mercado de curto prazo em relação ao esperado;
- $f(x)$: frequência do evento da perda x ;
- α : nível de confiança do cálculo de risco.

A métrica de perdas x pode ser definida pelo decisor, e aqui podem ser inseridas a forma como a empresa entende e quantifica o risco. No presente trabalho, o risco é definido como a diferença entre a taxa *spot* esperada no mês e o maior custo histórico do *spot* verificado em um período passado, de tamanho adequado para representar as oscilações das taxas, ou seja:

$$x(i) = H(SC) - E(SC_i), \quad (3)$$

onde:

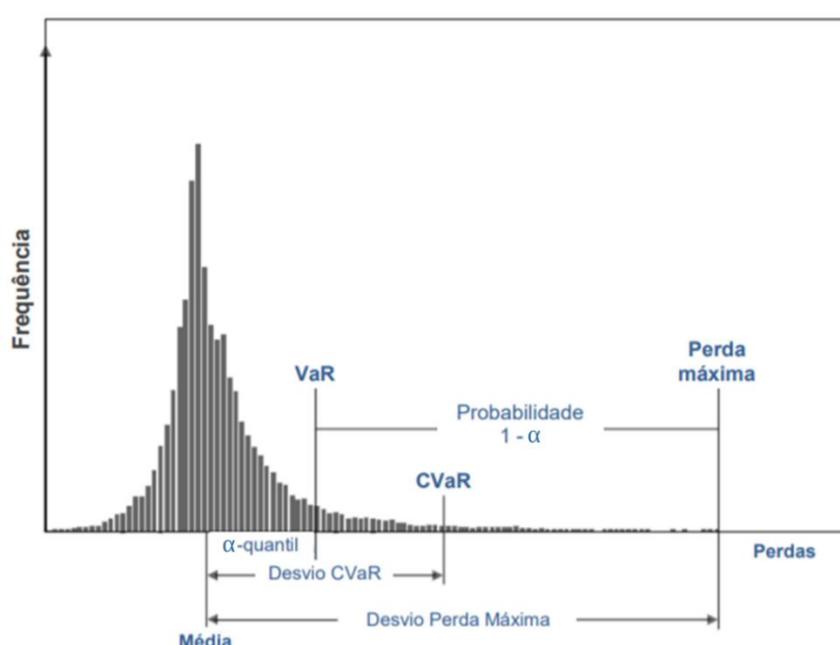
- $x(i)$ função de perdas no mês i da análise;
- i : período no qual é usado um contrato *spot*;

$H(SC)$ máximo valor histórico da taxa de afretamento *spot*;
 $E(SC_i)$ taxa de afretamento *spot* esperado no mês i da análise.

O presente trabalho usará o *CVaR* como métrica de risco associado à contratação de embarcações na modalidade *spot* por ser um método já utilizado na literatura para aplicações semelhantes (SIDDIQUI; VERMA, 2017).

Na Figura 8, estão apresentadas graficamente as medidas *VaR* e *CVaR* em uma distribuição de probabilidade de perdas hipotética.

Figura 8 – Representação gráfica do significado de *VaR* e *CVaR*



Fonte: adaptado de (SARYKALIN; SERRAINO; URYASEV, 2014)

A medida de perdas x apresentada no presente trabalho é a diferença entre o valor esperado e os maiores valores históricos da taxa de afretamento *spot*, sabendo que a função pode ser mais elaborada conforme a necessidade da companhia que irá utilizar o modelo. Porém, não está no escopo do presente trabalho avaliar outros formatos para a função de perdas, uma vez que as informações possivelmente utilizadas na definição desta função comumente dizem respeito a dados específicos e sigilosos das empresas (SIDDIQUI; VERMA; 2017).

2.3.5 Demanda por embarcações de apoio *offshore*

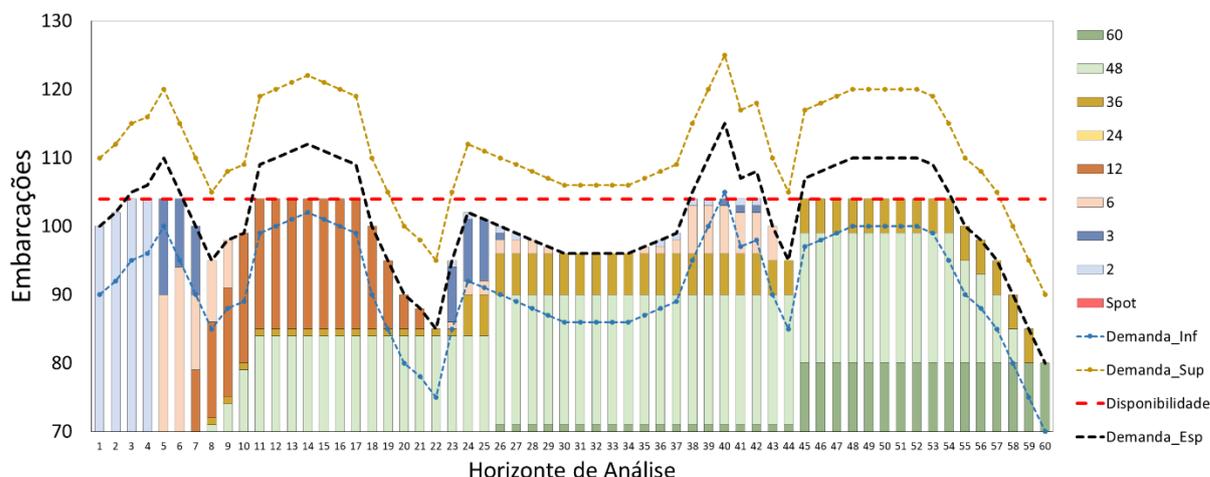
A frota de embarcações de apoio *offshore*, como explicado na seção 1.1.1, deve atender plenamente as necessidades das unidades marítimas em atividade ao mesmo passo que deve ser flexível a oscilações de mercado, para evitar custos com embarcações ociosas. Por isso, a demanda por embarcações está associada a um alto índice de incerteza. Essas incertezas são representadas por meio de três medidas: demanda superior, demanda esperada e demanda inferior.

A medida de demanda inferior representa o mínimo de embarcações necessárias para suprir a demanda imposta pelas unidades marítimas já em operação. Por sua vez, a medida de demanda esperada representa a quantidade de embarcações necessárias para suprir a demanda futura esperada, enquanto a demanda superior representa a quantidade máxima de embarcações, aceito pela companhia, a fim de otimizar o custo global da contratação.

Para representar as restrições do transporte de cabotagem, discutidas na seção 1.1.2, e aspectos do mercado, como a incerteza de disponibilidade de embarcações, o modelo de otimização desenvolvido irá considerar uma medida de disponibilidade de embarcações para afretamento. Esse parâmetro tem prioridade superior de atendimento quando modelado nas restrições, representando um aspecto real, ou seja, a quantidade total de embarcações disponíveis para afretamento no período analisado.

O plano de afretamento deve garantir que o número de embarcações contratadas esteja entre as demandas superior e inferior, buscando ficar mais próximo possível da demanda esperada sem violar as restrições de disponibilidade impostas. Na Figura 9, está representado um exemplo de plano de afretamento com o atendimento das demandas e restrições de disponibilidade.

Figura 9 – Representação da incerteza da demanda através de valores de mínimo, máximo e esperado e restrição de disponibilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor

2.4 MODELO MATEMÁTICO

A função de custo futuro a ser empregada no modelo de otimização do mix de contratos considera um horizonte de planejamento de T meses, onde os contratos por tempo possuem uma duração de l meses, como por exemplo contratos de 2 meses, de 12 meses, ou de 36 meses, e que podem ser negociados para terem seu início em qualquer instante t do horizonte de otimização, associado ao total de contratos planejados para negociações na modalidade *spot*.

Para o desenvolvimento do modelo de otimização baseado em programação matemática linear determinística, a seguinte notação é definida:

Índices:

- i : Período no qual é usado um contrato *spot*;
- j : Período no qual um contrato TCP é iniciado;
- l : Vigência do contrato TCP ($l = 2, 3, 6, 12, 24, 36, 48, 60$);
- t : Período no horizonte de planejamento, onde $1 \leq t \leq T$;
- T : Horizonte de planejamento.

Parâmetros de Custo

- TC_l^{0j} : Taxa diária de afretamento (\$/dia) de um contrato por tempo comprado em $t = 0$, começando em j ($= 1, 2, \dots, T$) e com vigência l ;
- SC_i : Taxa diária de afretamento (\$/dia) de um contrato *spot* para o período i ;
- $E(SC_i)$: Taxa esperada de SC_i em $t > 0$.

Parâmetros:

- N_t : Demanda por novas embarcações no período t para $t > 0$;
 $E(N_t)$: Valor esperado de N_t em $t = 0$, para $t > 0$;
 $E(N_t)_{min}$: Valor mínimo esperado de N_t em $t = 0$, para $t > 0$;
 $E(N_t)_{max}$: Valor máximo esperado de N_t em $t = 0$, para $t > 0$;
 D_t : Disponibilidade de embarcações no período t , para $t > 0$;
 ω_t : Peso do risco associado à decisão de compra de contratos *spot* em t ;
 β : Valor financeiro do risco máximo aceito pelo decisor na contratação *spot*.

Variáveis de Decisão

- V_l^{0j} : Número de contratos por tempo firmados em $t = 0$, começando no período j ($= 1, 2, \dots, T$) e com vigência l ;
 S_i : Número de contratos *spot* planejados para serem usados no período i ($= 1, 2, 3, \dots, T$);

Com base na notação definida, o seguinte modelo de otimização é proposto:

Função Objetivo:

$$MIN \sum_{j=1}^T \sum_l (TC_l^{0j} \times [l - \max\{0; j - 1 + l - T\}]) \times V_l^{0j} + \sum_{i=1}^T E(SC_i) S_i \quad (4)$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_l V_l^{0j} + S_t \leq D_t, \quad \text{para } t = 1, 2, 3, \dots, T \quad (5)$$

$$\sum_l V_l^{0j} + S_t \geq E(N_t)_{min}, \quad \text{para } t = 1, 2, 3, \dots, T \quad (6)$$

$$\sum_l V_l^{0j} + S_t \leq E(N_t)_{max}, \quad \text{para } t = 1, 2, 3, \dots, T \quad (7)$$

$$\sum_l V_l^{0j} + S_t \geq E(N_t), \quad \text{para } t = 1, 2, 3, \dots, T \quad (8)$$

$$\omega_t \phi_\alpha(t) \leq \beta, \quad \text{para } t = 1, 2, 3, \dots, T \quad (9)$$

$$V_l^{0j}, S_i \in \mathbb{Z}^+, \quad \forall l, i, j. \quad (10)$$

A equação (4) representa a função objetivo do modelo e visa à minimização dos custos de contratação de contratos nas modalidades TCP e *spot*. A equação (5) representa a restrição de disponibilidade de embarcações para serem contratadas, em cada período do horizonte de análise. As equações (6), (7) e (8) garantem que, em cada período do horizonte de análise T , a demanda por embarcações seja atendida por pelo menos um tipo de contrato e representam as restrições de atendimento às demandas mínimas, máximas e esperadas, respectivamente. A equação (9) garante que o somatório dos riscos *CVaR* associados à contratação de embarcações no mercado *spot* em cada período do horizonte de análise não ultrapassará o máximo valor financeiro aceito para o risco. A equação (10) garante que as variáveis de decisão referentes às quantidades de embarcações contratadas sejam de natureza inteira e não-negativa.

2.5 SOLUÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Na presente seção, são apresentadas as análises dos dados de entrada e o método de solução do modelo de otimização.

2.5.1 Análise e tratamento dos dados de entrada

A primeira etapa da solução do modelo passa pela análise e ajuste dos dados de entrada. Visto que alguns parâmetros, como preço de afretamento e demanda por embarcações são estocásticos, estes serão assumidos como determinísticos de forma a permitir o emprego do modelo linear e determinístico apresentado na seção 2.4.

Horizonte de análise: parâmetro de entrada fornecendo o horizonte da análise e assumindo um valor de 1 a 60 meses.

Período da otimização: parâmetro de entrada fornecendo o horizonte de interesse da otimização. Por exemplo, em uma análise de 60 meses, o decisor pode optar por otimizar apenas os primeiros 30 meses.

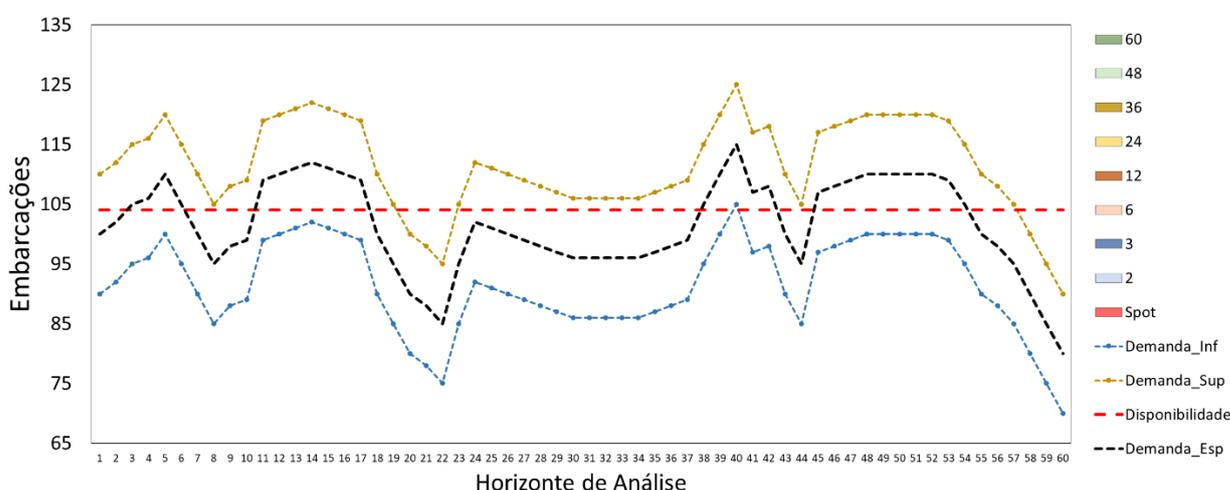
Disponibilidade: disponibilidade total de embarcações no período t da análise. Representa as restrições de mercado e de regulamentação de cabotagem, para aplicação matemática do modelo, caso a disponibilidade for menor que a demanda, ela se torna a nova demanda a ser atendida.

Data de início da análise: mês 1 do período de comprimento T do horizonte da análise, usado para calcular os dias totais de cada mês, uma vez que os preços de afretamento são computados de acordo com os valores diários.

Demanda: dados de entrada da demanda de caráter estocástico que precisam ser tratados levando em conta uma margem de variação, extraídos a partir da incerteza da demanda. São definidos de acordo com três métricas a serem atendidas, uma refere-se ao valor mínimo da demanda que precisa ser atendido, outra refere-se ao valor máximo que não pode ser excedido, e uma terceira métrica correspondente ao valor esperado da demanda para o período.

Como a demanda por embarcações normalmente é um dado confidencial das companhias, pois está diretamente relacionada a dados sigilosos de prospecção e exploração, bem como a seu planejamento estratégico, o presente trabalho utilizará uma demanda aleatória fictícia, gerada com base em uma função de aleatoriedade entre os valores de 80 e 120 embarcações. Uma vez gerados de forma aleatória, os valores de demanda foram ajustados a fim de criar comportamentos de crescimento, redução e estabilidade na demanda ao longo do tempo. Também foram ajustadas as restrições de disponibilidade de embarcações de modo a criar situações em que os valores de demanda são superiores à disponibilidade e, assim, permitir analisar o comportamento do modelo de otimização em sua capacidade completa. A Figura 10 apresenta uma representação gráfica dos comportamentos da demanda por embarcações e da disponibilidade utilizados nas simulações.

Figura 10 – Demanda por embarcações e Disponibilidade de embarcações



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 5 apresenta de forma numérica os valores de demanda e disponibilidade de embarcações utilizados nas simulações do modelo.

Tabela 5 – Demanda por embarcações e Disponibilidade de embarcações

	Mês	1	2	3	4	5	...	55	56	57	58	59	60
Disponibilidade	D	104	104	104	104	104	...	104	104	104	104	104	104
Superior	S	110	112	115	116	120	...	110	108	105	100	95	90
Esperada	E	100	102	105	106	110	...	100	98	95	90	85	80
Inferior	I	90	92	95	96	100	...	90	88	85	80	75	70

Fonte: Elaborado pelo autor

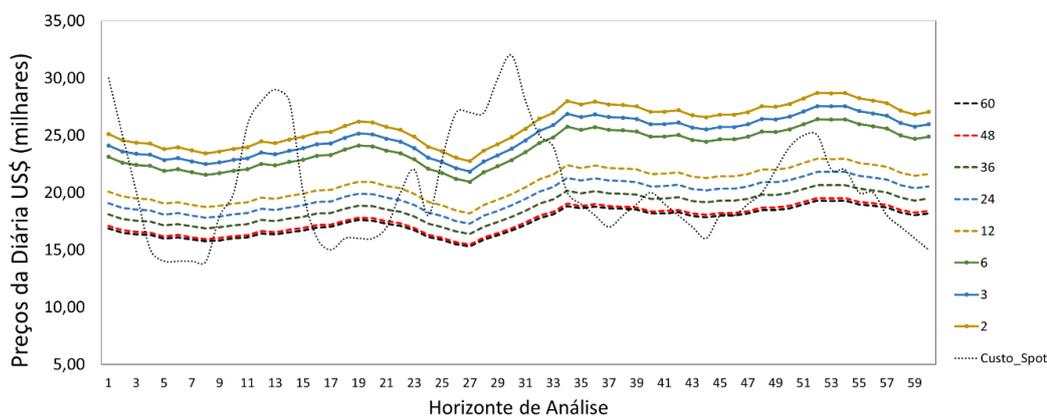
Vigências dos contratos: embora o modelo seja compatível com contratos de qualquer vigência, de 1 a 60 meses, para simplificação do problema e aproximação da realidade e a práticas comuns do mercado de afretamento, as vigências utilizadas nos experimentos serão de 2, 3 e 6 meses, e 1, 2, 3, 4 e 5 anos.

Taxas de afretamento TCP: taxas de afretamento de embarcações de apoio *offshore* são valores estocásticos, como apresentado na seção 1.1.3, dessa maneira para a solução do problema são estipuladas três configurações.

Primeiramente, foram verificadas as taxas médias de afretamento de um contrato TCP de duração de 1 ano entre 2018 e 2019 (US\$ 20,00 mil/dia). Com base nessas taxas, são obtidos os valores diários de contratos de outras vigências, por meio de descontos sucessivos sobre contratos imediatamente anteriores, com diferenças de valor variando de 12% a 25% para contratos por tempo.

Na configuração 1, a partir dos preços médios de afretamento dos anos de 2018 e 2019, são aplicadas taxas aleatórias de acréscimo e de descontos, fazendo com que os preços oscilem ao longo do período de análise. Assim, é formada a primeira configuração de preços conforme representado na Figura 11. A intenção na definição desta configuração é representar a incerteza nas taxas de afretamento, de modo que sejam observadas variações tanto positivas quanto negativas destas taxas. Desta forma, o modelo de otimização pode ser avaliado em configurações distintas durante a etapa de experimentos, permitindo avaliar como é o desempenho do modelo em situações em que a taxa de afretamento se comporta de forma oscilatória.

Figura 11 – Configuração 1: taxas de afretamento oscilatórias

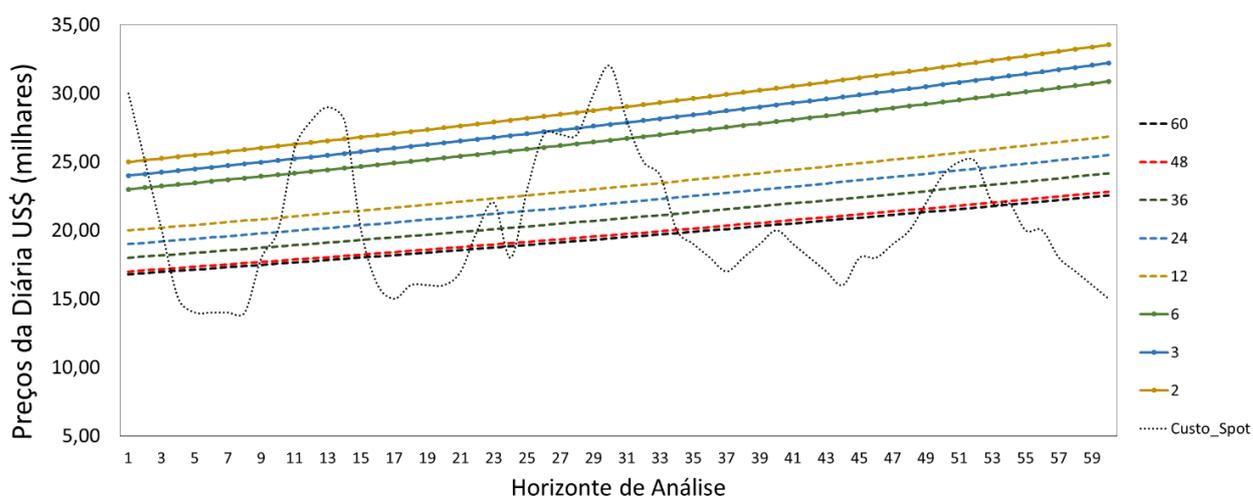


Fonte: Elaborado pelo autor

Na configuração 2, as taxas de afretamento médias de 2018 e 2019 são modificadas por um acréscimo de 0,5% a.m., ao longo do período de análise. Esse cenário é utilizado para representar um momento de tendência de alta nas taxas de afretamento ao longo do período de análise. A Figura 12 apresenta graficamente a evolução das taxas de afretamento na configuração 2.

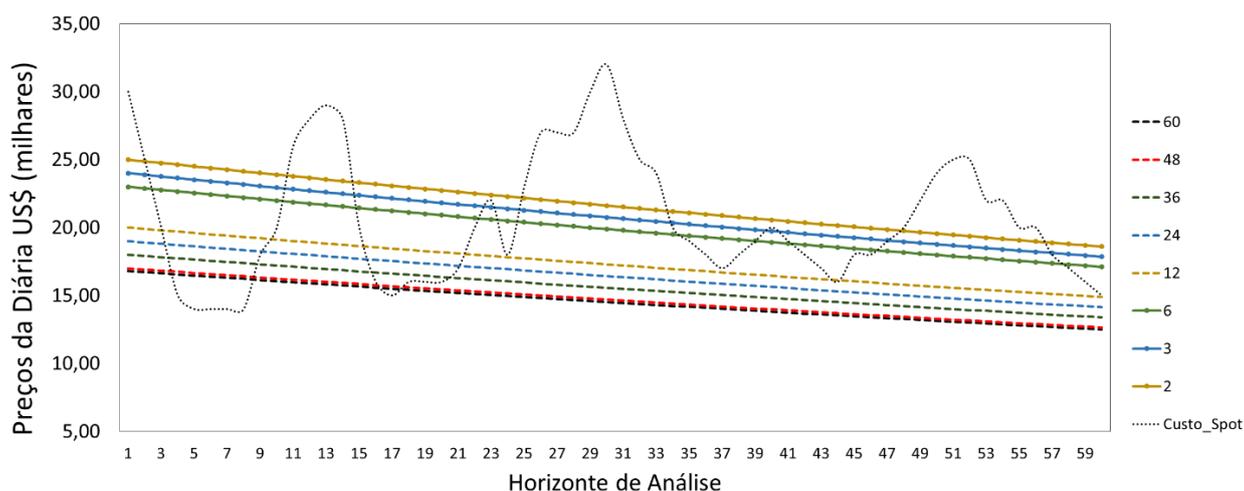
Já na configuração 3, as taxas de afretamentos médias de 2018 e 2019 são modificadas por um decréscimo de 0,5% a.m., ao longo do período de análise. Esse cenário é utilizado para representar um momento de tendência de baixa nas taxas de afretamento ao longo do período de análise. A Figura 13 apresenta graficamente a evolução das taxas de afretamento na configuração 3.

Figura 12 – Configuração 2: taxas de afretamento crescentes



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13 – Configuração 3: taxas de afretamento decrescentes



Fonte: Elaborado pelo autor

Taxa de afretamento *spot*: a taxa de afretamento *spot*, assim como a taxa de afretamento TCP, são valores estocásticos. Para a realização dos experimentos de simulação, são considerados valores aleatórios definidos entre o maior e o menor valor da taxa de afretamento de contratos *spot* verificados no período de junho/2014 até dezembro/2019. Os valores foram ajustados manualmente para que haja uma variação de situações e relações entre taxas de afretamento de contratos nas modalidades *spot* e por tempo, representando assim um maior número de cenários a serem avaliados nos experimentos de simulação.

Parâmetros de risco: são os parâmetros associados às restrições e cálculo da medida de risco *CVaR*. Esses parâmetros são definidos pelo decisor no momento anterior ao início da solução do modelo de otimização. Os parâmetros ajustáveis são o nível de confiança do *CVaR* (tipicamente 90%, 95% e 99%) e o risco máximo mensal aceito no processo de otimização, representado por um valor financeiro definido pelo decisor. Esse parâmetro é utilizado como uma restrição, de forma a garantir que o modelo aceite um risco máximo, ou seja, um valor máximo de exposição ao se efetivar contratos da modalidade *spot*, de modo que o critério de risco seja respeitado.

Por exemplo, definir o valor do risco aceito como sendo um milhão de dólares por mês com o parâmetro de *CVaR* e $\alpha = 95\%$, significa que o decisor aceita que a perda financeira média nos 5% piores cenários de não realização do preço esperado do mercado *spot* frente aos valores históricos do passado seja de no máximo um milhão de dólares.

Os valores históricos das taxas de afretamento de contratos na modalidade *spot*, utilizadas no cálculo da função de perda, foram baseados em dados extraídos de relatórios

disponibilizados pela Clarkson Research referente ao período de jun/2014 à dez/2019 e praticadas no Mar do Norte. Não foram utilizadas taxas de afretamento na modalidade *spot* para o Brasil por não ser uma modalidade comumente praticada no mercado brasileiro e, por consequência, não estar disponível na base de dados consultada.

2.5.2 Otimização do modelo

Modelos de pesquisa operacional podem ser resolvidos por diferentes métodos, resumidos em duas abordagens distintas: (i) *hard*, um tipo de modelagem fundamentada em bases matemáticas, indicada para problemas bem estruturados e compreendidos e de natureza exata; e (ii) *soft*, que considera o contexto do problema, sendo recomendada quando é necessário se estudar questões comportamentais e contextuais (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JUNIOR, 2013). Pelas características verificadas no problema de pesquisa da presente dissertação, a abordagem de modelagem que mais se alinha é a *hard*. Entre as técnicas compreendidas por esta abordagem, estão: programação matemática (método exato), heurísticas e meta-heurísticas, e simulação por eventos discretos (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JUNIOR, 2013).

No caso de modelos de otimização, um método exato é aquele que gera a melhor solução possível, ou seja, a solução ótima do ponto de vista da função objetivo. Um modelo de programação linear, onde as variáveis de decisão e as restrições são lineares, que é o caso do modelo desenvolvido para o problema avaliado no presente trabalho, pode ser resolvido de forma exata, ainda que envolvendo milhares de variáveis e restrições (CAUCHICK-MIGUEL *et al.*, 2018). Tratando-se de modelos de programação linear inteira (PLI), onde as variáveis de decisão sobre o número de contratos de embarcações de apoio *offshore* assumem valores inteiros, o número de soluções a serem verificadas é menor e tem a garantia de possuir apenas um número finito de soluções viáveis (HILLIER; LIEBERMAN, 2010).

No caso do problema de otimização do mix de contratos, para que o espaço de soluções possíveis seja avaliado, deve-se considerar a quantidade de modalidades de contrato possíveis, isto é, as possíveis vigências de um contrato, bem como, o momento de início deste contrato. Considere uma situação genérica onde existe a possibilidade de serem celebrados contratos de qualquer vigência, isto é, contratos com duração de 1 mês a 60 meses, bem como a possibilidade destes contratos terem seu início em qualquer período do horizonte de análise, assumido também como de 60 meses. Para este cenário, cada uma das $60 \times 60 = 3600$ células da Tabela

6 pode ser interpretada como uma possibilidade de configuração para o contrato de uma embarcação específica.

Tabela 6 – Tabela de possibilidades de contrato

Início\Vigência	1	2	3	...	59	60
1						
2						
3						
...						
59						
60						

Fonte: Elaborado pelo autor

Por exemplo, assumindo o caso em que haja a necessidade de definir a contratação de 100 embarcações, quando avaliada a forma de contratação da primeira embarcação, haverá 3600 possíveis escolhas. Quando for avaliada a forma de contratação da segunda embarcação, haverá também 3600 possíveis escolhas para sua contratação. Uma vez que para cada escolha possível da forma de contrato da primeira embarcação haverá também 3600 formas de contrato diferentes para uma segunda embarcação, o número total de formas possíveis para se realizar a contratação destas duas embarcações seria de $3600 \times 3600 = 3600^2 = 12.960.000$ combinações diferentes. Considerando agora as 100 embarcações assumidas neste caso hipotético, o número total de soluções possíveis seria $3600^{100} \approx 4 \times 10^{355}$, o que demonstra o nível de complexidade do problema em estudo.

Com a popularização de técnicas e métodos de pesquisa operacional, hoje existem diversas opções comerciais de *softwares* ou pacotes de otimização para resolver modelos de programação linear e, assim, facilitar a análise das soluções. O *software* CPLEX, por exemplo, utiliza o método *branch-and-bound*, que resolve problemas de PLI por meio do algoritmo SIMPLEX (ARPINI, 2015; CAUCHICK-MIGUEL *et al.*, 2018; PANTUSO; FAGERHOLT; WALLACE, 2017). O método SIMPLEX, por sua vez, é um algoritmo bastante eficiente e conhecido na literatura, uma vez que busca pela solução ótima pesquisando apenas um subconjunto dos vértices da região factível do problema (ARENALES *et al.*, 2011).

Pelas razões supracitadas, o software CPLEX foi o escolhido para a solução do modelo de otimização do presente trabalho. Os resultados apresentados no capítulo 3 foram obtidos pelo emprego do software IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* na versão 12.9.0 e implementado no ambiente Eclipse (CPLEX, 2019). O código utilizado no presente trabalho está apresentado no Apêndice A.

3 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

No presente capítulo, é apresentado o procedimento de validação do modelo de otimização desenvolvido, com o uso dos dados de taxas de afretamento e demanda discutidos na seção 2.5.1. A partir da validação do modelo de otimização, são apresentados os resultados obtidos com a realização de experimentos de simulação para diferentes cenários de comportamento das taxas de afretamento e de modalidades de contrato disponíveis.

3.1 EXPERIMENTOS DE VALIDAÇÃO

Para a validação do modelo de otimização desenvolvido no presente trabalho, foram realizados experimentos assumindo um número limitado de modalidades de contrato, para melhor examinar o comportamento do modelo em cenários onde os resultados esperados são de fácil compreensão. Para isso, nesta etapa de validação, o uso do modelo fica limitado a apenas três modalidades de contrato: por tempo, com vigências de 2 meses e 4 anos, e *spot*.

Para analisar de maneira separada o efeito do uso de contratação *spot*, três diferentes estratégias de composição de contratos são definidas de acordo com as modalidades de contrato possíveis de serem empregadas:

1. Apenas contratos por tempo de 2 meses e 4 anos;
2. Contratos por tempo de 2 meses, 4 anos e *spot* sem restrição do risco associado à contratação;
3. Contratos por tempo de 2 meses, 4 anos e *spot* com restrição de risco associado à contratação, limitado em US\$ 5.000.000,00/mês, com um nível de confiança de 95% do *CVaR* e $\omega_t = 1$ para todo período t .

Além das três estratégias de composição de contratos, foi utilizada apenas uma configuração de taxas de afretamento para cada modalidade de contrato. Para os experimentos de validação, foi escolhida de forma arbitrária a configuração 2, ou seja, a configuração com taxas de afretamento crescentes (Figura 12). A formação das configurações de taxas de afretamento é discutida na seção 2.5.1.

O horizonte de análise considerado em todos os cenários avaliados no presente capítulo é sempre de 60 meses, tanto nos experimentos de validação quanto nos experimentos de simulação de cenários. No que se refere à demanda por embarcações, cuja formulação para a análise também é discutida na seção 2.5.1, ressalta-se que, para fins de validação do modelo, ela é sempre atendida de forma integral, não havendo qualquer restrição de disponibilidade de

embarcações para contratação, ou seja, o número de embarcações disponíveis para contratação é sempre maior que valor de demanda superior.

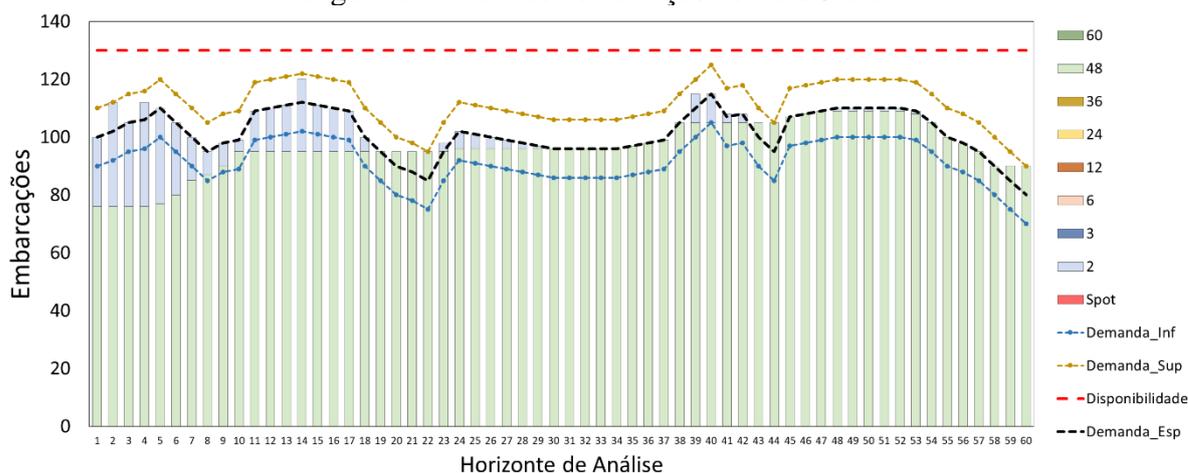
3.1.1 Contratos de 2 meses e 4 anos

Nessa seção, são apresentados os resultados para os valores da função objetivo e do risco associado à contratação no cenário onde existe apenas a possibilidade de contratação de embarcações por tempo, com vigências de 2 meses e 4 anos.

O resultado deste primeiro experimento de validação é apresentado na Figura 14, onde podem ser visualizadas as quantidades dos contratos vigentes, mês a mês, representados pelas barras correspondentes a cada modalidade considerada no experimento. As barras de cor verde representam o número de embarcações com contratos ativos na modalidade por tempo e vigência de 4 anos, enquanto as barras de cor azul representam o número de embarcações com contratos ativos na modalidade por tempo e vigência de 2 meses. Com o uso desta representação, a Figura 14 mostra o número acumulado de embarcações com contratos ativos em ambas as vigências. Desta forma, é possível avaliar de que forma cada uma das demandas (inferior, superior e esperada) são atendidas. Conforme referido anteriormente, a disponibilidade de embarcações para contratação é maior que a demanda superior.

Para o primeiro experimento de validação, o valor ótimo da função objetivo, em milhares de dólares, foi de 3.481.648,03 e do risco associado ao mix foi de 0,00, visto que não é permitido o uso de contratos na modalidade *spot*. Nesse cenário, onde os preços de afretamento dos contratos na modalidade por tempo são crescentes com uma taxa fixa de 0,5% a.m., a solução gerada pelo emprego do modelo de otimização indicou a contratação da maioria das embarcações por meio da modalidade por tempo com vigência de 4 anos, de forma a atender a demanda base. A utilização de contratos por tempo com duração de 2 meses aconteceu até o 18º mês da análise, mesmo que contratos com esta vigência apresentem um custo maior. O uso desta vigência de contrato no período inicial é justificado pelo fato dos preços de afretamento crescerem a uma taxa fixa, para ambas as vigências consideradas. A diferença de valor entre um contrato de 2 meses e um de 48 meses tende a aumentar com o passar do período da análise. Também é possível observar que em alguns meses, como por exemplo nos meses 2, 4, 14 e 39, a solução gerada indica a contratação de um número de embarcações superior à demanda esperada e, mesmo assim, garantindo um resultado menor para o valor da função objetivo. Tal procedimento é adotado em virtude da oscilação de demanda.

Figura 14 – Mix de contratação cenário 3.1.1



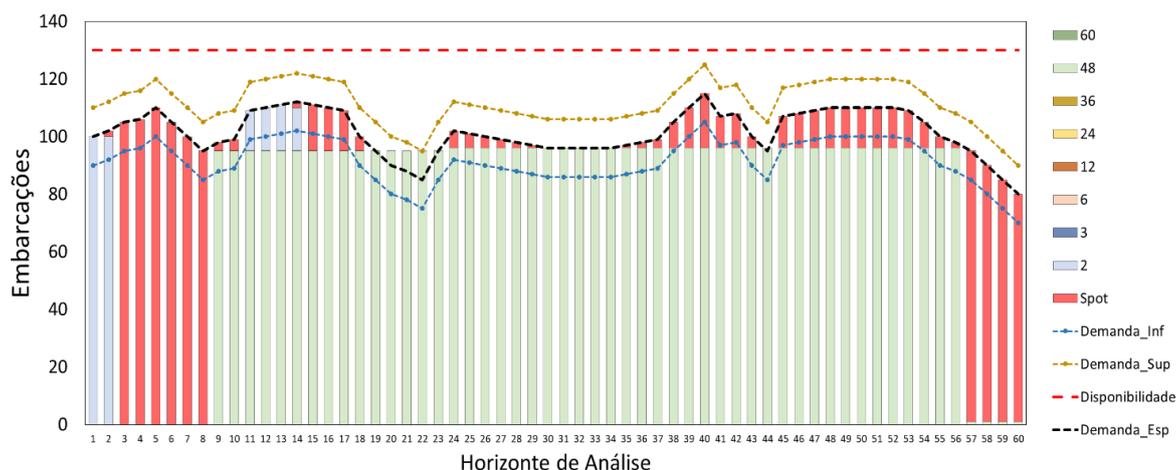
Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.2 Contratos de 2 meses, 4 anos e *spot* sem restrição de risco

Nessa seção, são apresentados os resultados para os valores da função objetivo e do risco de contratação no cenário onde existe a possibilidade de contratação de embarcações na modalidade por tempo, com vigências de 2 meses e 4 anos, e na modalidade *spot*, sem a restrição do risco de contratação *CVaR* associado.

O resultado do segundo experimento de validação é apresentado na Figura 15. O valor ótimo da função objetivo, em milhares de dólares, foi de 3.314.440,57 e do risco associado ao mix foi de 573.704,65, visto que a medida do risco *CVaR* associado às contratações na modalidade *spot* não é levado em conta como restrição. Nesse cenário, onde os preços de afretamento dos contratos na modalidade por tempo são crescentes a uma taxa fixa de 0,5% a.m., a solução gerada pelo emprego do modelo de otimização indicou, em alguns meses, a contratação de todas as embarcações por meio da modalidade *spot*, como se observa nos períodos do mês 3 ao 8 e do mês 57 ao 60. Isto acontece pelo fato dos contratos na modalidade *spot* apresentarem taxas de afretamento mais baratas do que os demais contratos para o período analisado. Como a taxa de afretamento dos contratos na modalidade por tempo é crescente nesse cenário, a solução gerada se valeu, no início, da contratação das embarcações na modalidade *spot* e, a partir do mês 9, indicou a contratação de toda a demanda base na modalidade por tempo, com vigência de 4 anos, deixando a oscilação da demanda ser absorvida principalmente por contratos na modalidade *spot*. Em alguns outros períodos, como é o caso dos meses de 11 a 14, observa-se a indicação de uso de contratos na modalidade por tempo com vigência de 2 meses, por conta do fato de apresentarem um custo menor para este período.

Figura 15 – Mix de contratação cenário 3.1.2



Fonte: Elaborado pelo autor

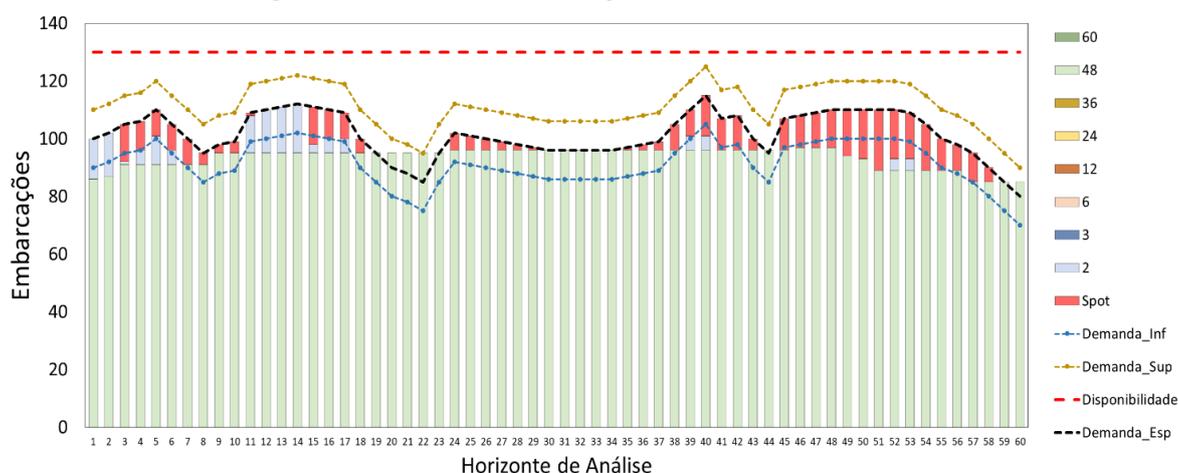
3.1.3 Contratos de 2 meses, 4 anos e *spot* com restrição de risco

Nessa seção, são apresentados os resultados para os valores da função objetivo e do risco de contratação no cenário onde existe a possibilidade de contratação de embarcações na modalidade por tempo, com vigências de 2 meses e 4 anos, e na modalidade *spot*, com uso da restrição de risco definida em US\$ 5.000.000,00/mês, com um nível de confiança de 95% do *CVaR*.

O resultado para o terceiro experimento de validação é apresentado na Figura 16. O valor ótimo da função objetivo, em milhares de dólares, foi de 3.386.111,97 e do risco associado ao mix foi de 134.062,40, visto que neste cenário a medida do risco está controlada por uma restrição. A imposição de uma restrição mensal ao risco de contratação, ao qual uma solução está exposta, visa a garantir que todo o saldo de risco não seja utilizado em apenas alguns poucos meses, mas seja distribuído ao longo do período da análise. Nesse cenário, onde os preços de afretamento dos contratos na modalidade por tempo são crescentes a uma taxa fixa de 0,5% a.m., a solução gerada pelo emprego do modelo de otimização indicou a contratação da maioria das embarcações por meio da modalidade por tempo, com duração de 4 anos, suprindo assim quase que a totalidade da demanda, utilizando modalidades de contratação com vigências menores apenas para absorver a oscilação na demanda. Em meses onde os contratos na modalidade *spot* apresentam taxas de contratação menores que as taxas de contratação por tempo com vigência de 2 meses, estes são utilizados até o limite da restrição imposta ao risco de contratação associado. Quando esta restrição é atingida, a solução ótima indica a contratação das demais embarcações por meio de contratos na modalidade por tempo e vigência de 2 meses. Isto é verificado nos períodos do mês 3 a 6, do mês 15 a 18, do mês 39 a 40 e do mês 52 a 53.

Em cenários onde há a possibilidade de contratação na modalidade *spot*, a solução gerada pelo emprego do modelo de otimização raramente viola o limite imposto pela demanda esperada, salvo em casos onde há uma queda mais brusca neste limite, como no período entre os meses 20 a 22. Nesse período, devido à demanda futura ser crescente, a solução ótima fornecida pelo emprego do modelo de otimização indicou como melhor estratégia ficar mais próximo do limite de demanda superior, uma vez que as taxas de afretamento para contratos na modalidade por tempo e com duração de 4 anos tendem a crescer no horizonte de análise.

Figura 16 – Mix de contratação cenário 3.1.3



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.4 Análise dados da validação

Os resultados obtidos por meio dos experimentos de validação mostram que o modelo de otimização tem o comportamento esperado frente a cenários possíveis. Os experimentos de validação foram limitados quanto à quantidade de modalidades e vigências dos contratos disponíveis para uso no processo de otimização. Isso aconteceu com o objetivo de que a análise dos resultados fosse mais simples. Quando a restrição de risco de contratação não é imposta, os resultados fornecidos pelo emprego do modelo de otimização indicam o uso, em sua totalidade, de contratos com risco associado, conforme esperado. Também é possível verificar que a base da contratação é atendida por contratos na modalidade por tempo com uma vigência maior. Esta estratégia de contratação é esperada, uma vez que esta modalidade e vigência de contrato apresenta taxas de afretamento menores nos cenários analisados. Porém, foi observado que as oscilações na demanda são supridas por contratos de menor duração, sendo empregados contratos na modalidade *spot* ou na modalidade por tempo com duração de 2 meses, conforme as taxas estiverem mais atrativas.

3.2 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir do emprego do modelo de otimização na solução de diferentes cenários, definidos com o intuito de representarem situações extremas e, assim, avaliar todos os recursos disponibilizados pelo modelo de otimização.

Para analisar de maneira separada o efeito do uso de contratações na modalidade *spot*, três diferentes estratégias de composição de contratos são propostas, de acordo com as modalidades e vigências disponíveis para uso no mix de contratação:

1. Apenas contratos na modalidade por tempo, com vigências de 2, 3 e 6 meses e 1, 2, 3, 4 e 5 anos;
2. Contratos na modalidade por tempo, com vigências de 2, 3 e 6 meses e 1, 2, 3, 4 e 5 anos, e na modalidade *spot*, sem restrição associada ao risco de contratação;
3. Contratos na modalidade por tempo, com vigências de 2, 3 e 6 meses e 1, 2, 3, 4 e 5 anos, e na modalidade *spot*, com restrição associada ao risco fixada em US\$ 5.000.000,00/mês e com um nível de confiança de 95% do *CVaR* e $\omega_t = 1$ para todo período t .

Para cada uma das três estratégias de composição de contratos definidas, foram consideradas três configurações de taxas de afretamento (seção 2.5.1) para todo o conjunto de modalidades de contrato. A partir destas definições, foram gerados nove diferentes cenários de simulação, a partir da combinação das composições de contratos disponíveis e das configurações de taxas de afretamento. A avaliação de cada um dos cenários criados permite a realização de um comparativo dos resultados gerados pelo modelo de otimização em diferentes situações que podem se apresentar em uma situação real

Conforme já referido, o horizonte de análise em todos os cenários é de 60 meses para todos os cenários avaliados, e a demanda por embarcações segue a formulação discutida na seção 2.5.1. É importante ressaltar que nas avaliações dos diferentes cenários, a restrição de disponibilidade não foi considerada, ou seja, a disponibilidade de embarcações para contratação está sempre acima do limite imposto para a demanda superior.

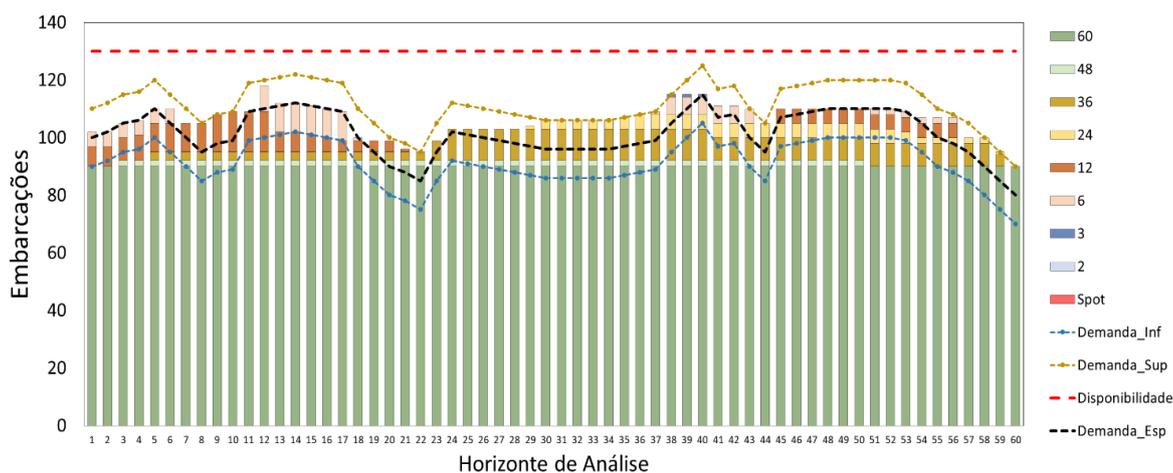
Os resultados serão apresentados de maneira sucinta e discutidos mais detalhadamente na seção 3.2.4.

3.2.1 Todos os tipos de contrato TCP e sem contratos *spot*

3.2.1.1 Cenário 1 – taxas de afretamento crescentes

O resultado do primeiro cenário avaliado é apresentado na Figura 17. O valor da função objetivo, em milhares de dólares, foi de 3.386.980,55 e do risco associado ao mix foi de 0,00. É observado que a solução gerada pelo emprego do modelo de otimização indica o atendimento da demanda base, principalmente, com a contratação de embarcações na modalidade por tempo e vigência de 5 anos, uma vez que esta modalidade e vigência de contrato apresenta as menores taxas de afretamento. Para suprir as oscilações de demanda, são utilizados contratos com vigências menores, principalmente contratos com duração de 3 anos. A restrição de demanda superior é sempre atendida, porém, em alguns meses, a solução ótima indica uma quantidade de contratos acima da demanda esperada, principalmente no período entre os meses 24 a 44.

Figura 17 – Mix de contratação - cenário 1



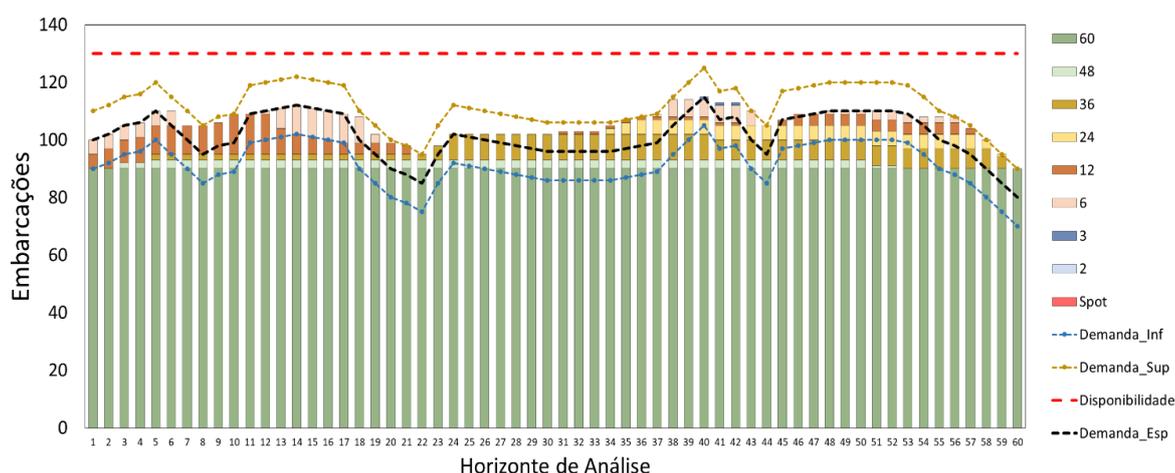
Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.1.2 Cenário 2 – taxas de afretamento decrescentes

O resultado do segundo cenário avaliado é apresentado na Figura 18. O valor da função objetivo, em milhares de dólares, foi de 3.277.831,23 e do risco associado ao mix foi de 0,00. É observado que a solução gerada pelo emprego do modelo de otimização indica o atendimento da demanda base, principalmente, com a contratação de embarcações na modalidade por tempo e vigência de 5 anos, como no *Cenário 1*, uma vez que esta modalidade e vigência de contrato apresenta as menores taxas de afretamento. Para suprir as oscilações de demanda, são utilizados contratos com vigências menores, principalmente contratos com duração de 1 ano e 3 anos. A restrição de demanda superior é sempre atendida, porém, em alguns meses, a solução ótima

indica a contratação de embarcações em uma quantidade acima da demanda esperada. Os cenários com taxas crescentes e decrescentes são bastante similares quanto aos contratos que suprem a demanda base, diferindo-se apenas quanto à duração dos contratos de menor vigência utilizados para satisfazer a demanda esperada.

Figura 18 – Mix de contratação - cenário 2

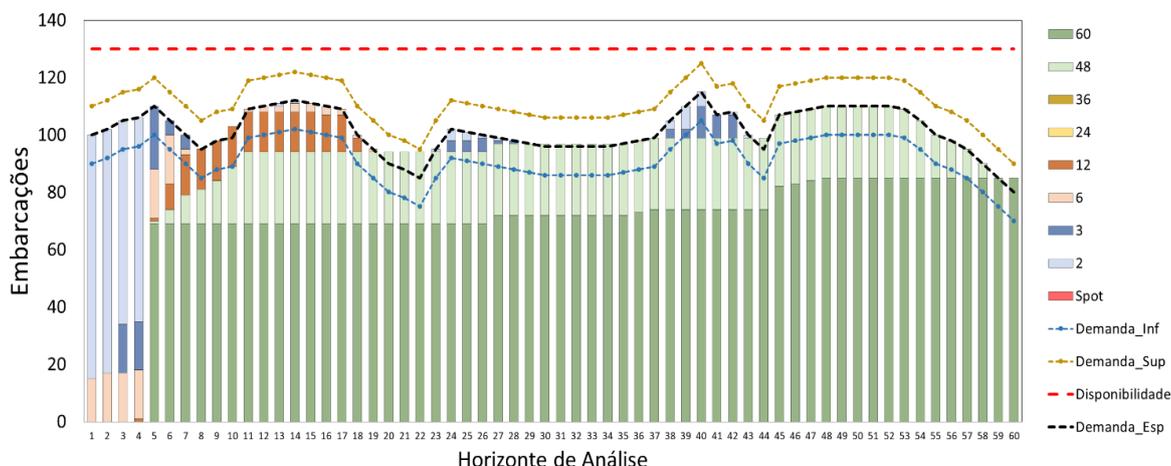


Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.1.3 Cenário 3 – taxas de afretamento oscilantes

O resultado do terceiro cenário avaliado é apresentado na Figura 19. O valor da função objetivo, em milhares de dólares, foi de 3.161.609,88 e do risco associado ao mix foi de 0,00. O resultado para o cenário com taxas de afretamento oscilatórias tem comportamento diferente daqueles para os cenários com taxas crescentes e decrescentes. No presente cenário, a solução gerada pelo emprego do modelo de otimização indica como estratégia de contratação esperar por baixas significativas nas taxas de afretamento para optar por contratos na modalidade por tempo, com duração de 5 anos. Esse comportamento é observado nos meses 5, 27 e 45. Nos quatro primeiros meses do horizonte de análise, a solução ótima também revela esta estratégia de aguardar a baixa de preços de contratos com vigências mais longas e indica a contratação de embarcações na modalidade por tempo com vigências menores, especialmente com vigências de 2 meses.

Figura 19 – Mix de contratação - cenário 3



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2 Todos os tipos de contrato TCP, com contratos *spot* e sem restrição de risco

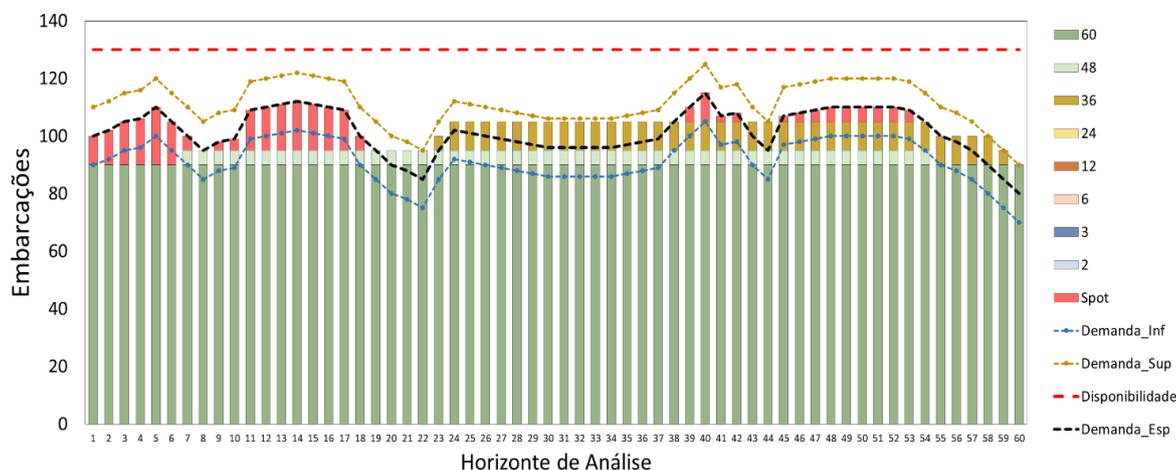
Nos resultados apresentados a seguir, o modelo de otimização foi utilizado considerando a possibilidade de serem empregados contratos da modalidade *spot*, porém ainda sem a restrição ao valor do risco associado ao mix de contratação. Desta forma, a solução gerada pelo emprego do modelo de otimização indicará o uso de contratos na modalidade *spot* em todos os momentos em que o seu custo de afretamento for menor.

3.2.2.1 Cenário 4 – taxas de afretamento crescentes

O resultado do quarto cenário avaliado é apresentado na Figura 20. O valor da função objetivo, em milhares de dólares, foi de 3.279.710,82 e do risco associado ao mix de contratação foi de 88.638,40. Nesse cenário, de forma semelhante aos resultados dos cenários 1 e 2, a solução gerada pelo emprego do modelo de otimização indica o atendimento da demanda base por meio da contratação de embarcações na modalidade por tempo e com vigência de 5 anos. Nos períodos onde as taxas de afretamento dos contratos na modalidade *spot* são inferiores às taxas de afretamento TCP, a solução ótima indica a contratação de embarcações nesta primeira modalidade. É importante notar que, nesses casos, o limite imposto pela demanda esperada é sempre atendido pois os contratos na modalidade *spot* possuem vigência de apenas 1 mês. No período do mês 24 a 38, a solução gerada pelo emprego do modelo de otimização indica a contratação de embarcações na modalidade por tempo, com duração de 3 anos, pois neste período as taxas de afretamento de contratos na modalidade *spot* são superiores às taxas dos

contratos TCP. Além disso, observa-se que também nesse período o número de embarcações contratadas fica acima do limite imposto pela demanda esperada.

Figura 20 – Mix de contratação - cenário 4



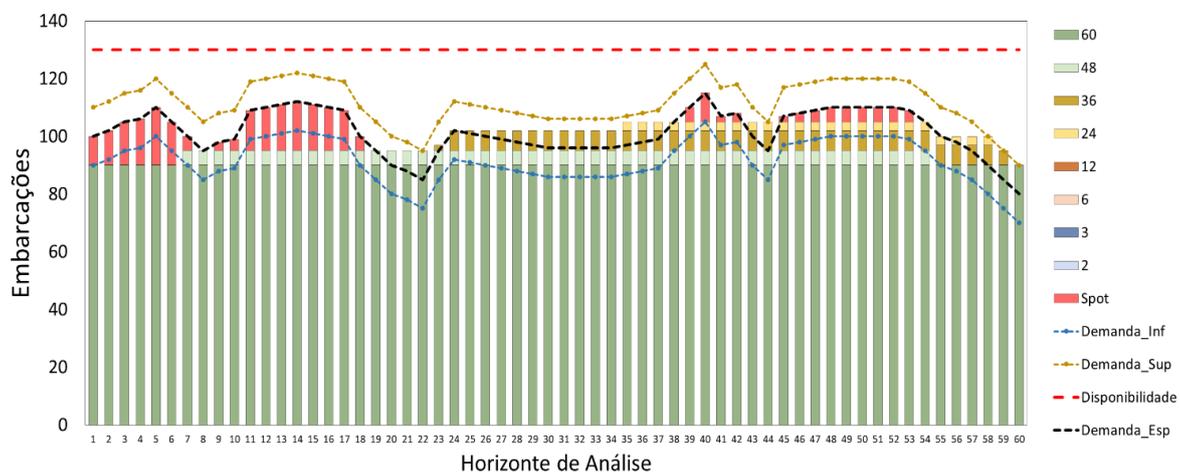
Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2.2 Cenário 5 – taxas de afretamento decrescentes

O resultado do quinto cenário avaliado é apresentado na Figura 21. O valor da função objetivo, em milhares de dólares, foi de 3.209.922,98 e do risco associado ao mix de contratação foi de 88.638,40. Nesse cenário, de forma semelhante aos resultados dos cenários 1 e 2, a solução gerada pelo emprego do modelo de otimização indica o atendimento da demanda base por meio da contratação de embarcações na modalidade por tempo e com vigência de 5 anos. Nos períodos onde as taxas de afretamento dos contratos na modalidade *spot* são inferiores às taxas de afretamento TCP, a solução ótima indica a contratação de embarcações nesta primeira modalidade, como ocorreu no *Cenário 4*. É importante notar que, nesses casos, o limite imposto pela demanda esperada é sempre atendido pois os contratos na modalidade *spot* possuem vigência de apenas 1 mês. No período do mês 24 ao mês 38, a solução gerada pelo emprego do modelo de otimização indica a contratação de embarcações na modalidade por tempo, com duração de 3 anos, pois neste período as taxas de afretamento de contratos na modalidade *spot* são superiores às taxas dos contratos TCP com esta vigência. Além disso, observa-se que também nesse período o número de embarcações contratadas fica acima do limite imposto pela demanda esperada. A maior diferença entre os resultados deste cenário e o anterior, *Cenário 4*, é também a utilização de contratos na modalidade por tempo com vigência de 2 anos para

atendimento à demanda em alguns períodos, como aquele compreendido entre os meses 35 a 58.

Figura 21 – Mix de contratação - cenário 5

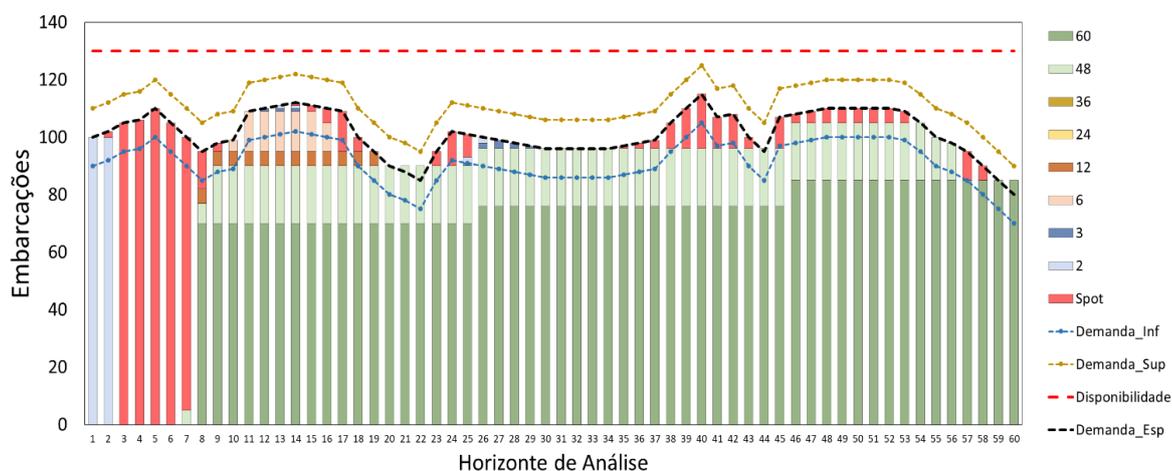


Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2.3 Cenário 6 – taxas de afretamento oscilantes

O resultado do sexto cenário avaliado é apresentado na Figura 22. O valor obtido para a função objetivo, em milhares de dólares, foi de 3.034.746,84 e para o risco associado ao mix foi de 339.341,75. Neste cenário, caracterizado pelas taxas de afretamento apresentarem um comportamento oscilatório ao longo do horizonte de otimização, a solução gerada pelo emprego do modelo de otimização indica a utilização de contratos na modalidade *spot* sempre quando o valor da taxa de afretamento nesta modalidade for inferior à taxa na modalidade TCP, notadamente os contratos de maior vigência, como aqueles de 4 e 5 anos de duração. Nos primeiros sete meses do horizonte de análise, como também se verificou no cenário 3, a solução ótima indica o uso de contratos de vigências menores para suprir a demanda durante esse período, tendo em vista a redução futura nos valores das taxas de afretamento de contratos na modalidade TCP e de longa duração. Além disso, a principal diferença observada no resultado do presente cenário em relação ao *Cenário 3* é o uso de contratos na modalidade *spot* no lugar de contratos na modalidade TCP com vigências de curto prazo.

Figura 22 – Mix de contratação - cenário 6



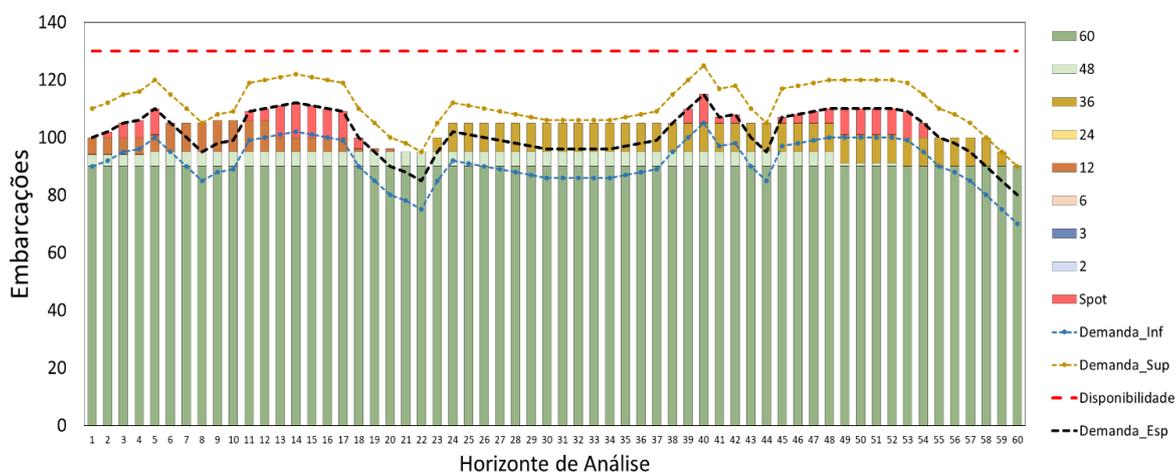
Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.3 Todos os tipos de contrato TCP, com contratos *spot* e com restrição de risco

3.2.3.1 Cenário 7 – taxas de afretamento crescentes

O resultado do sétimo cenário simulado é apresentado na Figura 23. O valor obtido para a função objetivo, em milhares de dólares, foi de 3.296.807,36 e para o risco associado ao mix foi de 53.673,25. Nesse cenário, a solução gerada pelo emprego do modelo de otimização satisfaz a demanda base de embarcações por meio de contratos na modalidade por tempo e vigência de 5 anos. Em meses onde as taxas de afretamento de contratos da modalidade *spot* são inferiores às taxas de afretamento TCP, a solução ótima indica a contratação de embarcações nesta primeira modalidade. Como nesse cenário é imposta a restrição que limita o risco associado ao mix de contratação, a solução ótima indica o uso de uma quantidade menor de contratos na modalidade *spot* se comparado com o resultado do *Cenário 4*, ficando limitado ao valor financeiro de exposição ao risco definido pelo decisor. É importante notar que, como existe uma limitação para o valor do risco de contratação, diferentemente do *Cenário 4*, o limite imposto pela demanda esperada nem sempre é satisfeito de forma exata, como observa-se no período do mês 7 ao mês 10, quando então é indicada a contratação de embarcações em uma quantidade superior à demanda esperada. No período do mês 23 ao mês 37, a solução ótima indica a contratação de embarcações na modalidade por tempo com vigência de 3 anos, uma vez que neste período as taxas de afretamento na modalidade *spot* estão superiores às taxas de contratos TCP, observando-se também nesse período uma quantidade de embarcações contratadas acima do limite imposto pela demanda esperada.

Figura 23 – Mix de contratação - cenário 7



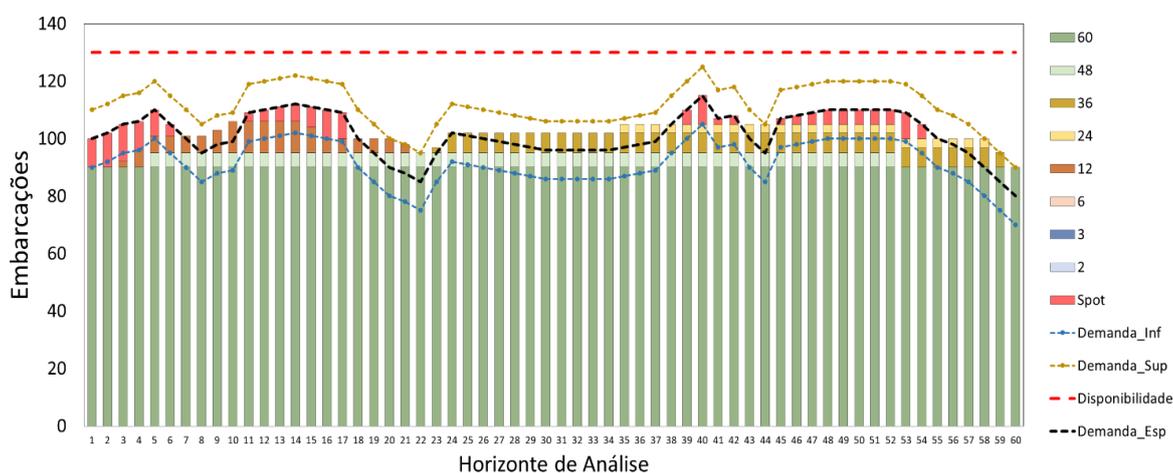
Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.3.2 Cenário 8 – taxas de afretamento decrescentes

O resultado do oitavo cenário avaliado é apresentado na Figura 24. O valor da função objetivo, em milhares de dólares, foi de 3.227.075,79 e do risco associado ao mix foi de 54.947,25. Nesse cenário, a solução gerada pelo emprego do modelo de otimização indica o atendimento da demanda base por meio da contratação de embarcações na modalidade por tempo e com vigência de 5 anos. Nos meses onde as taxas de afretamento na modalidade *spot* são inferiores às taxas TCP, a solução ótima indica a contratação de embarcações nesta primeira modalidade. Como nesse cenário é imposta a restrição que limita o risco associado ao mix de contratação, a solução ótima indica o uso de uma quantidade menor de contratos na modalidade *spot* se comparado com o *Cenário 5*, ficando limitado ao valor financeiro de exposição ao risco definido pelo decisor. É importante notar que, como existe uma limitação para o valor do risco de contratação, diferentemente do *Cenário 5*, o limite imposto pela demanda esperada nem sempre é satisfeito de forma exata, como pode ser observado no período do mês 8 ao mês 10, quando então é indicada a contratação de embarcações em uma quantidade superior à demanda. No período do mês 24 ao mês 38, a solução ótima indica a contratação de embarcações na modalidade por tempo e vigência de 3 anos, pois neste período as taxas de afretamento na modalidade *spot* estão superiores às taxas de contratos TCP, observando-se também que em parte desse período a quantidade de embarcações contratadas fica acima do limite imposto pela demanda esperada. Uma característica diferente entre os resultados dos cenários com taxas de afretamento crescentes e decrescentes, isto é, os *Cenários 7 e 8*, é que a solução ótima gerada para o caso de taxas de afretamento decrescentes evidencia a capacidade do modelo de

otimização em aguardar o momento mais propício para efetivar a contratação das embarcações na modalidade e vigências mais vantajosas, considerando o cenário futuro previsto. Essa diferença pode ser observada ao comparar os resultados dos *Cenários 7 e 8*, principalmente no período do mês 24 ao mês 37.

Figura 24 – Mix de contratação - cenário 8



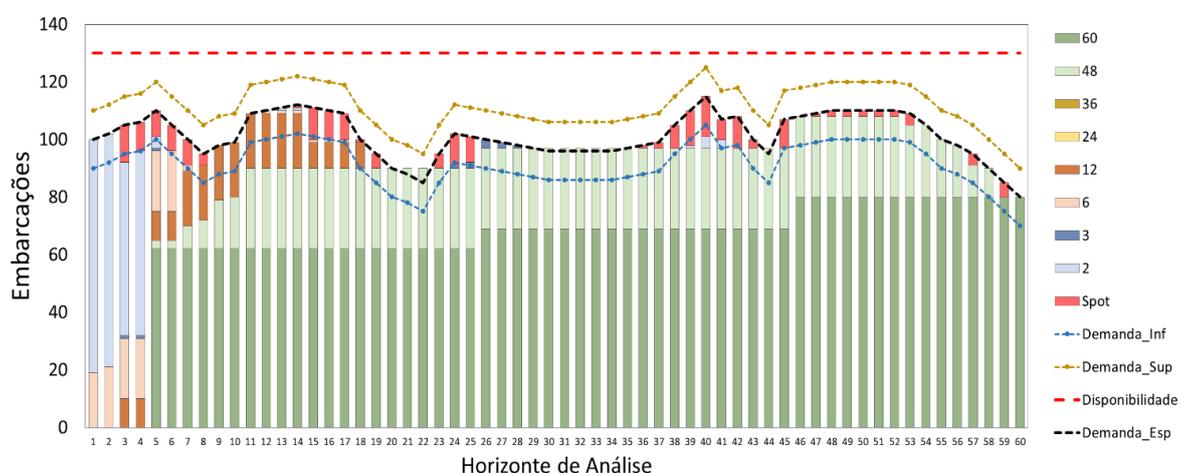
Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.3.3 Cenário 9 – taxas de afretamento oscilantes

O resultado do nono cenário avaliado é apresentado na Figura 25. O valor da função objetivo, em milhares de dólares, foi de 3.129.357,17 e do risco associado ao mix foi de 86.244,65. Neste cenário, caracterizado pelas taxas de afretamento apresentarem um comportamento oscilatório ao longo do horizonte de otimização, a solução gerada pelo emprego do modelo de otimização indica a utilização de contratos na modalidade *spot* sempre quando o valor da taxa de afretamento nesta modalidade for inferior à taxa dos contratos na modalidade TCP, notadamente os contratos de maior vigência, como aqueles de 4 e 5 anos de duração. Nos primeiros quatro meses do horizonte de análise, como também verificou-se nos *Cenários 3 e 6*, a solução ótima indica o uso de contratos com durações menores para suprir a demanda durante esse período, tendo em vista a redução futura nos valores das taxas de afretamento de contratos na modalidade TCP e de longa duração. Os contratos na modalidade *spot* são utilizados nesse período, porém a diferença em relação ao *Cenário 6* é o fato de que agora a quantidade de embarcações contratadas na modalidade *spot* está limitada pela restrição imposta pelo risco associado ao mix de contratos. É importante destacar que no presente cenário a restrição imposta pela demanda esperada é atendida de forma exata em todos os meses do horizonte de

otimização, apesar dos valores das taxas de afretamento apresentarem um comportamento oscilatório. Diferentemente dos cenários onde os valores das taxas de afretamento apresentam um comportamento único, de crescimento ou de redução, ao longo do horizonte de análise, o comportamento oscilatório destes valores permite ao modelo de otimização cumprir com as exigências de demanda esperada, utilizando contratos na modalidade *spot* para os ajustes pontuais do mix de contratação, fornecendo, assim, uma solução ótima com um menor valor para a função objetivo.

Figura 25 – Mix de contratação - cenário 9



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.4 Análise dos resultados

Para a realização da análise dos resultados obtidos nos experimentos, além dos comentários discorridos na apresentação de cada cenário, são analisadas as três estratégias de composição dos contratos: apenas TCP, TCP + *spot*/risco livre, e TCP + *spot*/risco controlado. Cada uma dessas estratégias é analisada em uma configuração de taxas de afretamento específica: crescente, decrescente ou oscilatória. Os resultados do mix de contratação obtidos para os cenários que consideram a estratégia apenas com contratos TCP são utilizados como referência na realização das comparações.

Algumas métricas são definidas para permitir a comparação dos diferentes cenários avaliados:

- Risco assumido [milhares de US\$]: o valor financeiro mensal do risco *CVaR* que o modelo assumiu no mix de contratação ótimo, com nível de confiança de 95%;
- Redução [milhares de US\$]: a diferença entre os valores da função objetivo (FO) utilizando o cenário de referência e o cenário comparado;

- Percentual de redução: o percentual do valor da redução em relação ao valor da FO do cenário de referência;
- Fator ganho/risco: resultado da divisão entre os valores de redução e risco assumido, permitindo mensurar a relação custo-benefício da utilização de contratos *spot* frente à configuração de taxas de afretamento assumida na comparação;
- Percentual do risco sobre a FO: representa qual é a proporção do risco assumido frente ao valor total da FO do cenário de referência.

Na Tabela 7, são apresentados os resultados para as métricas de comparação dos cenários em que foram utilizadas taxas de afretamento crescentes. A partir da comparação destes resultados, é possível verificar que o valor da FO é menor quando utilizados contratos na modalidade *spot*, como é o caso dos *Cenários 4 e 7*. O valor do percentual de redução é obtido ao comparar os respectivos valores da FO com o valor de referência, obtido no *Cenário 1*. É possível observar que a maior redução acontece quando a restrição de risco de contratação não é imposta, permitindo o modelo de otimização gerar uma solução que minimiza o valor da FO sem restrições ao uso de contratos na modalidade *spot*. Entretanto, uma medida adequada deste ganho só é obtida quando avaliado o fator ganho/risco, que compara a redução no valor da FO com o valor do risco a que se está exposto ao se indicar a contratação de embarcações na modalidade *spot* para compor o mix de afretamento ótimo. Se o valor do fator ganho/risco for maior que 1, então a expectativa de ganho é superior ao risco a que se está exposto pela não realização das taxas de afretamento esperadas para os contratos na modalidade *spot*.

É possível observar que o cenário que apresenta a melhor relação ganho/risco é o cenário onde o total de contratos na modalidade *spot* é limitado pela restrição de risco de contratação. Desta forma, observa-se que o fator ganho/risco do *Cenário 7* (1,680) é maior do que o correspondente valor para o *Cenário 4* (1,210).

Tabela 7 – Comparativo de cenários com taxas de afretamento crescentes

Cenário	Modalidade	Custo total da FO [$\times 10^3$ US\$]	Risco assumido [$\times 10^3$ US\$]	Redução [$\times 10^3$ US\$]	% de redução	fator ganho/risco	% de risco sobre FO
---------	------------	---	--------------------------------------	-------------------------------	--------------	--------------------------	---------------------

1	Apenas TCP	3.386.980,55	-	-	-	-	-
4	TCP + <i>spot</i> /risco livre	3.279.710,82	88.638,40	-107.269,73	-3,17%	1,210	2,62%
7	TCP + <i>spot</i> /risco controlado	3.296.807,36	53.673,25	-90.173,19	-2,66%	1,680	1,58%

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Tabela 8, são apresentados os resultados para as métricas de comparação dos experimentos quando utilizadas taxas de afretamento decrescentes. Neste caso, é possível observar que o *Cenário 8* foi o que apresentou o melhor valor de ganho/risco, cenário este onde há um controle sobre o valor do risco de contratação assumido, mediante a imposição de uma restrição. Porém, destaca-se que em um cenário onde as taxas de afretamento são decrescentes o valor do fator ganho/risco é inferior a 1, significando que neste cenário o valor do risco a que se está exposto é superior ao possível ganho ao se efetivar contratos na modalidade *spot*. Isto é observado tanto no *Cenário 5* quanto no *Cenário 8*.

Outra análise pertinente é a comparação entre os resultados dos *Cenários 4 e 5*, quando então o modelo de otimização foi utilizado sem considerar qualquer restrição ao risco associado à contratação do mix de afretamento. Em ambos os cenários, observa-se o mesmo valor de risco assumido, independentemente do comportamento das taxas de afretamento. A diferença dos valores de FO desses dois cenários está no custo de contratação de embarcações nas modalidades TCP. Esse efeito é devido ao fato das taxas de afretamento para contratos na modalidade *spot* serem as mesmas nos dois cenários supracitados.

Tabela 8 – Comparativo de cenários com taxas de afretamento decrescentes

Cenário	Modalidade	Custo total da FO [$\times 10^3$ US\$]	Risco assumido [$\times 10^3$ US\$]	Redução [$\times 10^3$ US\$]	% de redução	fator ganho/risco	% de risco sobre FO
2	Apenas TCP	3.277.831,23	-	-	-	-	-
5	TCP + <i>spot</i> / risco livre	3.209.922,98	88.638,40	-67.908,25	-2,07%	0,766	2,70%
8	TCP + <i>spot</i> / risco controlado	3.227.075,79	54.947,25	-50.755,44	-1,55%	0,924	1,68%

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Tabela 9, estão apresentados os resultados para as métricas de comparação dos experimentos quando utilizadas taxas de afretamento oscilantes. É possível observar que há uma redução significativa no uso de contratos na modalidade *spot*, se comparados os resultados para os *Cenários 6 e 9*. Entretanto, nos cenários onde são consideradas taxas de afretamento oscilatórias e que usam contratos na modalidade *spot*, a diferença observada entre os valores do

fator ganho/risco é menor do que a diferença observada entre eles em cenários que utilizam taxas de afretamento crescente e decrescente. Neste cenário em que são utilizadas taxas de afretamento oscilatórias, observa-se valores praticamente iguais para o fator ganho/risco quando comparados os cenários com e sem restrição ao risco de contratação. Também é possível verificar que nesse cenário de taxas de afretamento oscilatórias, o valor absoluto do fator ganho/risco é o menor dos 3 cenários, ou seja, é o cenário menos vantajoso para se usar contratações na modalidade *spot* frente ao risco associado, acredita-se que a razão deste comportamento seja que o preço médio nas taxas de afretamento TCP sejam próximas as taxas médias da modalidade *spot*. Entretanto seria necessária a avaliação de mais configurações de comportamento de taxas de afretamento para uma conclusão mais assertiva.

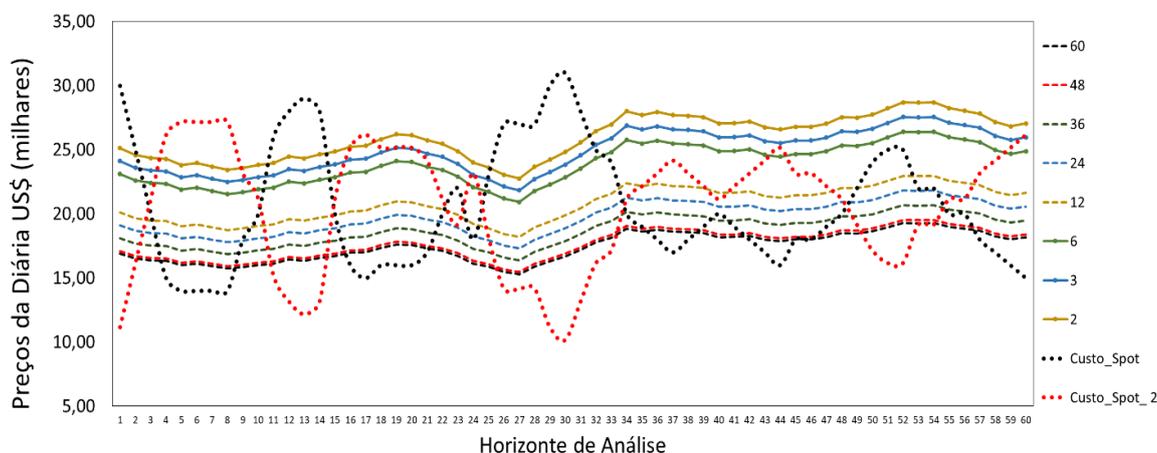
Outro fator importante a ser destacado é que nos cenários onde são empregadas taxas de afretamento oscilantes, a quantidade de embarcações contratadas é a que mais se aproxima do valor exato da demanda esperada. Ou seja, nos cenários avaliados com taxa de afretamento oscilante, o modelo de otimização fornece uma solução que indica a utilização de uma maior variabilidade de tipos de contratos para compor o mix de afretamento, permitindo que a demanda esperada seja atendida de forma exata.

Tabela 9 – Comparativo de cenários com taxas de afretamento oscilantes

Cenário	Modalidade	Custo total da FO [$\times 10^3$ US\$]	Risco assumido [$\times 10^3$ US\$]	Redução [$\times 10^3$ US\$]	% de redução	fator ganho/risco	% de risco sobre FO
3	Apenas TCP	3.161.609,88	-	-	-	-	-
6	TCP + spot / risco livre	3.034.746,84	339.341,75	-126.863,04	-4,01%	0,37385	10,73%
9	TCP + spot / risco controlado	3.129.357,17	86.244,65	-32.252,71	-1,02%	0,37397	2,73%

Fonte: Elaborado pelo autor

Para verificar se o fato dos valores da relação ganho/risco serem quase iguais é uma inconsistência no modelo ou uma coincidência, devido aos valores específicos utilizados para as taxas de afretamento oscilatórias, os mesmos cenários foram reavaliados, porém agora com os valores das taxas de afretamento de contratos na modalidade *spot* apresentando um comportamento inverso. A curva deste novo comportamento é apresentada na Figura 26, identificada como Custo_Spot_2.

Figura 26 – Novas taxas de contratação *spot*

Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado exposto na Tabela 10 mostra que, com a nova taxa de afretamento para os contratos na modalidade *spot*, os valores do fator ganho/risco para os cenários com e sem restrição de risco de contratação associado ao mix são diferentes. Isso permite concluir que a paridade dos valores do fator ganho/risco obtidos nos *Cenários 6 e 9* é, de fato, um resultado numérico que não se observa para outras configurações das taxas de afretamento oscilantes. Além disso, observa-se também que o valor do fator ganho/risco é maior para o cenário onde não existe restrição associada ao risco de contratação, que é um resultado contrário ao esperado. Uma possível explicação para este resultado pode estar no fato das diferentes relações entre TCP e *spot* não apresentarem necessariamente o mesmo comportamento, cuja investigação e análise estão fora do escopo deste trabalho.

Tabela 10 – Comparativo de cenários com taxas de afretamento oscilantes e novo *spot*

Cenário	Modalidade	Custo total da FO [$\times 10^3$ US\$]	Risco assumido [$\times 10^3$ US\$]	Redução [$\times 10^3$ US\$]	% de redução	fator ganho/risco	% de risco sobre FO
3	Apenas TCP	3.161.609,88	-	-	-	-	-
6	TCP + spot / risco livre	3.064.739,24	271.210,13	-96.870,64	-3,06%	0,35718	8,58%
9	TCP + spot / risco controlado	3.132.288,72	104.032,28	-29.321,16	-0,93%	0,28185	3,29%

Fonte: Elaborado pelo autor

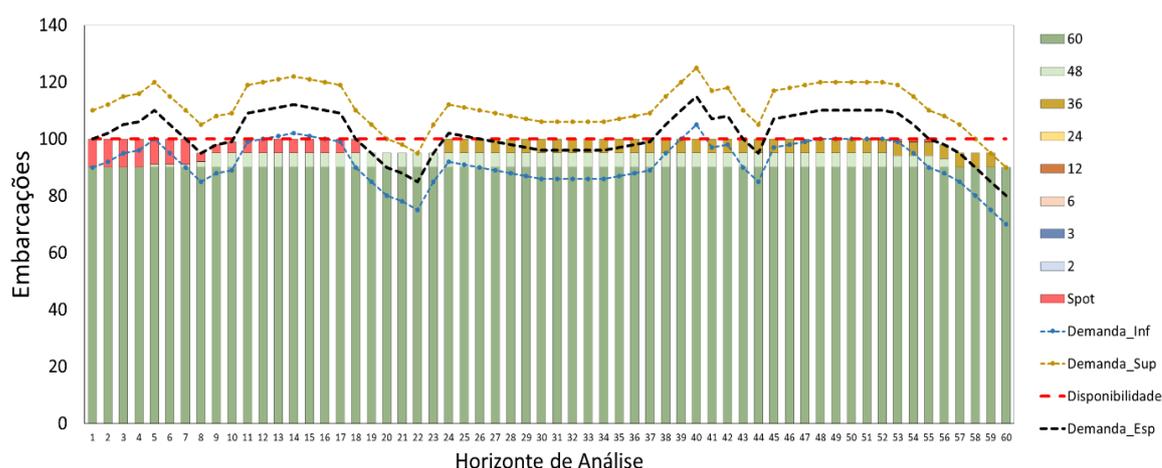
3.2.5 Restrição de disponibilidade

Com o objetivo de avaliar possíveis restrições de disponibilidade de embarcações para contratação, decorrentes de restrições impostas à navegação de cabotagem no Brasil, pode ser considerado no modelo de otimização uma restrição associada a esta limitação, conforme

definido pela equação (4) do modelo matemático apresentado na seção 2.4. Para tanto, é apresentado o resultado do *Cenário 9*, avaliado anteriormente, porém ampliado pela incorporação da restrição de disponibilidade, definida aqui em 100 embarcações para cada período do horizonte de análise.

O resultado para o cenário com restrição de disponibilidade de embarcações para contratação é apresentado na Figura 27. O valor da função objetivo, em milhares de dólares, foi de 3.041.553,80 e do risco associado ao mix foi de 42.275,05. É possível observar que o modelo usa como limite para o número de embarcações contratadas sempre o valor de disponibilidade imposto, ou seja, o modelo de otimização fornece uma solução que respeita a restrição de disponibilidade em todos os períodos do horizonte de análise, mostrando que esta restrição se sobrepõe às demais restrições de demanda.

Figura 27 – Mix de contratação com restrição de disponibilidade



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.6 Uso de contratos TCP com múltiplas vigências

Nessa seção, é analisado o impacto sobre o valor da FO decorrente do uso de contratos na modalidade por tempo, porém com a possibilidade de emprego de uma variedade maior de vigências. Para essa análise, foi utilizada a configuração que assume as taxas de afretamento oscilantes, sendo consideradas vigências adicionais ao modelo padrão, a fim de verificar o impacto do seu uso sobre o valor da FO.

Na Tabela 11, são apresentados os resultados obtidos com o aumento gradual do número de vigências disponíveis dos contratos de modalidade TCP considerados na simulação. A partir dos resultados apresentados, é possível verificar uma redução no valor da FO de até 4,48%, quando comparadas as configurações que consideram 2 e 8 vigências diferentes. Isso reforça o

fato de que mesmo sem a utilização de contratos na modalidade *spot*, quando há riscos de contratação assumidos por parte do decisor, a escolha pela utilização de uma maior quantidade de vigências diferentes pode ser uma opção para reduzir o valor da FO, isto é, o custo do mix de afretamento.

Com o objetivo de avaliar a potencialidade integral do modelo de otimização, foi avaliada a configuração onde são consideradas 60 diferentes vigências possíveis para os contratos por tempo. Nesta configuração, considera-se a possibilidade de qualquer contrato ter a duração entre 1 e 60 meses. Foi verificada uma redução de até 5,31% no valor da FO, sem considerar a possibilidade de contratos na modalidade *spot*, o que iria introduzir riscos associados à contratação. Para fins de comparação, foi considerada uma configuração que disponibiliza uma quantidade de oito diferentes vigências para contratos por tempo e contratos na modalidade *spot*, com a restrição de risco associado. Nesta configuração, embora o decisor trabalhe com uma quantidade menor de vigências, foi possível alcançar uma redução de até 5,52% no valor da FO, um resultado mais expressivo do que aquele quando empregadas 60 diferentes vigências para os contratos TCP. Este resultado mostra-se relevante uma vez que indica que é mais vantajoso considerar a possibilidade de contratos na modalidade TCP em um número limitado de vigências do que em uma variabilidade muito maior, desde que utilizados contratos na modalidade *spot* limitados pelo uso de uma restrição ao risco de contratação associado.

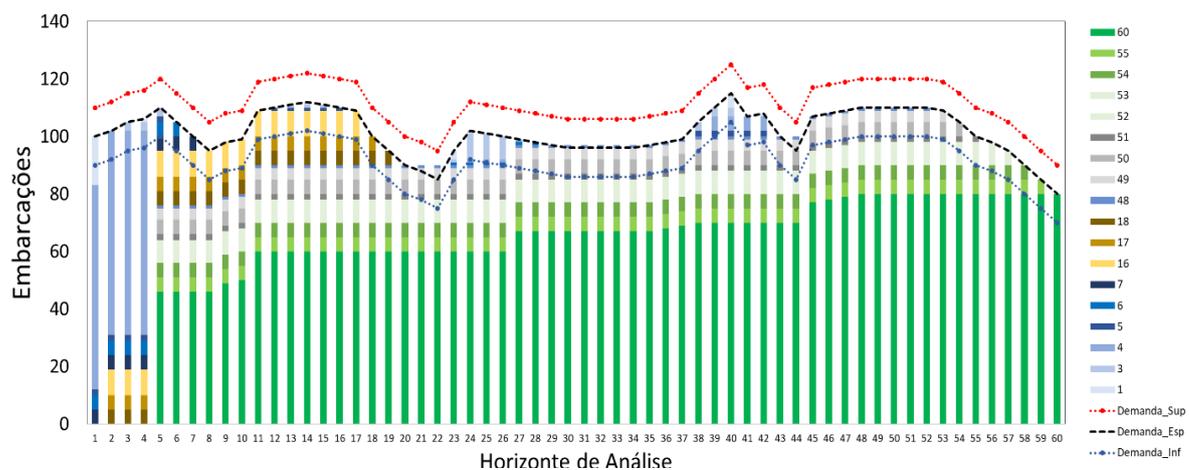
Tabela 11 – Comparativo de quantidade de vigências TCP

Quantidade de vigências	Taxas Oscilantes	Custo total da FO [milhares de US\$]	Redução [$\times 10^3$ US\$]	% de redução
2	TPC/6 meses + 5 anos	3.304.034,09	-	-
3	TPC/6 meses + 3 e 5 anos	3.277.752,21	-26.281,88	-0,80%
4	TPC/6 meses + 1, 3 e 5 anos	3.238.601,59	-65.432,50	-2,00%
5	TPC/3 e 6 meses + 1, 3 e 5 anos	3.211.531,33	-92.502,76	-2,86%
6	TPC/3 e 6 meses + 1, 2, 3 e 5 anos	3.210.384,19	-93.649,90	-2,92%
7	TPC/3 e 6 meses + 1, 2, 3, 4 e 5 anos	3.179.799,58	-124.234,51	-3,87%
8	TPC/2, 3 e 6 meses + 1, 2, 3, 4 e 5 anos	3.161.609,88	-142.424,21	-4,48%
8 + <i>spot</i>	TPC/2, 3 e 6 meses + 1, 2, 3, 4 e 5 anos + <i>spot</i>	3.129.357,17	-174.676,92	-5,52%
60	TCP/1 a 60 meses	3.137.967,01	-166.067,08	-5,31%

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 28, é apresentado o mix de contratação gerado quando utilizando as 60 vigências disponíveis no modelo de otimização, com taxas de afretamento oscilantes.

Figura 28 – Mix de contratação com 60 vigências e taxas oscilantes



Fonte: Elaborado pelo autor

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo de otimização baseado em programação linear para auxiliar o tomador de decisões no processo de contratação de embarcações de apoio *offshore*, considerando incertezas sobre demanda e preço, e avaliação de risco.

Para isso, foi elaborado um modelo de otimização baseado nas representações conceitual, matemática e computacional desenvolvidas de forma a traduzir a realidade do problema. No modelo desenvolvido, levou-se em consideração o fato da frota ter que atender não só as necessidades de suprimento das unidades marítimas existentes, mas também das unidades cuja instalação futura está planejada, gerando, com isso, uma demanda por transporte que varia com o tempo e que deve ser atendida pelas embarcações afretadas. O modelo desenvolvido permitiu a identificação da melhor configuração de contratos de afretamento nas modalidades TCP ou *spot*, frente às oscilações de preço futuras que essas modalidades apresentam, sem que restrições como disponibilidade de embarcações para afretamento, demanda e risco associado à contratação *spot* fossem violadas.

Devido às incertezas relacionadas ao comportamento do preço futuro no mercado *spot*, uma vez que é uma modalidade de contrato em que o decisor define, na data da análise, o que fará em um momento futuro, o risco do uso desse tipo de contrato foi modelado matematicamente pelo emprego da medida *CVaR*, sendo utilizado como uma restrição que impõe um limite mensal de risco aceito e que representa a perda financeira tolerada pelo decisor. Por meio de uma comparação entre os valores históricos de contratação *spot* e os valores futuros esperados, o decisor tem a possibilidade de optar pelo valor do risco ao qual ele estará disposto a correr frente a parâmetros definidos mensalmente.

A etapa de validação mostrou que o modelo é adequado para identificar a configuração de contratos ideal que minimiza a função do custo do mix e atende as restrições de demanda impostas, indicando as realizações das contratações conforme o esperado em períodos onde os contratos estão com as taxas menores, dentro do horizonte de análise. Após a etapa de validação, foram realizados experimentos de simulação considerando nove cenários distintos, definidos a partir do uso de três configurações de taxas de afretamento (crescente, decrescente e oscilatória) e três composições de contratos (TCP, TCP + *spot* (risco livre), TCP + *spot* (risco controlado)). Inicialmente, os cenários foram comparados frente às diferentes configurações de taxas de afretamento e composição de contratos. Posteriormente, os cenários foram comparados em relação à redução no custo do mix ótimo quando comparados com o cenário de pior

desempenho, representado pelo cenário que emprega apenas contratos na modalidade TCP, usado como referência.

Os resultados obtidos nesta análise posterior indicaram que o uso do modelo de otimização prioriza as contratações da modalidade *spot* quando essa apresenta preços inferiores aos da modalidade TCP, conforme o esperado. Quando não há a opção de contratação na modalidade *spot*, o modelo de otimização indica o uso de contratos com vigências mais longas e de preço inferior para suprir a demanda básica, e contratos com vigências mais curtas para absorver a oscilação da demanda.

A partir dos resultados dos experimentos, também foi possível observar que, com as taxas de afretamento utilizadas, a utilização de contratos na modalidade *spot* pode reduzir o custo do mix em até 4,01% (sem restrição ao risco e com taxas oscilatórias) e em até 2,66% (com restrição ao risco e com taxas crescentes). Outra métrica analisada foi a relação ganho/risco, com e sem o uso da restrição ao risco associado aos contratos na modalidade *spot*, sendo observados os melhores resultados quando empregada a restrição ao risco de contratação. Entretanto, este entendimento pode ser diferente de acordo com a relação existente entre as taxas de afretamento de contratos nas modalidades *spot* e TCP.

Para contextos em que o decisor não esteja disposto a se expor aos riscos financeiros associados aos contratos na modalidade *spot*, foi realizada uma análise acerca do impacto de ser utilizada uma maior variabilidade das vigências de contratos TCP. Foi observado que, mesmo sem o uso de contratos na modalidade *spot* e, conseqüentemente, com risco zero, foi possível determinar um mix de contratos, baseado em oito vigências de contratos TCP, com um custo até 4,48% menor que o custo de um mix obtido considerando apenas duas vigências de contratos TCP. Para avaliar a capacidade plena do modelo de otimização, foi considerada a possibilidade de serem utilizados contratos da modalidade TCP de até 60 vigências diferentes, tendo sido obtida uma redução de 5,31% no valor ótimo do custo do mix de contratação, se comparado ao custo ótimo quando utilizadas apenas duas vigências de contratos TCP. Este resultado mostra que a redução no valor do custo do mix ótimo não diminui na mesma proporção que mais vigências são utilizadas no processo de otimização. Entretanto, este mesmo resultado evidenciou a vantagem no uso de contratos na modalidade *spot*, uma vez que foi alcançada uma redução ainda maior, de 5,52% no valor do custo ótimo quando utilizadas apenas oito vigências de contratos da modalidade TCP em conjunto com contratos da modalidade *spot*, novamente quando comparado com o cenário com apenas duas vigências de contratos TCP.

Do ponto de vista empresarial, o trabalho apresentou resultados financeiros expressivos. No cenário onde se considera o crescimento futuro das taxas de afretamento, o modelo

conseguiu reduzir o custo do mix ótimo em 2,66%, utilizando contratos na modalidade TCP combinados com contratos na modalidade *spot* e com restrição de risco, isto é, aproximadamente 90 milhões de dólares em um período de 5 anos. A configuração que combina o uso de contratos de ambas as modalidades se aproxima de um cenário mais realista, vivenciado por empresas que atuam em outros mercados que não o brasileiro como, por exemplo, no Mar do Norte. Se comparado a uma política conservadora de contratação, que indica o uso exclusivo de contratos na modalidade TCP e com o uso de apenas duas vigências, esse impacto seria ainda maior, na ordem de 5,52%, representando uma economia de 175 milhões de dólares em 5 anos. Mesmo que fossem utilizados apenas contratos na modalidade TCP, sem risco ao decisor, o custo total do mix pode ser reduzido em até 4,48%, o que representaria uma economia de 142 milhões de dólares, caso o decisor optasse por utilizar oito vigências no lugar de apenas duas.

4.1 TRABALHOS FUTUROS

Identificado como lacuna na literatura, o presente trabalho propõe a apresentação de um modelo conceitual e matemático do risco associado ao custo financeiro de uma empresa que adota uma política de afretamento de embarcações de apoio marítimo baseada apenas em contratos TCP, não tendo flexibilidade ou opção de gerir adequadamente a sua frota contratada. Porém, devido a flutuações no mercado de petróleo e ao risco de não confirmação de uma expectativa futura de exploração e produção, possivelmente haverá uma quantidade de barcos contratados que ficarão ociosos. A etapa proposta a ser desenvolvida em um próximo trabalho visa a encontrar uma forma, seja por restrição ou penalização da função objetivo, de associar uma medida de risco associada à estimativa futura da demanda. Outro possível trabalho futuro seria a investigação do impacto das relações entre taxas de afretamento TCP e *spot* sobre o desempenho do modelo e outras soluções ótimas.

REFERÊNCIAS

ADLAND, Roar; CARIOU, Pierre; WOLFF, Francois-charles. What makes a freight market index ? An empirical analysis of vessel fixtures in the offshore market. **Transportation Research Part E**, v. 104, p. 150–164, 2017. DOI 10.1016/j.tre.2017.06.006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2017.06.006>.

ADLAND, Roar; CARIOU, Pierre; WOLFF, Francois Charles. The influence of charterers and owners on bulk shipping freight rates. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2016. DOI 10.1016/j.tre.2015.11.014. .

AGAMA, Ferdinand O.; ALISIGWE, Henry C. Cabotage regimes and their effects on states' economy. **Nnamdi Azikiwe University Journal of International Law and Jurisprudence**, v. 9, n. 1, p. 71–82, 2018. .

ANTAQ. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 01-ANTAQ, DE 13 FEVEREIRO DE 2015**. . [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://portal.antaq.gov.br/index.php/16383-2/>. , 2015

ARPINI, Bianca Passos. **PLANEJAMENTO DA LOGÍSTICA DE SUPRIMENTO DE PLATAFORMAS OFFSHORE POR MEIO DE UM MODELO MATEMÁTICO 2L-CVRP COM FROTA HETEROGÊNEA E EQUILÍBRIO NÁUTICO**. 2015. 163 f. Universidade Federal do Espírito Santo, 2015.

ARSLAN, Ayşe N.; PAPAGEORGIU, Dimitri J. Bulk ship fleet renewal and deployment under uncertainty: A multi-stage stochastic programming approach. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2017. DOI 10.1016/j.tre.2016.10.009. .

ARTZNER, PHILIPPE *et al.* COHERENT MEASURES OF RISK. **Mathematical Finance**, v. 9, n. 3, p. 203–228, 1999. DOI 10.1111/1467-9965.00068. .

BAKKEHAUG, Rikard *et al.* A stochastic programming formulation for strategic fleet renewal in shipping. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 72, p. 60–76, 2014. DOI 10.1016/j.tre.2014.09.010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2014.09.010>.

BANIHASHEMI, Shokoofeh; AZARPOUR, Ali Moayedi; KAVEH, Marziye. Multi-stage stochastic model in portfolio selection problem. **Filomat**, v. 32, n. 3, p. 991–1001, 2018. DOI 10.2298/FIL1803991B. .

BORDALO, Filipe Bordalo; DORES, Priscila Branquinho. O mercado de apoio offshore – panorama e perspectivas. **BNDES Setorial** 43, p. 295–323, 2014. .

CAUCHICK-MIGUEL, Paulo A *et al.* **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

CPLEX. 2019. Disponível em: <https://www.ibm.com/support/pages/downloading-ibm-ilog-cplex-optimization-studio-v1290>.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES JUNIOR, Jose Antonio Valle. **DESIGN SCIENCE RESEARCH: Método de Pesquisa para Avanço da Ciência e Tecnologia**. [s.l.: s.n.], 2013. v. 20.

HARRY MARKOWITZ. Portfolio Selection Harry Markowitz. **The Journal of Finance**, v. 7, n. 1, p. 77–91, 1952. DOI 10.1144/GSL.JGS.1861.017.01-02.11. .

IACHAN, Roberto. A Brazilian experience: 40 years using operations research at Petrobras. **International Transactions in Operational Research**, v. 16, n. 5, p. 585–593, 2009. DOI 10.1111/j.1475-3995.2009.00717.x. .

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. OIL 2018. p. 6, 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/Textbase/npsum/oil2018MRSsum.pdf>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook 2017. **INTERNATIONAL ENERGY AGENCY Together Secure Sustainable**, v. Executive, p. 13, 2017. DOI 10.1016/0301-4215(73)90024-4. Disponível em: www.iea.org/t&c/.

MACIEL, Gustavo da Silva *et al.* Avaliação de processos licitatórios de embarcações de apoio marítimo offshore com utilização de análise envoltória de dados. **Journal of Transport Literature**, v. 8, n. 4, p. 329–349, 2014. DOI 10.1590/2238-1031.jtl.v8n4a13. .

MARKOWITZ, Harry. Portfolio Selection Harry Markowitz. **The Journal of Finance**, v. 7, n. 1, p. 77–91, 1952. .

MIGUEL, Michel *et al.* Presidente Da República Diretora-Geral Ministério De Minas E Energia Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis. 2018. DOI http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/publicacoes/Anuario_Estatistico_ANP_2016.pdf. Disponível em: http://www.anp.gov.br/images/publicacoes/anuario-estatistico/2018/anuario_2018.pdf.

PANTUSO, Giovanni; FAGERHOLT, Kjetil; HVATTUM, Lars Magnus. A survey on maritime fleet size and mix problems. **European Journal of Operational Research**, v. 235, n. 2, p. 341–349, 2014. DOI 10.1016/j.ejor.2013.04.058. .

PANTUSO, Giovanni; FAGERHOLT, Kjetil; WALLACE, Stein W. Which uncertainty is important in multistage stochastic programmes? A case from maritime transportation. **IMA Journal of Management Mathematics**, v. 28, n. 1, p. 5–17, 2017. DOI 10.1093/imaman/dpu026. .

SARYKALIN, Sergey; SERRAINO, Gaia; URYASEV, Stan. Value-at-Risk vs. Conditional Value-at-Risk in Risk Management and Optimization. **State-of-the-Art Decision-Making Tools in the Information-Intensive Age**, n. July 2015, 2014. DOI <https://doi.org/10.1287/educ.1080.0052>. .

SCANBRASIL, BRAZILSHIP /. **Offshore Market – Monthly Report - Outubro/2017**. . [s.l.: s.n.], 2017. Disponível em: www.brazilship.com.br.

SIDDIQUI, Atiq W.; VERMA, Manish. A conditional value-at-risk based methodology to intermediate-term planning of crude oil tanker fleet. **Computers and Industrial Engineering**, v. 113, p. 405–418, 2017. DOI 10.1016/j.cie.2017.09.021. .

SOUZA, Marcelo Oliveira de. **COMPOSIÇÃO DE CONTRATOS DE AFRETEAMENTO PARA RENOVAÇÃO DE FROTA DE EMBARCAÇÕES DE APOIO MARÍTIMO: Um método de otimização sob incertezas**. 2019. 151 f. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, 2019.

VIEIRA, André Augusto Soares. **Dimensionamento da frota de navios de derivados claros para cabotagem : proposta de modelo de otimização**. 2014. 59 f. PUC-Rio, 2014.

APÊNDICE A - CÓDIGO CPLEX

```

int nAnalise =...;
range Analise = 1..nAnalise;
int nMeses = ...;
range Meses = 1..nMeses;
int nIniContrato = ...;
range IniContrato = 1..nIniContrato;
int nTempoMaxContrato = ...;
range TempoMaxContrato = 1..nTempoMaxContrato;
int nhistorico = ...;
range historico = 1..nhistorico;
int N_cvar = ...;
range LimiteCvar = 1..N_cvar;
float Cvar_Max = ...;
int nResumoContrato = 3;
range ResumoContrato = 1..nResumoContrato;
int nPossibilidades = 3600;
range Possibilidades = 1..nPossibilidades;

float Vigencias[Meses]= ...;
float Dias_Mes[Meses]=...;
float Demanda_Atendida[Meses];
float Demanda_Atendida_Tipo[TempoMaxContrato][Meses];
float TCP_analise[IniContrato][TempoMaxContrato] = ...;
float Spot_analise[Meses] = ...;
float Demanda_Sup[Meses] = ...;

float Demanda_Esp[Meses] = ...;

float Demanda_Inf[Meses] = ...;

int Disponibilidade[Meses] = ...;

float Custo_TCP[IniContrato][TempoMaxContrato] = ...;
float Meses_TCP[IniContrato][TempoMaxContrato] = ...;
float Dias_Analise[IniContrato][TempoMaxContrato] = ...;
float Custo_Spot[Meses] =...;
float Custo_historico[historico]= ...;
float cVar_mes[Meses];
float Custo_mes[Analise];
float Contratos_TCP_resumo [Possibilidades][ResumoContrato];

dvar int+ Contratos_TCP[TempoMaxContrato][IniContrato];
dvar int+ Contratos_Spot[Meses];

minimize

```

```

    sum (i in Analise , j in
TempoMaxContrato)Custo_TCP[i][j]*Contratos_TCP[i][j]*Dias_Analise[i]
[j] +
    sum (i in Analise) Custo_Spot[i]*Contratos_Spot[i]*Dias_Mes[i];

subject to{

AtendimentoVigenciasTCP:
    forall (j in IniContrato)
        forall (k in TempoMaxContrato)
            if(TCP_analise[j][k]==0)
                Contratos_TCP[j][k]==0;

AtendimentoVigenciasSPOT:
    forall (i in Analise)
        if(Spot_analise[i]==0)
            Contratos_Spot[i]==0;

AtendimentoDemandaESP:
forall (i in Analise)
    if(Demanda_Esp[i] <= Disponibilidade[i])
        sum (j in IniContrato: j <= i)
        sum (k in TempoMaxContrato: (k+j > i))
        (Contratos_TCP[j][k]*TCP_analise[j][k]) +
Contratos_Spot[i]*Spot_analise[i] >= Demanda_Esp[i];
    else
        sum (j in IniContrato: j <= i)
        sum (k in TempoMaxContrato: (k+j > i))
        (Contratos_TCP[j][k]*TCP_analise[j][k]) +
Contratos_Spot[i]*Spot_analise[i] == Disponibilidade[i];

AtendimentoDemandaSUP:
forall (i in Analise)
    sum (j in IniContrato: j <= i)
    sum (k in TempoMaxContrato: (k+j > i))
    (Contratos_TCP[j][k]*TCP_analise[j][k]) +
Contratos_Spot[i]*Spot_analise[i] <= Demanda_Sup[i];

AtendimentoDisponibilidade:
forall (i in Analise)
    sum (j in IniContrato: j <= i)
    sum (k in TempoMaxContrato: (k+j > i))
    (Contratos_TCP[j][k]*TCP_analise[j][k]) +
Contratos_Spot[i]*Spot_analise[i] <= Disponibilidade[i];

RiscoSpot:
    forall(i in Analise)
        ((1/N_cvar)* sum (j in LimiteCvar)

```

```

        ((Custo_historico[j] -
Custo_Spot[i])*Contratos_Spot[i]*Dias_Mes[i])) <= Cvar_Max;
    }

//Pós processamento para escrever o vetor das demandas atendidas
execute
{
for (var i = 1; i <= nMeses ; i++)
    {
        for (var j = 1 ; j <= nIniContrato; j++)
            {
                if (j<=i)
                    {
                        for (var k = 1 ; k <= nTempoMaxContrato ; k ++ )
                            {
                                if(k+j > i)
                                    {
                                        Demanda_Atendida [i] =
Contratos_TCP[j][k] + Demanda_Atendida [i];
                                    }
                                }
                            }
                    }
            }
        Demanda_Atendida [i] = Contratos_Spot[i] + Demanda_Atendida
[i];
    }
}

//Cálculo do CVar
execute
{
for (var k = 1 ; k <= nMeses; k++)
    {
        for (var i = 1; i <= N_cvar ; i++)
            {
                cVar_mes[k] = ((Custo_historico[i] -
Custo_Spot[k])*Contratos_Spot[k]*Dias_Mes[k]) + cVar_mes[k];
            }

        cVar_mes[k] = (1/N_cvar)*cVar_mes[k]
    }
}

//Cálculo do Custo
execute
{
for (var i = 1; i <= nAnalise ; i++)
    {

```

```

for (var j = 1 ; j <= nIniContrato; j++)
{
    if (j<=i)
    {
        for (var k = 1; k <= nTempoMaxContrato ; k++)
        {
            if(k+j > i)
            {
                Custos_mes[i] =
Custo_TCP[j][k]*Contratos_TCP[j][k]*Dias_Mes[i] + Custos_mes[i];
            }
        }
    }
    Custos_mes[i] = Custos_mes [i] +
Custo_Spot[i]*Contratos_Spot[i]*Dias_Mes[i];
}
}

```

//Cria matriz de resumo para contratos

execute

```
{
```

```
var k=1;
```

```
for (var i = 1; i <= nAnalise ; i++)
```

```
{
```

```
for (var j = 1 ; j <= nIniContrato; j++)
```

```
{
```

```
if (Contratos_TCP[i][j]>0)
```

```
{
```

```
Contratos_TCP_resumo[k][1]=i;
```

```
Contratos_TCP_resumo[k][2]=j;
```

```
Contratos_TCP_resumo[k][3]=
```

```
Contratos_TCP[i][j];
```

```
k++;
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

//Cria matriz de resumo para gráfico

execute

```
{
```

```
for (var i = 1; i <= nMeses ; i++)
```

```
{
```

```
for (var j = 1 ; j <= nIniContrato; j++)
{
    if (j<=i)
    {
        for (var k = 1 ; k <= nTempoMaxContrato ; k ++ )
        {
            if(k+j > i)
            {
                Demanda_Atendida_Tipo [k][i] =
Contratos_TCP[j][k] + Demanda_Atendida_Tipo [k][i];
            }
        }
    }
}
```