

Universidade Federal do Rio de Janeiro

SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS APLICADA À ANÁLISE LOGÍSTICA DE
TERMINAIS MARÍTIMOS DE PETRÓLEO

Luiz Filipe Ferreira de Santana

2019

SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS APLICADA À ANÁLISE LOGÍSTICA DE
TERMINAIS MARÍTIMOS DE PETRÓLEO

Luiz Filipe Ferreira de Santana

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Jean-David Job Emmanuel Marie
Caprace

Rio de Janeiro
Setembro de 2019

SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS APLICADA À ANÁLISE LOGÍSTICA DE
TERMINAIS MARÍTIMOS DE PETRÓLEO

Luiz Filipe Ferreira de Santana

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Jean-David Job Emmanuel Marie Caprace, DSc

Prof. Floriano Carlos Martins Pires Júnior, DSc

Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho, DSc

Prof. Lino Guimarães Marujo, DSc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2019

Santana, Luiz Filipe Ferreira de

Simulação de Eventos Discretos Aplicada à Análise Logística de Terminais Marítimos de Petróleo/ Luiz Filipe Ferreira de Santana. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XV, 70 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Jean-David Job Emmanuel Marie Caprace.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 68-70.

1. Análise logística. 2. Simulação de eventos discretos. 3. Terminais marítimos de petróleo. 4. Cadeia de suprimentos. I. Caprace, Jean David Job Emmanuel Marie. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus, que me abençoa a cada nova manhã, a minha esposa Ana e a minha família a quem amo profundamente.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus por ser fonte inesgotável de amor, sabedoria e esperança. Sem a Sua presença, chegar até aqui não seria possível.

À minha paciente e companheira esposa Aninha, que me ajudou a seguir em frente nos momentos em que pensei em desistir. Seu amor me ajuda a acreditar em mim mesmo e a superar as minhas limitações.

À minha mãe Denise, que me passou os valores fundamentais de perseverança e fé, sem os quais não chegaria a concluir este trabalho.

Aos meus irmãos Marco Antonio, Lucas e Isabele, com quem compartilho muitas alegrias.

Ao meu orientador Prof. Jean-David, pela sua paciência e apoio ao longo da jornada de desenvolvimento do tema deste trabalho.

Por fim, agradeço aos profissionais especialistas da empresa operadora do sistema estudado, que dedicaram seu tempo ajudando-me na consolidação das informações necessárias para desenvolvimento do estudo de caso descrito no presente documento e na validação do modelo elaborado.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS APLICADA À ANÁLISE LOGÍSTICA DE TERMINAIS MARÍTIMOS DE PETRÓLEO

Luiz Filipe Ferreira de Santana

Setembro/2019

Orientador: Jean-David Job Emmanuel Marie Caprace

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo de simulação de eventos discretos para análise logística de um sistema composto por um terminal marítimo de petróleo, uma refinaria e seus clientes. O modelo desenvolvido foi posteriormente aplicado para estudo de um sistema existente, de modo a demonstrar suas capacidades de diagnóstico e prognóstico. Cada etapa da modelagem realizada, a estrutura algorítmica do modelo elaborado, sua programação em um ambiente de simulação, os principais indicadores de desempenho para análise desses sistemas e os resultados do estudo de caso realizado são apresentados e discutidos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DISCRETE EVENT SIMULATION APPLIED TO LOGISTICS ANALYSIS OF MARINE
OIL TERMINALS

Luiz Filipe Ferreira de Santana

September/2019

Advisor: Jean-David Job Emmanuel Marie Caprace

Department: Ocean Engineering

This paper presents the development of a discrete event simulation model for logistic analysis of a system consisting of a maritime oil terminal, a refinery and its customers. The developed model was applied to study an existing system to demonstrate its diagnostic and prognostic capabilities. Each modeling step performed, the algorithmic structure of the elaborated model, its programming in a simulation environment, the main key performance indicators (KPIs) for the analysis of the system and the results of the case study are presented and discussed.

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 3 | METODOLOGIA..... | 9 |
| 3.1 | Formulação do problema | 11 |
| 3.2 | Definição dos objetivos e do plano geral do projeto | 11 |
| 3.3 | Formulação, representação e programação do modelo e coleta de dados | 12 |
| 3.3.1 | Fluxograma do modelo comunicativo e programação no Arena®..... | 16 |
| 3.3.1.1 | Criação, atribuição de características e chegada de navios | 17 |
| 3.3.1.2 | Verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço | 22 |
| 3.3.1.3 | Atendimento de navios nos berços | 28 |
| 3.3.1.4 | Verificação das restrições e busca de recursos para deslocamento do navio do berço à saída | 30 |
| 3.3.1.5 | Registro de estatísticas e saída de navios | 32 |
| 3.3.1.6 | Submodelos auxiliares | 32 |
| 3.3.1.6.1 | Submodelo para definição dia ou noite e intensidade do vento | 33 |
| 3.3.1.6.2 | Submodelo para consumo, produção e transferência de produtos dentro e entre os tanques de terra | 35 |
| 3.3.1.6.3 | Submodelo para monitoramento do nível de estoque de produtos..... | 36 |
| 3.3.1.6.4 | Submodelo para registro do estoque de produtos nos tanques e do número de navios no terminal | 36 |
| 3.3.1.6.5 | Submodelo para escrita da planilha de output..... | 37 |
| 3.4 | Verificação e validação..... | 37 |
| 3.5 | Projeto dos experimentos..... | 39 |
| 3.6 | Execução e análise | 40 |
| 3.7 | Avaliação da necessidade de rodadas adicionais..... | 42 |
| 3.8 | Apresentação dos resultados..... | 42 |
| 3.9 | Implementação das soluções..... | 42 |
| 4 | ESTUDO DE CASO | 43 |
| 4.1 | Coleta e tratamento de dados | 44 |
| 4.2 | Validação do modelo | 49 |
| 4.3 | Cenários analisados e resultados | 51 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.3.1 | Número de operações e volume movimentado total..... | 53 |
| 4.3.2 | Fator de utilização dos recursos..... | 55 |
| 4.3.3 | Nível de serviço logístico | 56 |
| 4.3.4 | Tempo e custo anual de excesso de estadia | 58 |
| 4.3.5 | Custo anual de atracação | 60 |
| 4.3.6 | Custo anual de perda de margem de refino | 60 |
| 4.3.7 | Custo anual mudança de polo de suprimento | 61 |
| 4.3.8 | Custo anual de capital imobilizado em estoque..... | 62 |
| 4.3.9 | Custo logístico total | 63 |
| 5 | CONCLUSÕES | 66 |
| | REFERÊNCIAS | 68 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Segmentos da cadeia de suprimentos da indústria do petróleo..... | 1 |
| Figura 2 - Arranjo básico de um terminal..... | 2 |
| Figura 3 - Sistema logístico e fluxo de produtos entre os componentes | 3 |
| Figura 4 - Navios realizando operação de Ship to Ship atracado (MARINHA DO BRASIL, 2017)..... | 3 |
| Figura 5 - Fluxograma de método para execução do estudo de simulação. Adaptado de Banks et al (2010)..... | 10 |
| Figura 6 - Fluxo macro principal do modelo de simulação..... | 17 |
| Figura 7 - Fluxograma criação, atribuição de características e chegada de navios (parte 1) ... | 18 |
| Figura 8 - Fluxograma criação, atribuição de características e chegada de navios (parte 2) ... | 19 |
| Figura 9 - Fluxograma criação, atribuição de características e chegada de navios (parte 3) ... | 20 |
| Figura 10 - Fluxograma criação, atribuição de características e chegada de navios (parte 4) . | 22 |
| Figura 11 - Fluxograma verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço (parte 1)..... | 23 |
| Figura 12 - Fluxograma verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço (parte 2)..... | 24 |
| Figura 13 - Fluxograma verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço (parte 3)..... | 25 |
| Figura 14 - Fluxograma verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço (parte 4)..... | 26 |
| Figura 15 - Fluxograma verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço (parte 5)..... | 27 |
| Figura 16 - Fluxograma atendimento de navios nos berços (parte 1) | 28 |
| Figura 17 - Fluxograma atendimento de navios nos berços (parte 2) | 29 |
| Figura 18 - Fluxograma atendimento de navios nos berços (parte 3) | 30 |
| Figura 19 - Fluxograma verificação das restrições e busca de recursos para deslocamento do navio do berço à saída | 31 |
| Figura 20 - Fluxograma registro de estatísticas e saída de navios..... | 32 |
| Figura 21 - Submodelos auxiliares | 33 |
| Figura 22 - Fluxograma definição dia ou noite e intensidade do vento | 33 |

| | |
|--|----|
| Figura 23 - Fluxograma consumo, produção e transferência de produtos dentro e entre os tanques de terra..... | 35 |
| Figura 24 - Fluxograma registro do estoque de produtos nos tanques e do número de navios no terminal..... | 37 |
| Figura 25 - Fluxograma escreve planilha de output | 37 |
| Figura 26 - Análise de convergência do Custo Logístico por volume movimentado (CL)..... | 40 |
| Figura 27 - Fluxo de produtos entre os componentes do sistema modelado..... | 43 |
| Figura 28 - Sequência de levantamento de distribuições percentuais para o berço 7 | 46 |
| Figura 29 - Gráfico de caixa dos tempos de atracação no berço 7 normalizados para operações STS (oposto NV) e com os tanques em terra (oposto TQ). Os <i>outliers</i> filtrados se encontram marcados..... | 48 |
| Figura 30 - Distribuições estatísticas ajustadas aos dados de tempos das atividades dos navios no porto. As distribuições dos berços com mais dados disponíveis tiveram melhor aderência..... | 48 |
| Figura 31 - Comparação entre o registro e resultado da simulação relativo ao Número de Operações no Berço 7 normalizado..... | 50 |
| Figura 32 - Comparação entre o registro e o resultado da simulação relativo ao Volume Movimentado no Berço 7 normalizado | 51 |
| Figura 33 - Variação relativa ao cenário base do Número de Operações Total | 54 |
| Figura 34 - Variação relativa ao cenário base do Volume Movimentado Total de diesel e petróleo | 55 |
| Figura 35 - Variação relativa ao cenário base do FUT das lanchas de apoio à amarração, práticos e amarradores..... | 55 |
| Figura 36 - Variação relativa ao cenário base do FUT dos rebocadores..... | 56 |
| Figura 37 - Variação relativa ao cenário base do FUT do berço 7 | 56 |
| Figura 38 - Variação relativa ao cenário base do Nível de Serviço de entrega de Petróleo à refinaria..... | 57 |
| Figura 39 - Variação relativa ao cenário base do Nível de Serviço de retirada de Diesel da refinaria..... | 57 |
| Figura 40 - Variação relativa ao cenário base do Nível de Serviço de entrega de Diesel ao mercado | 58 |
| Figura 41 - Variação relativa ao cenário base do Custo Exc. de Estadia/Vol. Mov..... | 59 |
| Figura 42 - Variação relativa ao cenário base do Custo de Atracação/Vol. Mov. | 60 |
| Figura 43 - Variação relativa ao cenário base do Custo Mud. de Polo de Suprimento/Vol. Mov. | 61 |

| | |
|--|----|
| Figura 44 - Variação relativa ao cenário base do Custo de Estoque/Vol. Mov..... | 62 |
| Figura 45 - Variação relativa ao cenário base do Custo Total (sem custo de estoque)/Vol. Mov. | 64 |
| Figura 46 - Distribuição de custos/volume movimentado de diesel e petróleo por cenário (sem custo de estoque) | 65 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Parâmetros de simulação adotados na etapa de projeto dos experimentos | 40 |
| Tabela 2 - Limites máximos de dimensões de navios | 45 |
| Tabela 3 - Diferença relativa entre indicadores do modelo e do sistema real | 50 |
| Tabela 4 - Matriz de cenários de simulação analisados..... | 52 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EVTE: estudo de viabilidade técnica e econômica;

EXT: navio na posição externa ao berço nas operações STS;

GLP: gás liquefeito de petróleo;

INT: navio na posição interna ao berço nas operações STS;

LOA: *Length of all*. Comprimento total do navio;

NOR: *Notice of Rediness*. Documento emitido pelo navio para indicar ao terminal que chegou e se encontra pronto para operar. O momento da emissão do NOR marca o início da contagem da estadia do navio no terminal;

OC: Óleo combustível;

PLIM: Programação linear inteira mista;

PXL: Paraxileno;

QAV: Querosene de aviação;

STS: *Ship to ship*;

TPB: Tonelada de porte bruto.

LISTA DE SÍMBOLOS

C_{ATRAC} : Custo anual de atracação por volume movimentado;

C_{EST} : Custo anual por volume movimentado de capital imobilizado em estoque de produtos nos tanques do terminal e da refinaria;

C_{EXC} : Custo anual por volume movimentado de excesso de estadia;

C_{MREF} : Custo anual de perda de margem de refino por volume movimentado;

CL : Custo logístico total anual por volume movimentado;

C_{MSUP} : Custo anual de mudança de polo de suprimento por volume movimentado, oriundo de um desatendimento ao mercado;

FUT : Fator de Utilização dos recursos;

N_{OP} : Número de operações total no terminal por ano;

NS : Nível de serviço logístico;

NV : Operações de navio com navio, ou seja, *ship to ship*;

$TEXC_{NT}$: Tempo de excesso de estadia do navio no terminal;

TQ : Operações de navio com tanques de terra.

TT_{NT} : Tempo total médio que um navio de determinada classe passa no porto, desde a emissão do sua NOR até a sua partida;

V_T : Volume movimentado total no terminal por ano dos produtos sob foco (diesel e petróleo).

1 INTRODUÇÃO

A cadeia de suprimentos é um “processo dinâmico que implica um fluxo contínuo de informações, materiais e recursos em várias áreas funcionais, dentro de cada e entre os seus membros, a fim de atender aos requisitos do cliente e maximizar os lucros do negócio” (SAAD; UDIN; HASNAN, 2014, p. 70). Na indústria de óleo e gás, dita cadeia costuma ser dividida em 3 segmentos principais: *upstream*, *midstream* e *downstream* (Figura 1).

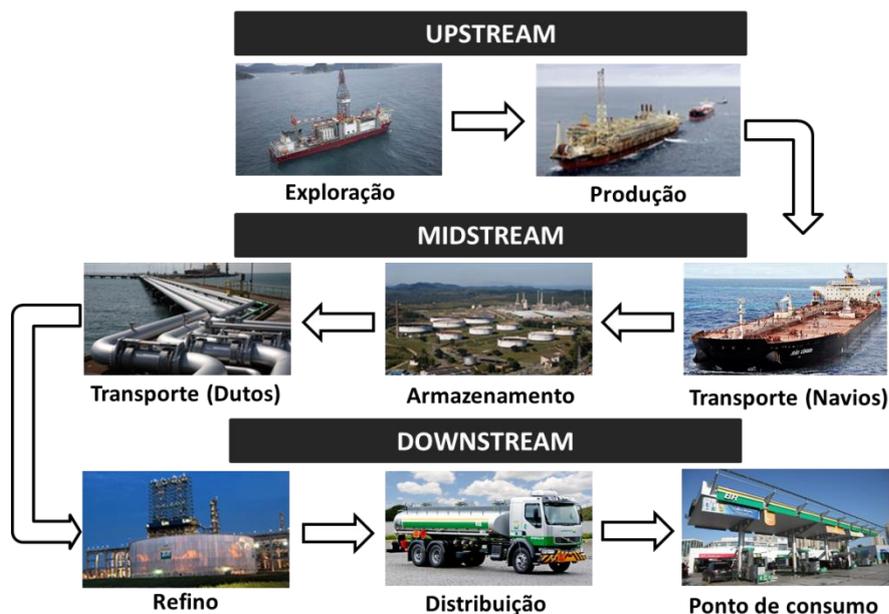


Figura 1 - Segmentos da cadeia de suprimentos da indústria do petróleo

O seguimento *upstream* contempla as atividades relacionadas com a prospecção e produção de petróleo e gás natural, podendo ser realizadas em campos terrestres ou fora da costa.

Por sua vez, o *midstream* engloba o transporte e armazenamento do petróleo/gás produzido a partir do ponto produtor, passando pelos terminais até as refinarias. O transporte nesse trecho da cadeia logística é majoritariamente realizado por navios e dutos, podendo também ser realizado por caminhões e trens.

O seguimento *downstream* contempla a etapa de refino do petróleo e distribuição para os pontos de consumo, que podem tanto ser postos de abastecimento de combustível, bem como indústrias petroquímicas, por exemplo.

O interesse do presente trabalho é dar foco no segmento *midstream*, mais especificamente, nas operações que ocorrem em um dos seus componentes principais: os terminais marítimos de petróleo.

Basicamente, terminais marítimos são instalações portuárias em que navios tanque carregam e descarregam petróleo, gás e derivados, os quais são armazenados e posteriormente

transferidos para os pontos de demanda, que podem ser refinarias, indústrias petroquímicas ou centros de distribuição intermediários de produtos.

Em geral, esses elementos do segmento *midstream* são compostos de um acesso náutico, por meio do qual chegam os navios para atendimento; zonas de fundeio, em que os navios aguardam sua vez de operar; píeres, onde as referidas embarcações realizam as operações de carga e descarga; dutos internos, que servem para transferir os produtos bombeados a partir dos navios para os tanques ou diretamente para os dutos de exportação, os quais, por sua vez, servem de meio pelo o qual os produtos são enviados ou recebidos dos pontos de demanda.

Conforme mostrado na Figura 2, cada terminal pode ser composto de vários berços de atracação e atendimento de navios, inúmeros dutos que interligam os píeres ao manifold de manobras de válvulas, no qual são realizados os alinhamentos para os dutos dos tanques ou para os dutos de exportação. Além disso, a capacidade de armazenamento de produtos por volume e tipos varia de acordo com o número de tanques disponíveis no terminal.

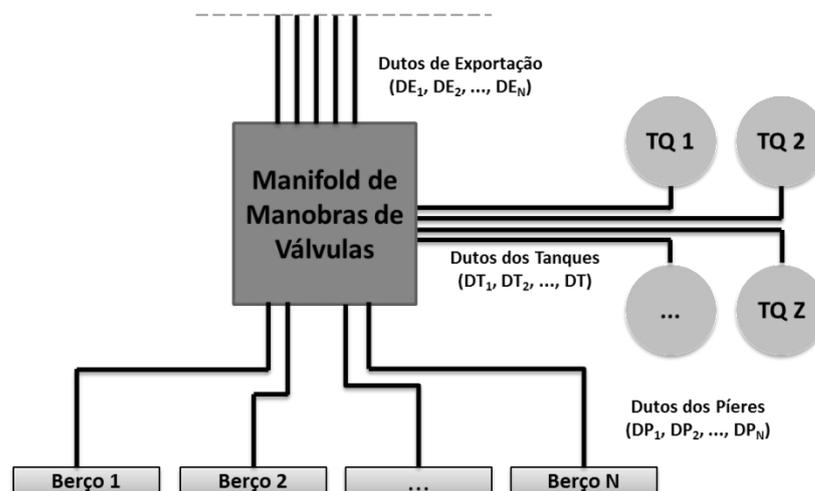


Figura 2 - Arranjo básico de um terminal

Do ponto de vista do sistema logístico, o terminal marítimo usualmente se conecta por meio de dutos com o parque de tanques de uma refinaria e de companhias distribuidoras, com as quais estabelece um fluxo de entrega e retirada de petróleo e derivados.

Além disso, a refinaria e as companhias distribuidoras podem receber e enviar produtos diretamente dos ou para os navios tanque atracados aos berços, sem fazer uso dos tanques existentes no terminal. Por fim, o abastecimento das distribuidoras também pode ser feito diretamente pela refinaria. A Figura 3 ilustra uma configuração típica do sistema descrito e os fluxos usuais de produtos entre os seus componentes.

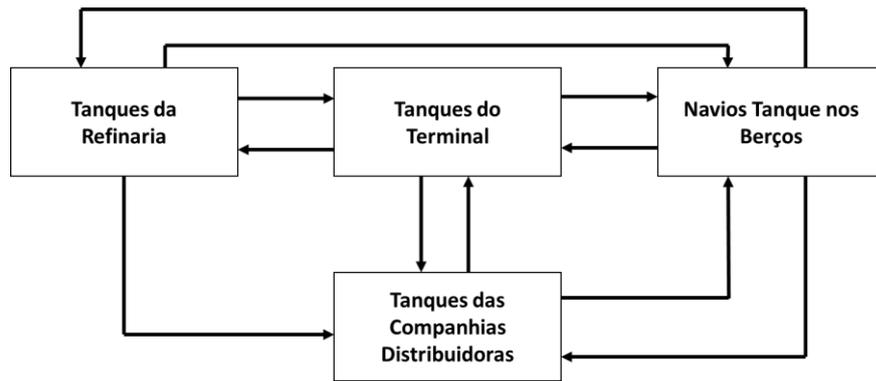


Figura 3 - Sistema logístico e fluxo de produtos entre os componentes

Existe ainda a modalidade de transferência de carga entre um navio atracado a um berço e outro atracado a seu contrabordo, conhecida como Ship to Ship (STS) (vide Figura 4). Como opção logística, as operações STS viabilizam o atendimento de dois navios de maneira simultânea em mesmo berço, dispensando também o uso das linhas de dutos e dos tanques do terminal.

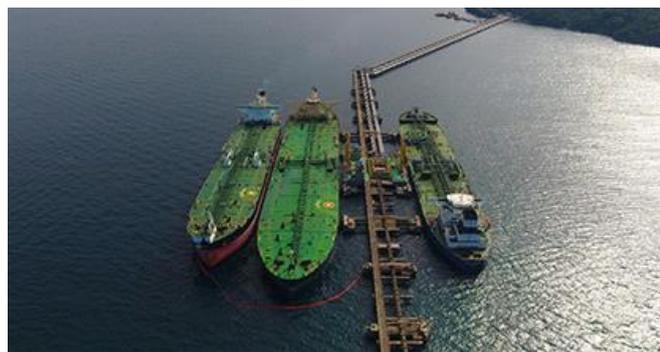


Figura 4 - Navios realizando operação de Ship to Ship atracado (MARINHA DO BRASIL, 2017)

A capacidade de movimentação do terminal está associada à janela operacional disponível para realização das manobras de aproximação, atracação e desatracação, que é função das restrições de horário, dimensões e porte bruto máximo de embarcações que podem ser atendidas em cada berço; da disponibilidade dos recursos de amarração, de dutos e tanques para bombeio e armazenamento dos produtos a serem carregados ou descarregados; dos tempos em que cada etapa das operações é realizada; das vazões de operação, dentre outros fatores.

As restrições para operações de navios no porto são relacionadas com as dimensões físicas do canal de acesso, da bacia de evolução e das profundidades nos berços, sendo, em geral, estabelecidas pela autoridade marítima e/ou portuária local.

Por sua vez, as restrições de vazão nos berços do terminal, em relação a capacidade de bombeio dos navios, têm por base, muitas vezes, o resultado de análises de cenários de risco de surtos pressão, cujas consequências indesejáveis podem ser mitigadas, na ausência sistemas de alívio de pressão, pela implementação de restrições de vazão operacional máxima admissível.

Cada uma das referidas restrições impacta de maneira diferente a capacidade de atendimentos de navios do terminal, sendo que a gestão das mesmas muitas vezes passa por um processo de estudo de viabilidade técnica e econômica (EVTE). Um dos aspectos que deve ser considerado na decisão de investimento na gestão das restrições descritas é o seu impacto sob a capacidade de geração de receita ou redução de custo do terminal, a qual está associada à quantidade de produto movimentada por período de tempo.

A simulação de eventos discretos é uma ferramenta que viabiliza a realização dessa avaliação, pois, por meio da elaboração de um modelo representativo dos processos logísticos da operação do terminal, o cenário com as restrições atuais pode ser comparado a um cenário de operação com uma ou mais restrições relaxadas, de modo que se torna possível avaliar o impacto de cada restrição na capacidade de movimentação do terminal. Além disso, é possível avaliar quais restrições têm maior ou menor impacto, de modo a identificar os gargalos logísticos presentes.

Assim, faz-se necessário entender as relações entre cada elemento da operação de terminais marítimos de petróleo, de modo a viabilizar uma modelagem adequada desses sistemas. Descrever ditas relações e especificar uma forma incorporá-las a um modelo de simulação de eventos discretos, além de demonstrar um conjunto de análises que podem ser realizadas de posse de tal modelo, é o objeto de estudo pretendido.

Portanto, o objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo de simulação de eventos discretos para análise logística de sistemas compostos por um terminal marítimo de petróleo, uma refinaria e seus clientes e aplicá-lo para o estudo de um sistema existente para demonstração das suas capacidades de diagnóstico e prognóstico.

O presente documento está estruturado da seguinte maneira: o capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica das publicações relacionadas à análise logística de elementos da cadeia de suprimentos na indústria do petróleo para identificação da lacuna que o atual trabalho visa completar; no capítulo 3, é apresentado o método utilizado para modelagem numérica de um sistema composto por um terminal marítimo, uma refinaria e um conjunto de empresas distribuidoras; no capítulo 4 é apresentado um estudo de caso real utilizado para validar e explorar as funcionalidades do modelo de simulação elaborado; por fim, no capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas últimas décadas, muitos estudos foram dedicados à análise logística da cadeia de suprimentos na indústria do petróleo, sendo parte dedicada à simulação e parte à otimização dos segmentos *upstream*, *midstream* e *downstream* em conjunto ou separadamente.

A essência da simulação consiste na elaboração de um modelo matemático que traduz, de maneira representativa, as etapas sob análise de um processo como um todo. A partir desse modelo, os profissionais responsáveis estão aptos a simular situações e avaliar os resultados gerados. Esta abordagem foca na modelagem do comportamento temporal do sistema, sendo sua aplicação recomendada quando há algum grau de aleatoriedade associado a componentes modelados.

Por sua vez, a otimização foca em capturar todas as dependências e restrições presentes, sendo sua aplicação mais adequada quando o comportamento do sistema modelado é bem conhecido e pode ser descrito analiticamente por meio da utilização de funções simples, tipicamente lineares.

Em geral, modelos de simulação são descritivos, pois permitem apenas o diagnóstico de um determinado processo e a avaliação do impacto de possíveis alterações. Conforme descrito por Bierlaire (2015), tais modelos “visam levantar indicadores de desempenho do sistema em uma dada configuração” (tradução nossa). Por sua vez, modelos de otimização são prescritivos, pois recomendam alternativas dentro do processo sob análise, podendo inclusive identificar o resultado ótimo global dentro de um objetivo desejado.

Dentro do contexto da otimização, Sear (1993) foi um dos pioneiros a tratar do conceito de gestão da cadeia de suprimentos no contexto de uma empresa de petróleo, desenvolvendo modelo de programação linear para otimização e planejamento da logística *downstream*. Por sua vez, Escudero et al (1999) propôs um modelo de programação linear semelhante, porém capaz de lidar com as incertezas nos custos de suprimentos, nas demandas e nos preços dos produtos.

Neiro e Pinto (2004) desenvolveram um modelo integrado de otimização da cadeia de suprimentos, considerando o armazenamento em terminais, o transporte por dutos até as refinarias, a produção das refinarias, o transporte até depósitos de produto refinado e a distribuição.

Aires et al (2004) desenvolveu modelo de programação linear inteira mista para planejamento mensal da alocação de petróleo considerando os volumes dos diferentes tipos a serem escoados das plataformas e a respectiva alocação nas refinarias. Dando continuidade ao trabalho, Rocha et al (2009) elaborou modelo de programação linear inteira para determinação

do cronograma de alívio de cada plataforma para suprir cada refinaria do sistema com o correto tipo e quantidade de óleo indicado no planejamento estratégico, a custo mínimo.

Com foco no segmento *upstream*, Iyer et al (1998) desenvolveu um algoritmo de programação linear inteira mista (PLIM) para otimização do planejamento de alocação de investimentos em estrutura para operações offshore. Por sua vez, Van den Heever e Grossmann (2000) desenvolveram um modelo representativo da estrutura dos campos de produção para apoio em decisões relacionadas a projeto e planejamento. Van de Heever et al (2000) também abordou o problema de projeto e planejamento de infraestrutura offshore focado em regras de negócios. Ierapetritou et al (1999) estudou a localização ótima de poços em um mapa de reservatório, problema que também foi abordado por Kosmidis et al (2002) que descreveu uma formulação PLIM para alocação dos poços e operação integrada dos sistemas de produção.

Especificamente para o nível *downstream* da cadeia, Lee et al (1996) focou no problema de programação de suprimento de petróleo para uma refinaria. Pinto et al (2000) focou nas operações de refino, abordando a programação da produção de diferentes áreas dentro de uma refinaria, como as plantas de petróleo cru, óleo combustível, asfalto e GLP. Neiro e Pinto (2003) abordaram o problema de planejamento da produção de um complexo de refinarias interligadas por dutos por meio de modelo de programação não-linear inteira mista. Ross (2000) focou na distribuição dos produtos refinados, otimizando a alocação de recursos como centros de distribuição e veículos de modo a maximizar o lucro.

No *midstream*, Batra (1980) analisou por meio de simulação de eventos discretos o número ótimo de tanques de um terminal para atendimento da demanda de uma refinaria. Por sua vez, Cheng e Duran (2004) elaboraram modelo de simulação de eventos discretos associado a um modelo estocástico de controle para análise do transporte marítimo de petróleo para diferentes pontos ao redor do globo dentro do contexto de uma companhia de petróleo com atuação mundial. As decisões envolvidas no sistema modelado são relacionadas ao dimensionamento e composição da frota de navios, bem como às questões operacionais de despacho e roteamento de navios.

Magatão et al (2002) propôs um modelo PLIM para otimização da programação do escoamento de diferentes produtos por um sistema de dutos. No nível de armazenamento, Stebel et al (2002) apresentou modelo de simulação que integra as partes contínuas e discretas do processo, associado a um segundo modelo PLIM para otimização da programação de transferência e armazenamento de GLP em um sistema de refinaria.

As operações de alívio intermediário consistem no processo de transferência de parte da carga do navio para barcas menores antes da atracação no berço do porto, com o objetivo de

redução do calado da embarcação maior. Esse tipo de operação é normalmente realizado em portos e canais com restrição de profundidade. Lin et al (2003) elaborou modelo PLIM para resolver o problema de programação das barcaças que realizam esse alívio intermediário de navios petroleiros em um terminal marítimo de petróleo.

Carotenuto et al (2014) avaliou por meio de modelo de simulação de eventos discretos, aplicado a um terminal marítimo interligado a uma refinaria, a variação do estoque de petróleo no sistema para diferentes taxas de chegadas de navios. O objetivo do trabalho foi avaliar o impacto econômico dos diferentes cenários.

Troyanovskyi et al (2015) também analisou o problema de dimensionamento e controle de estoque de um terminal marítimo. No referido artigo, foi analisado um terminal que recebe petróleo por meio de navios, armazena em seus tanques e exporta o produto por meio de caminhões para os pontos de consumo. O objetivo do trabalho foi levantar relações analíticas entre o nível de estoque mínimo necessário e a taxas de chegadas esperadas de navios e caminhões.

Ainda no *midstream*, Zhang et al (2017) desenvolveu modelo PLIM para otimização da programação de bombeio de produtos por um sistema de tanques e dutos a custo operacional mínimo. As atividades consideradas no modelo incluem o recebimento, a entrega de produto e a mesclagem de diferentes produtos, sendo contabilizados os custos de contaminação devido a sequência de passagem nos dutos e interface entre diferentes produtos. O referido modelo foi aplicado a um sistema de oleodutos na China para demonstração da sua funcionalidade e qualidade dos seus resultados.

Liao et al (2018) abordou problema semelhante, trazendo o foco para os custos de bombeio dos produtos oriundos de uma única fonte por meio de um poliduto, ou seja, de um duto designado para transportar diferentes produtos. Para isso, foi desenvolvido um modelo de otimização PLIM cujo objetivo é minimizar o somatório do custo de bombeio a uma determinada pressão com o custo associado à atividade de parada e reinício desse bombeio, atendendo as restrições de demanda e pressões mínimas e máximas ao longo do duto.

Quinteros et al (2019) desenvolveu um modelo PLIM para a otimização da programação da injeção de seis diferentes produtos em um poliduto. No estudo realizado, o objetivo foi determinar a ordem e as quantidades de cada produto que deveriam ser bombeados de modo a atender as demandas dos clientes, minimizando o custo relacionado ao reprocessamento de produtos por contaminação na interface entre lotes e às multas relativas a falhas de entregas.

De maneira semelhante, Chen et al (2019) abordou, por meio de otimização, o problema da programação de bombeio de diferentes produtos em uma rede de dutos. No trabalho

realizado, foi elaborado um algoritmo PLIM cujo objetivo foi determinar ordem de bombeio e quantidade a ser bombeada de um conjunto de derivados de petróleo por um conjunto de dutos, de modo a satisfazer as demandas dos pontos clientes no menor tempo possível.

Conforme já descrito anteriormente, o foco do presente trabalho é o seguimento *midstream* da cadeia logística de petróleo, especificamente no que diz respeito às operações em terminais marítimos de petróleo. Os artigos levantados abordaram separadamente alguns dos componentes relacionados a esses sistemas como tancagem e estoque, movimentação de produtos em dutos e o processo de atendimento de navios.

Foram poucos os artigos identificados que abordaram à aplicação de simulação de eventos discretos a esse elo da cadeia. Além disso, não foram identificados trabalhos cujo foco fosse a apresentação de um método de modelagem para simulação desses sistemas, com a finalidade de realizar um diagnóstico logístico do terminal, em relação aos aspectos das operações náuticas, trabalhos nos berços, escoamento de produtos, tancagem e despacho, de modo que pretende-se preencher dita lacuna com o presente trabalho.

3 METODOLOGIA

De acordo com Banks (1998), "o desenvolvimento de um modelo de simulação validado envolve três componentes básicos: o sistema real em consideração, o modelo teórico do sistema e uma representação computacional do modelo, o programa de simulação" (tradução nossa).

O modelo é a representação dos componentes e respectivas interações de um sistema físico sob estudo. Por sua vez, o modelo de simulação de eventos discretos pode ser definido como "aquele em que as variáveis de estado mudam apenas nos pontos discretos no tempo em que os eventos ocorrem" (BANKS, 1998, p. 8, tradução nossa).

Um estudo de simulação "envolve a geração de uma história artificial do sistema e a observação dessa história artificial para extrair inferências sobre as características operacionais do sistema real representado" (BANKS, 1998, p. 3, tradução nossa).

No presente trabalho, foi adotado o método proposto por Banks et al (2010) (Figura 5) para desenvolvimento de estudos de simulação, o qual consiste de doze etapas, as quais são descritas a seguir.

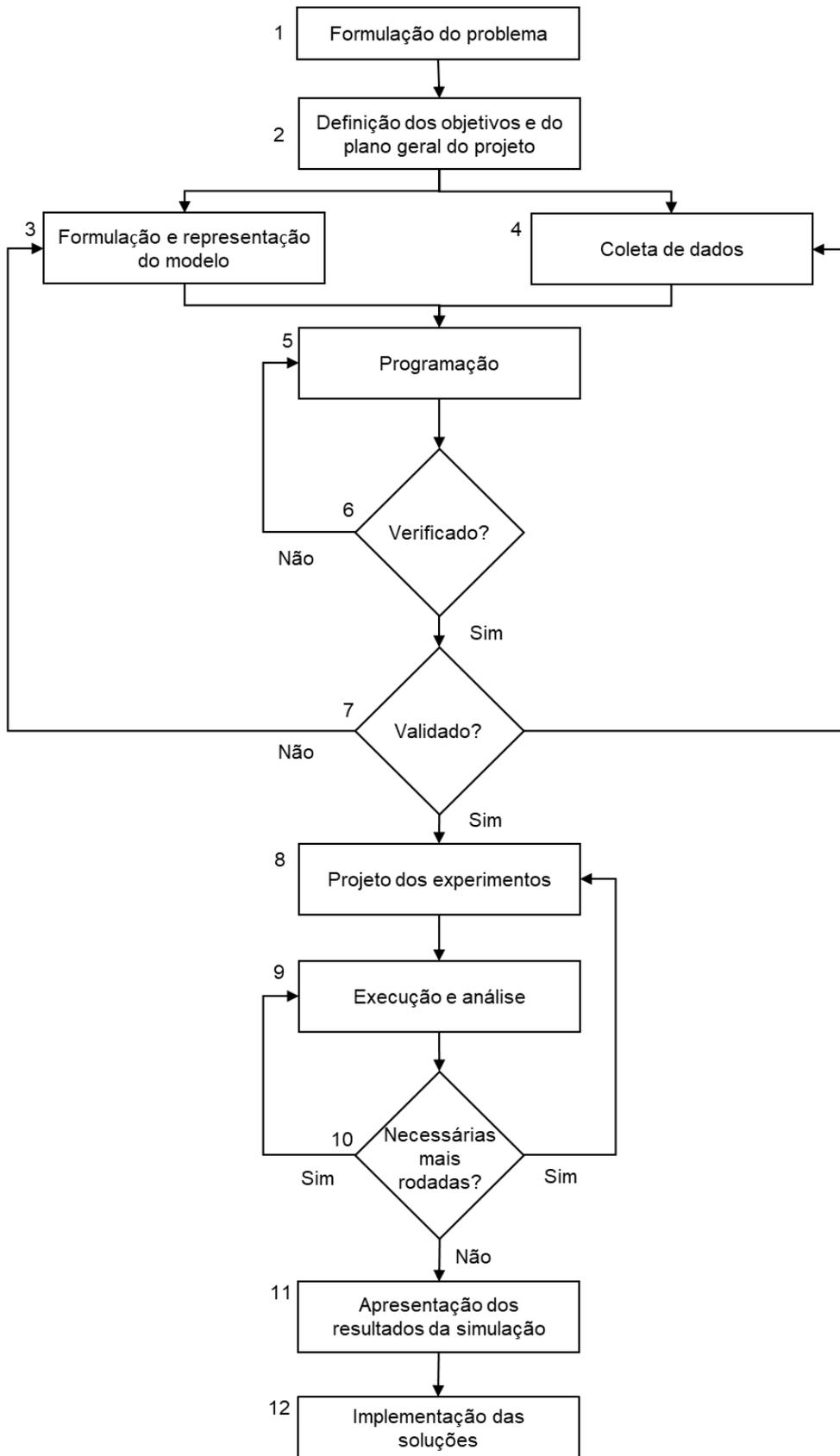


Figura 5 - Fluxograma de método para execução do estudo de simulação. Adaptado de Banks et al (2010)

3.1 Formulação do problema

A etapa de **formulação do problema** (1) é o processo pelo qual o problema inicialmente comunicado por um cliente é formulado de maneira suficientemente bem definida para possibilitar uma ação de pesquisa específica.

O modelo de simulação desenvolvido no presente trabalho visa responder como a variação dos parâmetros e restrições operacionais afeta o desempenho de um sistema composto por um terminal marítimo de petróleo, uma refinaria e um conjunto de empresas distribuidoras clientes.

Os parâmetros e restrições operacionais cujo impacto foi avaliado na análise realizada são:

- Taxa de chegada de navios para atendimento;
- Número de rebocadores disponíveis para apoio às fainas de amarração e desamarração de navios;
- Vazão máxima de carga ou descarga de navios nos berços;
- Volume de produção de derivados de petróleo pela refinaria;
- Restrição de horário de atracação de navios, dependente das suas dimensões e do tipo de cabos utilizado.

O problema foi delimitado à análise dos pontos descritos anteriormente. No entanto, por meio do modelo elaborado seria possível analisar o impacto sobre o desempenho do sistema da mudança de outros parâmetros e restrições operacionais, conforme listados abaixo:

- Volume e número de tanques de armazenamento;
- Demanda média dos clientes;
- Número de operações STS realizadas no terminal;
- Regras de navegação no canal de acesso aos berços;
- Número de lanchas de amarração, práticos e amarradores disponíveis;
- Tempos de cada etapa da operação, como: amarração e desamarração, conexão de mangotes e liberação inicial, desconexão de mangotes e liberação final.

3.2 Definição dos objetivos e do plano geral do projeto

A etapa de **definição dos objetivos e do plano geral do projeto** (2) consiste na preparação da proposta do estudo de simulação a ser conduzido. “Os objetivos indicam as questões que devem ser respondidas pelo estudo de simulação. O plano do projeto deve incluir uma declaração dos vários cenários que serão investigados” (BANKS, 1998, p. 15, tradução nossa).

A análise realizada por meio do modelo desenvolvido deverá ser capaz de responder as seguintes perguntas:

- Qual dentre as propostas de mudanças de parâmetros operacionais impacta mais positivamente os indicadores de desempenho do sistema? Qual é a magnitude desse impacto?
- Qual dentre as restrições analisadas, quando relaxada, impacta mais positivamente os indicadores de desempenho do sistema? Qual é a magnitude desse impacto?
- Qual é o fator que mais impacta a capacidade de atendimento de navios no terminal?
- Em um cenário de grande aumento de demanda de operação de navios no terminal, qual seria a configuração, dentre as opções analisadas, que implicaria em uma operação mais eficiente?
- Como um aumento significativo de produção da refinaria impactaria no desempenho do sistema?
- Quais seriam as medidas operacionais poderiam ser tomadas para acomodar um aumento significativo na produção da refinaria, sem comprometimento do desempenho operacional?

O detalhamento dos vários cenários, investigados com o objetivo de responder as perguntas anteriores no estudo de caso realizado, se encontra na matriz de simulação presente no item 4.3.

3.3 Formulação, representação e programação do modelo e coleta de dados

A etapa de **formulação e representação do modelo** (3) consiste “no processo pelo qual um modelo conceitual é visualizado para representar o sistema em estudo” (BANKS, 1998, p. 340, tradução nossa), o qual é posteriormente traduzido em um modelo comunicativo.

Um modelo comunicativo é "uma representação do modelo que pode ser comunicada a outros humanos, pode ser julgada ou comparada contra o sistema e os objetivos do estudo por mais de um humano" (NANCE, 1994, p. 7, tradução nossa). Um modelo comunicativo pode ser representado diferentes maneiras, dentre elas por meio da utilização de um fluxograma, o qual foi a maneira escolhida no presente trabalho.

A etapa de **coleta de dados** (4) deve ser executada paralelamente a formulação do modelo. Nessa etapa, as características do sistema que contém o problema formulado são investigadas para consideração na definição e modelagem do sistema. “Há uma constante interação entre a construção do modelo e a coleta dos dados necessários. Conforme a complexidade do modelo muda, os requisitos de dados também mudam” (SHANNON, 1975, p. 43, tradução nossa). “Os objetivos do estudo ditam, em grande maneira, o tipo de dados a serem coletados” (BANKS, 2010, p. 36, tradução nossa).

Shannon (1975) identificou seis características principais dos sistemas que devem ser investigadas, a saber:

Mudança: Na simulação, lidamos principalmente com sistemas reais estocásticos e dinâmicos que mudam ao longo de um período de tempo. A frequência e o quanto o sistema irá mudar durante o curso de um estudo de simulação devem ser estimados para que a representação do modelo possa ser atualizada de acordo. Mudanças no sistema também podem alterar os objetivos do estudo.

No trabalho realizado, foi verificado que o sistema analisado não sofreu mudanças no período de estudo. Desta forma, a representação do modelo se manteve constante ao longo da análise.

Ambiente do sistema: consiste no conjunto de variáveis de entrada, as quais são identificadas pela avaliação da significância de sua influência no estado do sistema em relação aos objetivos do estudo. As **variáveis de entrada** consideradas no presente trabalho se encontram listadas a seguir:

- Número e massa específica de produtos movimentados no sistema;
- Taxas média de chegadas de navios ao terminal;
- Número de rebocadores, lanchas, práticos e amarradores disponíveis;
- Limites admissíveis de comprimento total (LOA) e porte bruto operacional (TPB) para atracação ou desatracação de navios aos berços, no horário diurno e noturno;
- Distribuição percentual de LOA de navios por faixas, por tipo de produto transportado e por berço em que a operação será realizada;
- Distribuição percentual de navios dotados de cabos de aço, como função do comprimento do navio;
- Distribuição percentual de operações com os tanques de terra ou STS por berço;
- Distribuição percentual de operações de carga ou descarga de navios, quando operando com o terminal em um determinado berço;
- Distribuição percentual de classes de produtos por berço, por oposto tanque de terra (oposto TQ) ou operação STS (oposto NV), por tipo de operação (carga ou descarga);
- Distribuições estatísticas por berço e oposto (TQ ou NV) dos tempos das atividades de navegação a partir do fundeadouro até o berço, atracação, conexão e liberação inicial, desconexão e liberação final, desatracação;

- Distribuição percentual para as operações com os tanques de terra (oposto TQ) das transferências entre navio e tanques do terminal, da refinaria ou dos clientes, por berço, tipo de produto e tipo de operação (carga ou descarga);
- Distribuições estatísticas de vazão e volume movimentado, por berço nas operações STS (oposto NV);
- Distribuições estatísticas de vazão e volume movimentado, por berço e por tipo de operação (carga ou descarga) nas operações com os tanques de terra;
- Volume de produção pela refinaria e demanda diária por produto;
- Distribuição de capacidade de carga total dos navios que operam cada produto em função do volume transportado;
- Distribuição estatística da ocorrência de ventos acima do limite de amarração de navios ao berço.

Assim, os dados do sistema real, referentes às variáveis de entrada listadas, foram coletados e tratados estatisticamente. Esse processo se encontra descrito para o estudo de caso realizado no item 4.1.

Comportamento contraintuitivo: Alguns sistemas complexos podem apresentar um comportamento contraintuitivo, que deve ser identificado para consideração na definição do sistema. Nesses casos, causa e efeito geralmente não estão relacionados no tempo ou no espaço. No sistema examinado não foi identificado esse tipo de comportamento.

Perda de desempenho: Um sistema pode mostrar uma tendência para a perda de desempenho devido à deterioração de seus componentes (por exemplo, máquinas em um sistema de fabricação) durante um período de tempo. No presente estudo, foi considerado que, para o horizonte de tempo analisado, a perda de desempenho poderia ser desprezada.

Interdependência e organização: As características de interdependência e organização do sistema devem ser examinadas antes da abstração do sistema real para fins de modelagem. Em um sistema estocástico complexo, muitas atividades ou eventos acontecem simultaneamente e se influenciam mutuamente. A complexidade do sistema pode ser superada através da decomposição do sistema em subsistemas e subsistemas em outros subsistemas.

Assim, o sistema analisado foi inicialmente dividido em fundeadouro, berços, tanques do terminal, clientes e refinaria e linhas de dutos interligando esses tanques. As descrições desses componentes se encontram listadas as seguir:

- **Fundeadouro:** Local onde os navios aguardam a disponibilidade dos recursos e o cumprimento das restrições para a atracação e operação. Os rebocadores, as lanchas

de amarração, o canal, os práticos, a equipe de amarradores e o berço foram modelados como recursos.

- **Berços:** Local em que é realizada a operação de transferência de produtos com navios. Os berços são ocupados após embarque do práctico e início da navegação do navio a partir do fundeadouro. Os berços são liberados após a partida do navio do terminal, marcada pela liberação do canal.
- **Tanques:** Espaço físico em que são armazenados os produtos movimentados.
- **Linhas de dutos:** Instalações por meio das quais os produtos são movimentados entre os diferentes tanques (navios e tanques de terra). A vazão nas linhas com a qual a transferência de produtos entre navio e tanques ou entre tanques e tanques é realizada depende dos elementos envolvidos. O mesmo vale para o volume transferido.

Tendo analisado a interdependência e a organização, foram adotadas as seguintes **premissas e simplificações** para a modelagem do sistema:

- Os navios operam apenas um tipo de produto por estadia;
- Os navios são previamente programados para operar em um determinado berço, de modo que cada berço possui sua fila individual de navios;
- Apenas um navio pode navegar por vez no canal de acesso aos berços;
- A produção da refinaria, sua demanda por petróleo e a demanda dos clientes não muda ao longo do horizonte de tempo simulado;
- Navios que realizam STS não operam com os tanques de terra e vice-versa;
- A operação de transferência entre navio e tanque de terra é interrompida se o volume inicialmente programado for completamente transferido ou se faltar carga ou espaço no tanque de terra. Nesse caso, o navio não espera até que haja espaço ou produto para continuar a transferência. A operação se encerra e o navio passa a buscar recursos para a desatracar do berço;
- O atendimento dos navios nos berços é priorizado sobre a distribuição por dutos para as companhias clientes. Caso a quantidade de produto presente nos tanques seja suficiente apenas para atender o navio atracado no berço, o envio de produtos por modal dutoviário para os clientes é interrompido;
- A análise logística foi realizada com foco nos dois produtos principais movimentados no sistema, que no estudo de caso realizado são o petróleo e o diesel. A movimentação dos demais produtos foi modelada de maneira similar, no entanto

os tanques de armazenamento desses produtos foram considerados como se tivessem uma capacidade infinita, de modo que a operação nunca seria interrompida por falta de espaço para armazenamento ou por falta desses produtos para a transferência;

- Os tanques de cada um dos componentes do sistema (navio, terminal, refinaria e clientes) de um mesmo produto foram modelados agrupados como um único tanque, com capacidade de armazenamento igual ao total da soma das capacidades dos tanques individuais. Ou seja, se a refinaria possui 5 (cinco) tanques para armazenamento de petróleo com capacidade de 60.000 m³ cada um, esses tanques foram agrupados em um único tanque de 300.000 m³. Essa simplificação tem por base a premissa de que as distribuições estatísticas de vazão já incorporam os tempos de mudanças de tanques ao longo da operação;
- Os indicadores de desempenho foram calculados apenas com base nos produtos enfocados na análise (petróleo e diesel).

A etapa de **programação do modelo** (5) consiste na “tradução do modelo comunicativo em um modelo programado (modelo executável)” (BANKS, 1998, p. 343, tradução nossa). No presente trabalho, o modelo de simulação foi implementado no Arena®, que é um “programa comercial de modelagem e análise de simulações de eventos discretos desenvolvido pela Rockywell Software” (KELTON; SADOWSKI, R.; SADOWSKI, D., 1998).

3.3.1 Fluxograma do modelo comunicativo e programação no Arena®

No presente item será apresentado o resultado das etapas de formulação, representação e programação do modelo descritas anteriormente. O fluxo macro do modelo elaborado foi dividido em cinco blocos principais (Figura 6).

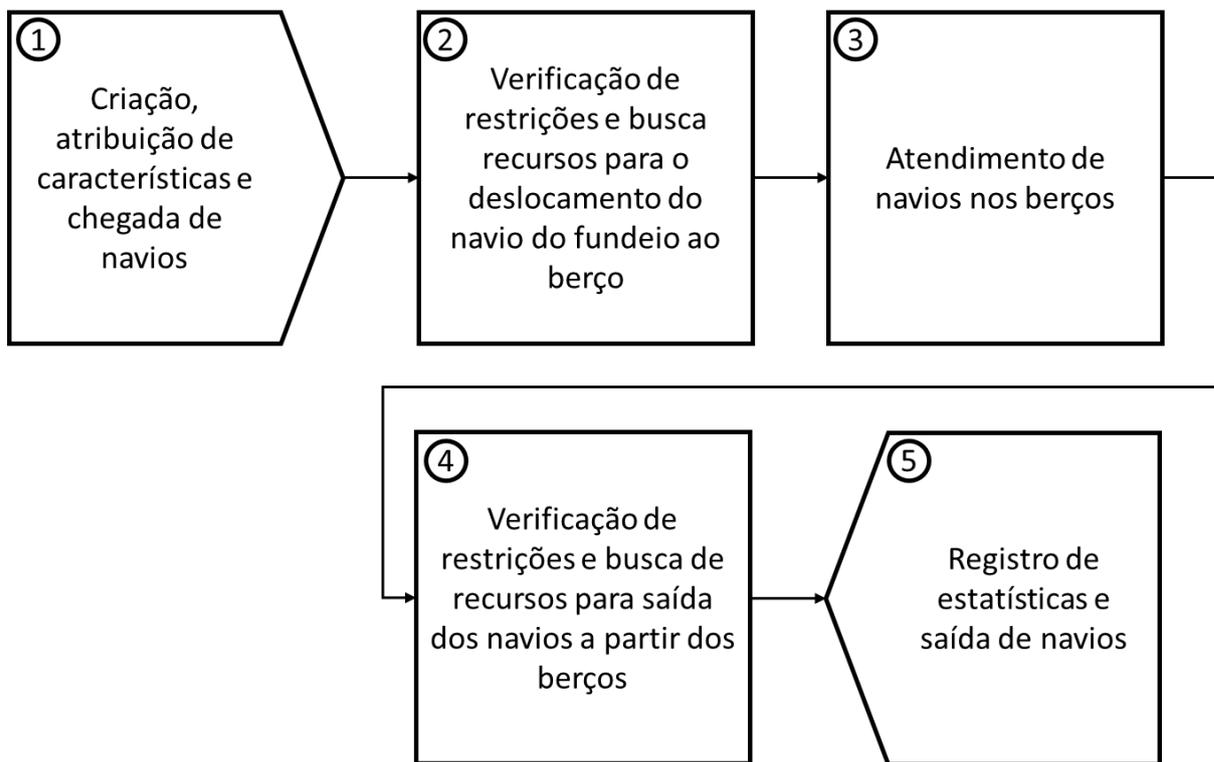


Figura 6 - Fluxo macro principal do modelo de simulação

O primeiro bloco (1) contém o submodelo no qual são criadas as entidades de navios a intervalos de tempo conforme distribuição exponencial ou quando recebido sinal de convocação emergencial no caso de emissão alerta de nível por algum sensor dos tanques de petróleo ou diesel da refinaria. Após criadas, as entidades recebem os atributos principais e vão para a zona de fundeio do terminal.

No segundo bloco (2), as entidades aguardando na fila no fundeadouro realizam a verificação de disponibilidade de recursos e de atendimento às restrições para deslocamento ao berço. Uma vez estando os recursos necessários disponíveis e as restrições todas satisfeitas, a entidade procede para o processo de atendimento no berço, realizado no terceiro bloco (3).

Após o atendimento, a entidade inicia a busca de recursos e verificação de restrições para desatracação e saída a partir dos berços, processo que é realizado no quarto bloco (4). Por fim, as estatísticas de estadia, número de navios atendidos e volumes movimentados são registradas no quinto bloco (5), no qual a entidades também procedem para a saída do modelo.

A composição e lógica detalhada de cada um dos blocos citadas serão descritas nos itens a seguir.

3.3.1.1 Criação, atribuição de características e chegada de navios

A lógica da sub-rotina de criação de entidades, atribuição de características e chegada de navios se encontra detalhada no fluxograma distribuído da Figura 7 à Figura 10.

O modelo se inicia com o nó (1.1) de criação de entidades de navios a intervalos de tempo definidos conforme distribuição exponencial (Figura 7). Para cada berço “i” modelado, há um nó específico de criação de entidades, representando a chegada de navios conforme programação, de modo que o parâmetro de intervalo médio entre criações, dado de entrada necessário para a distribuição exponencial, foi levantado estatisticamente para cada um dos berços. No Arena® foi utilizado o módulo *Create* para execução da lógica descrita. No seguinte nó (1.2), a entidade criada recebe como atributo o índice do berço no qual irá operar. Essa lógica é executada no Arena® por meio do módulo *Assign*.

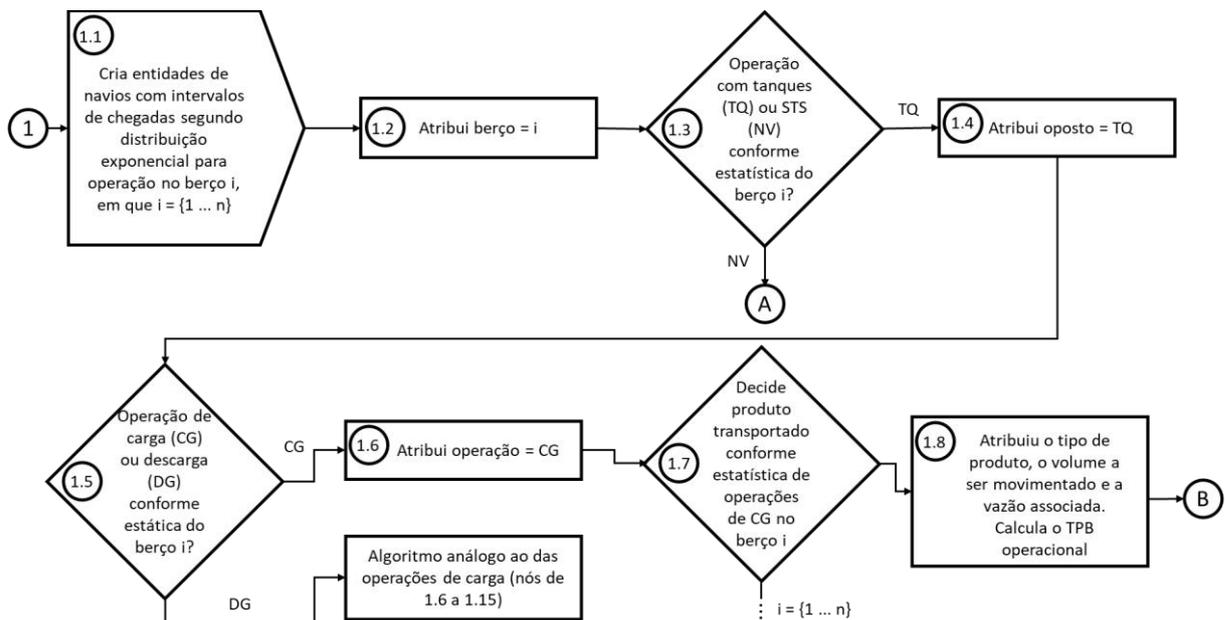


Figura 7 - Fluxograma criação, atribuição de características e chegada de navios (parte 1)

Sequencialmente, a entidade chega a uma porta condicional (1.3), a qual distribui parte das entidades para operação com os tanques de terra (oposto TQ) e parte para o STS (oposto NV). O critério para essa decisão é a distribuição percentual de operações com oposto TQ ou NV no berço “i”, em que a entidade irá operar. Por exemplo, se estatisticamente 60% dos navios que operam no berço “i” realizem a transferência de carga com os tanques de terra, 60% das entidades que cheguem ao nó 1.3 serão distribuídos para o oposto TQ e os demais 40% para o oposto NV. Essa lógica é executada no Arena® por meio do módulo *Decide*, tipo *2-way by chance*.

Seguindo pela ramificação do nó 1.4, a entidade recebe como atributo o oposto TQ (módulo *Assign*) e logo chega a uma nova porta condicional (nó 1.5), na qual parte das entidades são distribuídas para operação de carga (CG) e parte para descarga (DG). Novamente, o critério para essa decisão é a distribuição percentual de operações CG ou DG no berço “i”, em que a

entidade irá operar, e isso foi programado no Arena® por meio do módulo *Decide*, tipo *2-way by chance*.

Em lógica semelhante à feita anteriormente, no nó 1.6 a entidade recebe como atributo o tipo de operação CG (módulo *Assign*). Na nova porta condicional (1.7), a entidade é distribuída para um dos “n” caminhos possíveis, sendo “n” o número de tipos de produtos considerados no modelo elaborado. No estudo de caso conduzido, foram considerados 10 tipos distintos de produtos. O critério para essa decisão é a distribuição percentual de operações movimentando cada um dos produtos considerados no berço “i”. No Arena®, foi utilizado o módulo *Decide*, tipo *N-way by chance*, para programação dessa lógica.

Na sequência (1.8), a entidade recebe como atributo o tipo de produto. O volume a ser movimentado e a vazão associada são ambos função do tipo de produto e do berço, sendo que sua atribuição para a entidade ocorre por meio do uso de expressões representativas da distribuição estatística desses parâmetros, as quais foram levantadas na etapa de coleta de dados. Por fim, é calculado o porte bruto operacional da embarcação. Importante salientar que para as operações de carga, o navio chega na condição de lastro, de modo que o porte-bruto operacional não deve considerar o peso da carga nesse caso.

No nó 1.9 (Figura 8), a entidade passa por nova porta condicional (módulo *Decide*) que realiza a distribuição entre a operação com os tanques do terminal (TT, nó 1.10) e a com os tanques da refinaria ou clientes (TC, nó 1.11). Novamente o critério para essa decisão é a distribuição percentual de operações TT ou TC no berço “i”, qual também depende do tipo de operação (CG ou DG).

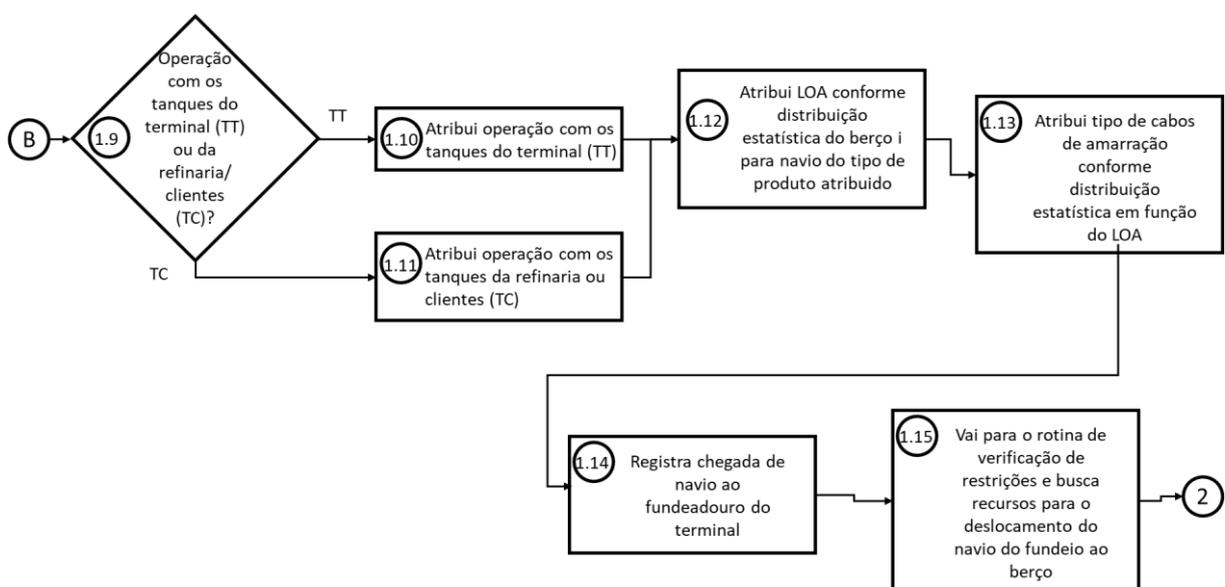


Figura 8 - Fluxograma criação, atribuição de características e chegada de navios (parte 2)

Em seguida (1.12), a entidade recebe o comprimento total (LOA) com base na distribuição estatística de navios atendidos no berço “i” operando o produto “x” anteriormente atribuído a essa entidade.

No nó 1.13 é atribuído o tipo de cabos de amarração portado pelo navio. No modelo elaborado, foram utilizadas duas classes, uma de cabos sintéticos e outra de cabos de aço. No sistema investigado, navios com cabos de aço não são autorizados a atracar a noite e o percentual de navios que portam cabos de aço é maior para navios de maior comprimento.

Na sequência (1.14), é registrado o horário de chegada do navio ao fundeadouro do terminal por meio da emissão do *Notice of Readiness* (NOR), registrado na entidade como atributo, por meio do módulo *Assign*. Finalizando, a entidade se encaminha (1.15) para o submodelo de verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço.

O fluxo do submodelo de criação, atribuição de características e chegada de navios para o STS se diferencia do fluxo para as entidades que operam com os tanques de terra a partir do nó 1.16 (Figura 9), no qual a entidade recebe como atributo o oposto NV.

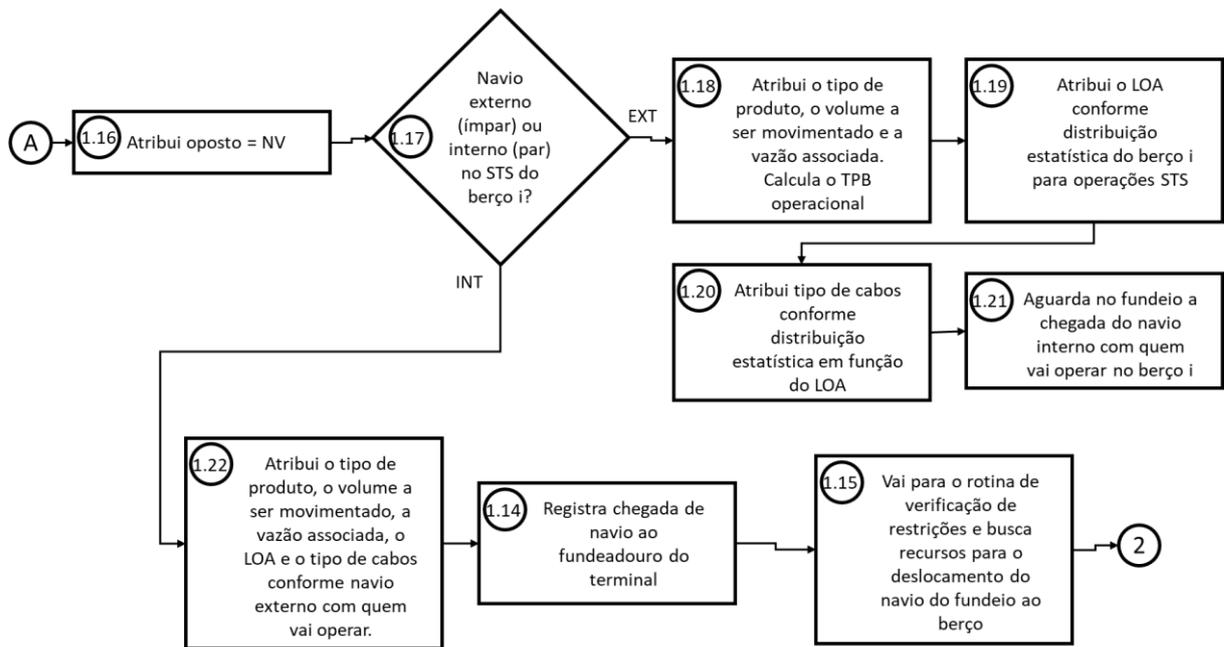


Figura 9 - Fluxograma criação, atribuição de características e chegada de navios (parte 3)

Na sequência, as entidades chegam a uma porta condicional (1.17), a qual segregará metade das entidades que farão STS no berço “i” como navios externos, ou seja, ficaram na parte de fora do berço, e a outra metade como navios internos.

O critério para essa decisão é a ordem de chegada das entidades, sendo que as entidades em ordem de chegada ímpar, serão encaminhadas como navios externos, e as em ordem par serão encaminhadas como navios internos. Por exemplo, o primeiro navio atribuído ao berço

“i” a chegar no nó 1.17 será encaminhado ao fluxo dos navios externos (1.18 a 1.21). Por sua vez, o segundo navio para esse mesmo berço será encaminhado para o fluxo dos navios internos (1.22 a 2). Essa lógica é executada no Arena® por meio do módulo *Decide*, tipo *2-way by condition*.

No nó 1.18 é atribuída a posição EXT no STS, além do tipo de produto, o volume a ser movimentado e a vazão associada, conforme distribuição estatística do berço. O TPB operacional é calculado de forma semelhante ao feito no nó 1.8. Nos nós seguintes (1.19 e 1.20) a entidade recebe os atributos de LOA e tipo de cabos, em lógica análoga à feita nos nós 1.12 e 1.13.

Na sequência (1.21), o navio aguarda no fundeio a chegada e amarração ao berço “i” do navio interno com quem irá realizar a operação de STS. Essa lógica é executada no Arena® por meio do módulo *Hold*, tipo *Infinite Hold*.

Os navios internos recebem no nó 1.22 o atributo de posição INT, além do tipo de produto, o volume a ser movimentado e a vazão associada, idênticos ao do navio externo correspondente. O TPB operacional é calculado, sendo que o peso da carga só é contabilizado no navio interno. O LOA e o tipo de cabos recebidos também são equivalentes ao do respectivo navio externo.

Na sequência (1.14), é registrado o horário de chegada do navio interno ao fundeadouro do terminal por meio da emissão do NOR. Finalizando, a entidade se encaminha (1.15) para o submodelo de verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço.

O submodelo de criação, atribuição de características e chegada de navios inclui ainda uma rotina (Figura 10) para criação de navios convocados emergencialmente para abastecimento ou retirada de produtos da refinaria quando o nível dos respectivos estoques atingem o ponto de convocação.

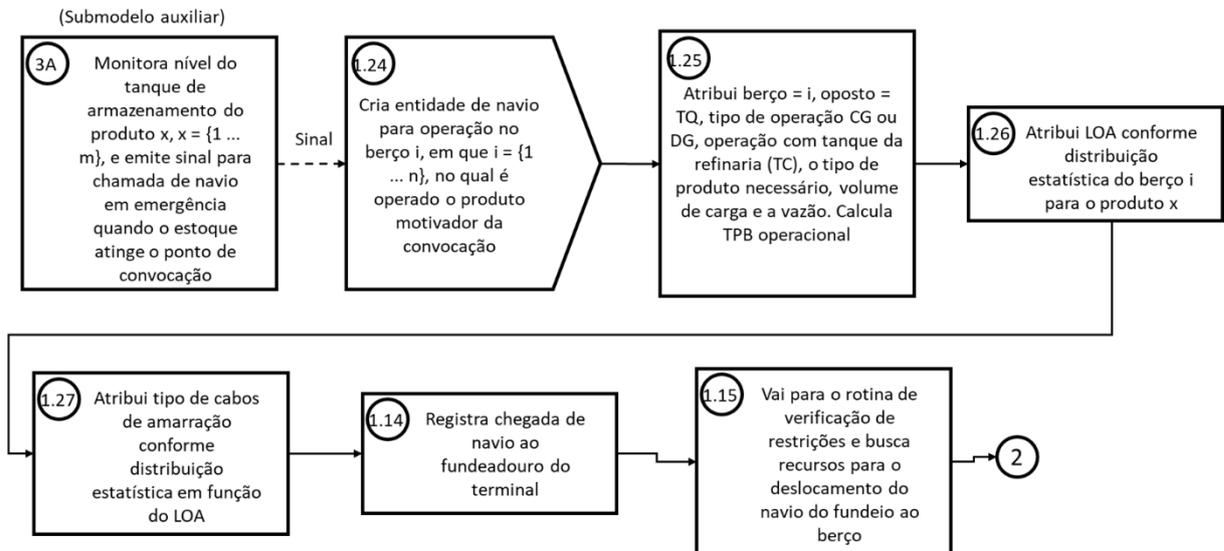


Figura 10 - Fluxograma criação, atribuição de características e chegada de navios (parte 4)

O submodelo auxiliar (3A), cuja lógica de execução será explicada detalhadamente no item 3.3.1.6, monitora o nível do tanque de armazenamento do produto “x” e emite um sinal para chamada de navio em emergência quando o nível atinge um ponto crítico. Esse ponto pode indicar que o petróleo, insumo fundamental da refinaria, está acabando, ou que o espaço para armazenamento dos derivados produzidos está no fim, o que poderia ocasionar uma parada do refino.

Assim, após emitido o sinal, é criada uma entidade (1.24), para operação no berço “i”, no qual é operado o produto motivador da convocação. Na sequência (1.25) é atribuído o status emergencial para a entidade, o berço “i”, o oposto TQ, o tipo de operação CG ou DG, operação com tanque da refinaria (TC) e o tipo de produto necessário. O volume de carga e a vazão são atribuídos conforme distribuição estatística. Também é calculado o TPB operacional conforme explicado anteriormente.

A entidade criada recebe o LOA (1.26), o tipo de cabo de amarração (1.27) e, por fim, é registrado o seu horário de chegada ao fundeadouro do terminal por meio da emissão do NOR. Na sequência, a entidade também se encaminha (1.15) para o submodelo de verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço.

3.3.1.2 Verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço

A lógica da sub-rotina de verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço se encontra detalhada no fluxograma distribuído da Figura 11 à Figura 15.

Esse submodelo se inicia com o nó 2.1 (Figura 11), que consiste em um portal condicional em que é verificado se a intensidade do vento se encontra abaixo do limite para amarração de

navios do terminal. Essa lógica é executada no Arena® por meio do módulo *Decide*, tipo *2-way by condition*. Os valores das variáveis de intensidade de vento e horário do dia são definidos por submodelo auxiliar específico (vide 3.3.1.6).

Caso seja verificado que o vento se encontra acima do limite, a entidade é direcionada para o nó 2.2, em que espera a intensidade do vento diminuir até ficar abaixo do limite. No Arena® isso é implementado por meio de um módulo *Hold*, tipo *Scan for Condition*.

Após a redução da intensidade do vento, a entidade se direciona ao nó 2.3, no qual o tempo de espera devido ao vento é então registrado em um atributo próprio (módulo *Assign*). A partir daí a entidade retorna ao início (2) do submodelo, a partir de onde retomará a verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço.

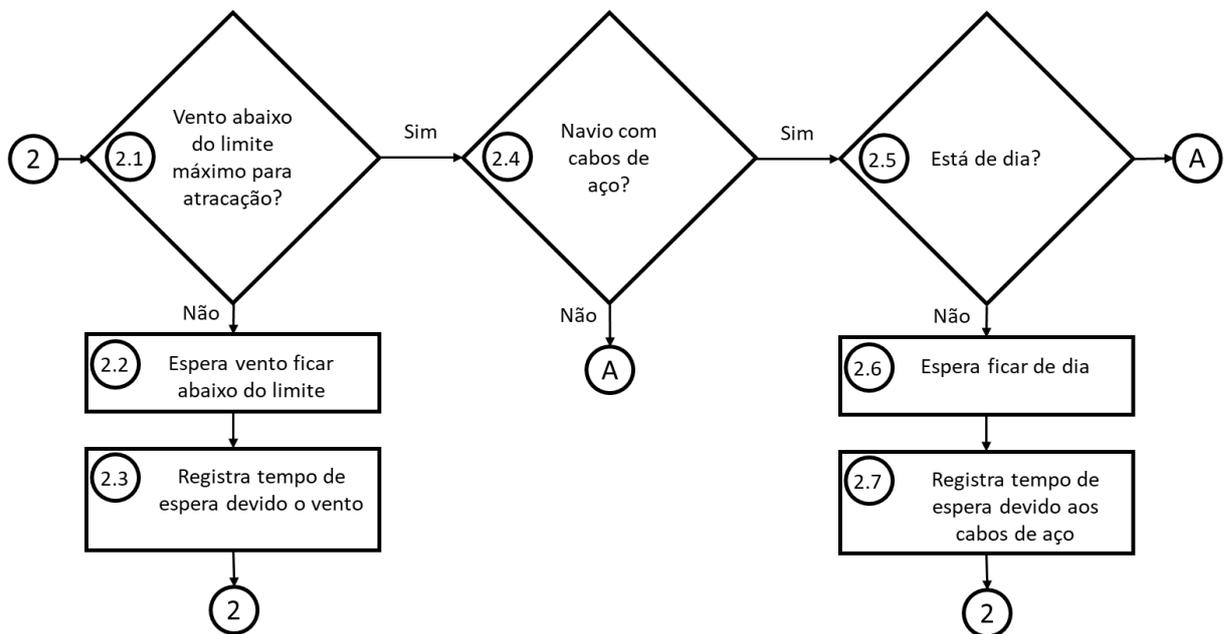


Figura 11 - Fluxograma verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço (parte 1)

No portal condicional do nó 2.4, é verificado se o navio recebeu cabos de aço como atributo. Caso positivo, é verificado (2.5) se está de dia no horário do modelo. Como no terminal modelado os navios com cabos de aço não são autorizados a atracar no horário noturno, caso seja verificado que está de noite, a entidade é direcionada para o nó 2.6, em que aguarda a luz do dia.

Após iniciado o dia, a entidade se direciona ao nó 2.7, no qual o tempo de espera devido a dotação de cabos de aço é registrado em um atributo próprio. A partir daí a entidade retorna ao início (2) do submodelo.

Dando continuidade ao fluxo de verificação das restrições, no nó 2.8 (Figura 12) os navios que realizarão STS são segregados dos que operaram com os tanques de terra. Algoritmo para

verificação das restrições relacionadas ao TPB e ao LOA para os navios com oposto NV é análogo ao das operações com oposto TQ (nós de 2.9 a 2.15), só que considera os limites máximos permitidos para as operações STS.

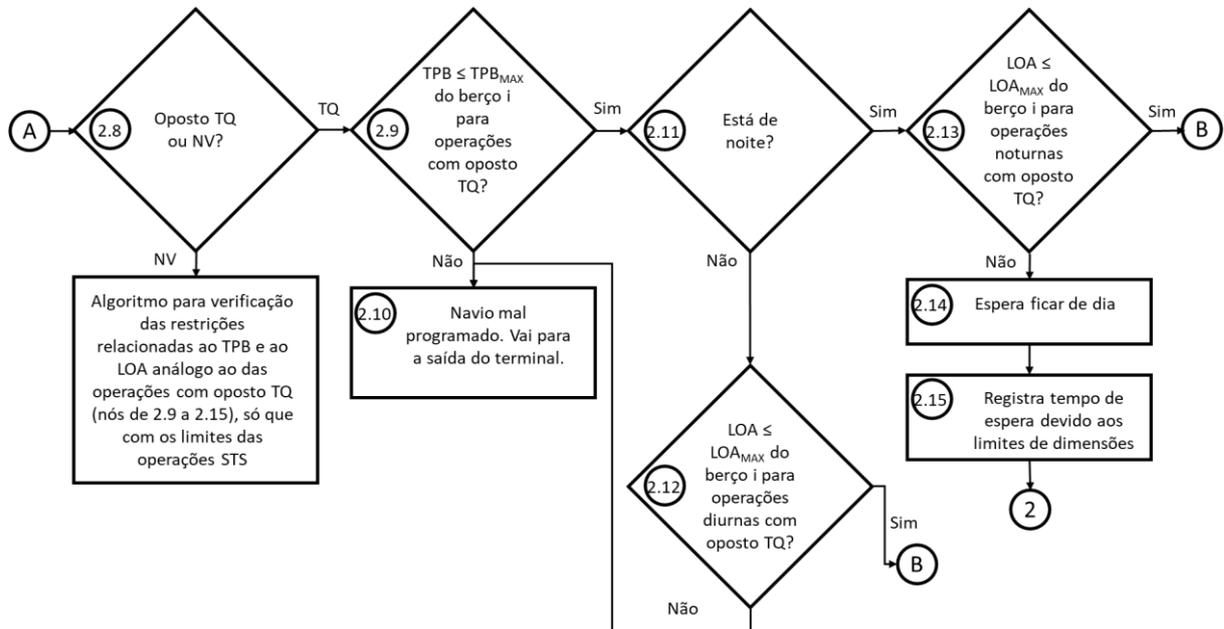


Figura 12 - Fluxograma verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço (parte 2)

No nó 2.9 é verificado se TPB operacional do navio é menor ou igual ao limite máximo estabelecido para o berço a que for designado. Caso essa condição não se cumpra, o navio é caracterizado como mal programado e é retirado do sistema (módulo *Dispose*). Como a distribuição estatística para cada berço do volume de carga (maior parcela do TPB operacional) é um parâmetro de entrada do modelo, caso a definição dessa distribuição tenha sido adequadamente executada, os navios satisfarão necessariamente a condição avaliada no nó 2.9.

Com a chegada da entidade ao nó 2.11, é verificado se está à noite no horário do modelo. No terminal modelado, os limites de LOA para atracação noturna em alguns dos berços são mais restritivos que os para atracação diurna. Assim, caso a verificação esteja ocorrendo no horário noturno, a entidade procede para o nó 2.13, no qual é verificado se o LOA do navio é menor ou igual ao limite máximo estabelecido para atracação noturna no berço a que for designado.

Caso essa condição não se cumpra, a entidade é direcionada para o nó 2.14, em que aguarda a luz do dia. Após iniciado o dia, a entidade se direciona ao nó 2.15, no qual o tempo de espera devido aos limites de dimensões é registrado em um atributo próprio. A partir daí a entidade retorna ao início (2) do submodelo, a partir de onde retomará a verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço.

Caso no nó 2.11 seja verificado que está de dia no horário do modelo, a entidade procede para o nó 2.12, no qual é verificado se o LOA do navio é menor ou igual ao limite máximo estabelecido para atracação diurna no berço a que for designado. Caso essa condição não se cumpra, o navio é caracterizado como mal programado e é retirado do sistema (módulo *Dispose*). De maneira análoga ao explicado anteriormente para o TPB, como a distribuição estatística para cada berço do LOA dos navios é um parâmetro de entrada do modelo, caso a definição dessa distribuição tenha sido adequadamente feita, os navios satisfarão necessariamente a condição avaliada no nó 2.12.

O fluxo para verificação da disponibilidade de recursos para atracação e operação se inicia no nó 2.16 (Figura 13), no qual os navios que realizarão STS (oposto NV) são segregados dos que operaram com os tanques de terra (oposto TQ).

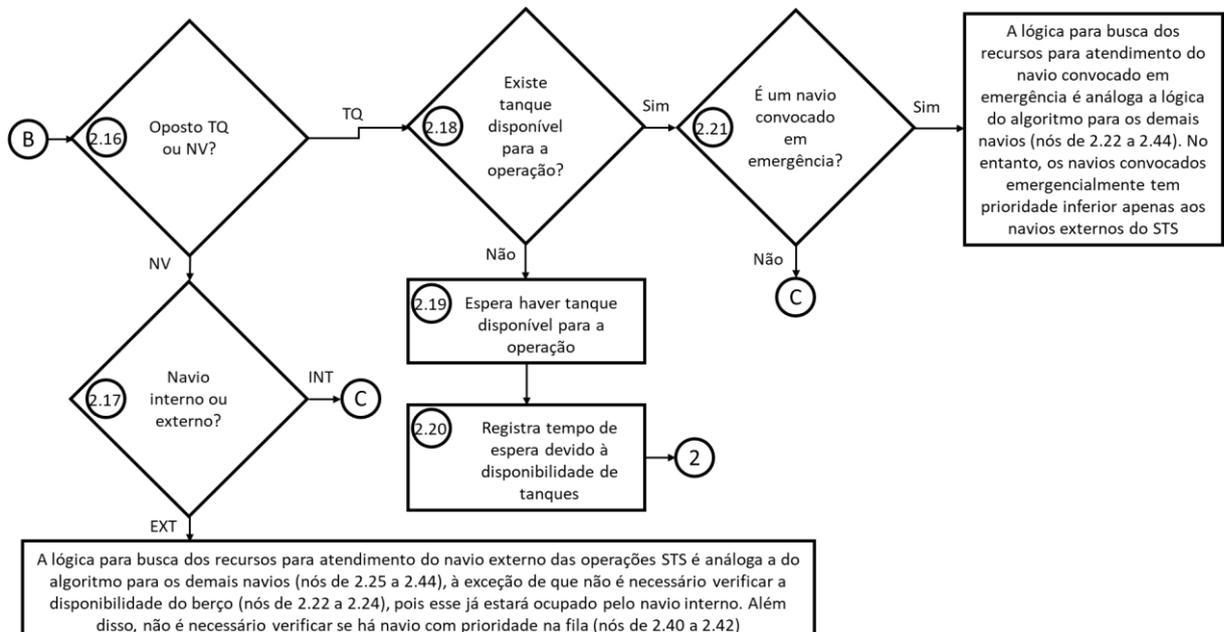


Figura 13 - Fluxograma verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço (parte 3)

Os navios com oposto TQ seguem para o nó 2.18, no qual é verificado se existe tanque disponível para a operação do produto transportado pelo navio a partir do berço em que irá operar. Caso essa condição não se cumpra, a entidade é direcionada para o nó 2.19, em que aguarda. Quando houver disponibilidade de tanque, a entidade se direciona ao nó 2.20, no qual o tempo de espera é registrado. A partir daí a entidade retorna ao início (2) do submodelo.

Caso haja tanque disponível na verificação realizada, a entidade passa ao nó 2.21, na qual os navios convocados em emergência são segregados dos demais navios. Os navios regulares seguem para o nó 2.22 (Figura 14), no qual é verificado se o berço para o qual o navio foi programado está disponível. Caso negativo, a entidade aguarda a disponibilidade do berço

(2.23), registrando posteriormente o tempo de espera (2.24) para ser redirecionada ao início do submodelo.

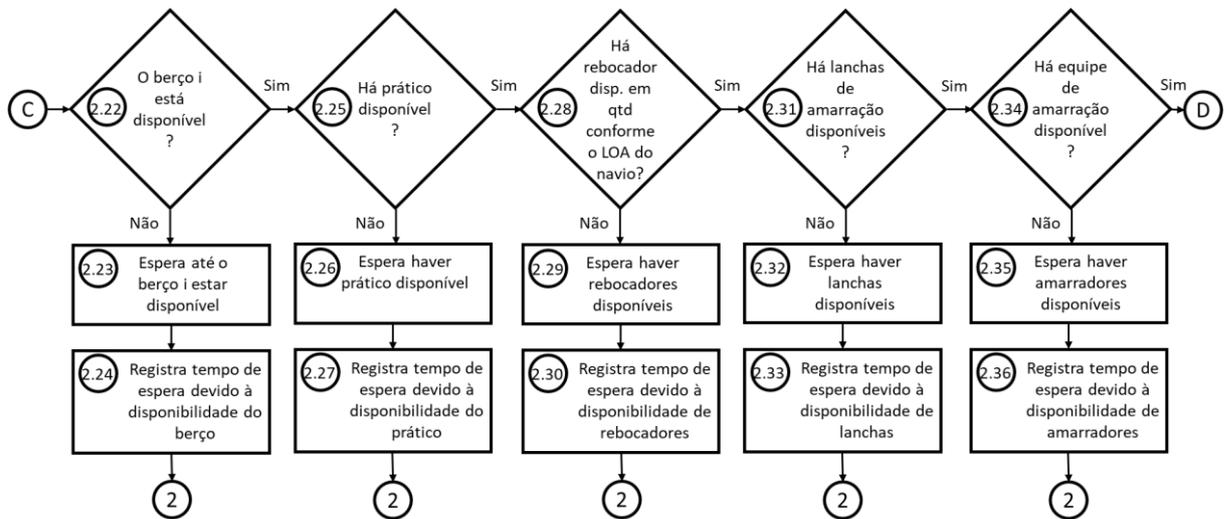


Figura 14 - Fluxograma verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço (parte 4)

A mesma lógica para verificação da disponibilidade do berço (2.22 a 2.24) é utilizada para a verificação da disponibilidade do práctico (2.25 a 2.27); dos rebocadores (2.28 a 2.30), em quantidade que varia conforme LOA do navio; das lanchas de amarração (2.31 a 2.33); da equipe de amarração (2.34 a 2.36); e do canal de acesso (2.37 a 2.39, Figura 15).

No nó 2.40, é verificado se há navio com prioridade buscando recursos para operação no berço “i”. Os navios com maior prioridade são os externos do STS, pois nesse caso os navios internos já se encontrarão amarrados e ocupando o berço, aguardado apenas os externos para a execução da operação. Posteriormente, são priorizados os navios emergenciais, cuja convocação visa evitar uma parada da refinaria.

Caso haja navio com prioridade buscando recursos, a entidade é direcionada a partir do nó 2.40 para o nó 2.41, no qual aguarda o navio prioritário buscar e utilizar os recursos necessários. Em seguida a espera é registrada (2.42) e a entidade retorna ao início (2) do submodelo.

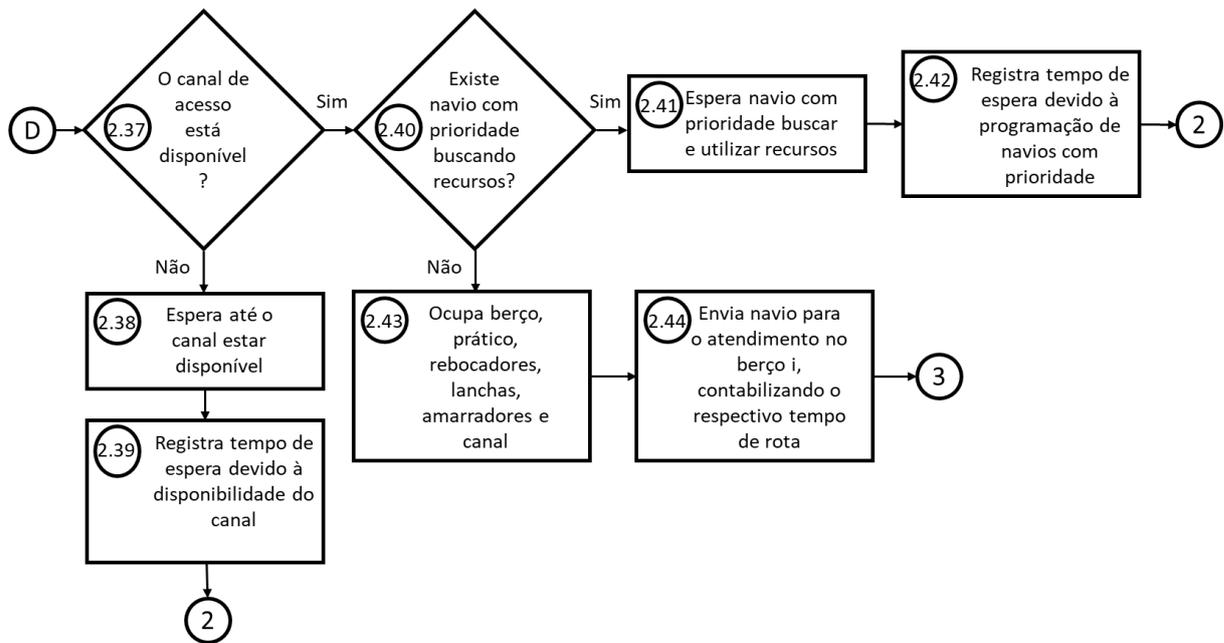


Figura 15 - Fluxograma verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço (parte 5)

Caso não haja navio com prioridade buscando recursos, a entidade passa então para o nó 2.43, no qual ocupa o berço, o práctico, os rebocadores, as lanchas, os amarradores e o canal. No Arena® essa lógica é executada por meio do módulo *Seize*.

Por fim, o navio é enviado para o atendimento no berço “i”, contabilizando o respectivo tempo de rota estabelecido por uma distribuição estatística. Para contabilização no Arena® do tempo de rota entre fundeadouro e berço foi utilizado o módulo *Route*.

A lógica para busca dos recursos para atendimento do navio convocado em emergência é análoga à lógica do algoritmo para os demais navios (nós de 2.22 a 2.44). No entanto, os navios convocados emergencialmente têm prioridade inferior apenas aos navios externos do STS.

Os navios com oposto NV, após saírem do nó 2.16 passam por um novo portal condicional (2.17), no qual é verificado se a entidade foi caracterizada como navio interno (INT) ou externo (EXT). Os navios internos passam pelo mesmo fluxo de busca de recursos para atracação que os navios com oposto TQ.

Os navios externos passam por um fluxo específico, cuja lógica para busca dos recursos para atendimento é análoga a do algoritmo para os demais navios (nós de 2.25 a 2.44), à exceção de que não é necessário verificar a disponibilidade do berço (nós de 2.22 a 2.24), pois esse já estará ocupado pelo navio interno. Além disso, não é necessário verificar se há navio com prioridade na fila (nós de 2.40 a 2.42), pois essas entidades são as de prioridade mais elevada.

3.3.1.3 Atendimento de navios nos berços

A lógica da sub-rotina de atendimento de navios nos berços se encontra detalhada no fluxograma distribuído da Figura 16 à Figura 18.

Esse submodelo se inicia com o nó 3.1 (Figura 16), que consiste em um portal condicional em que são segregados os navios que operarão com os tanques de terra (oposto TQ) dos que realizarão STS (oposto NV).

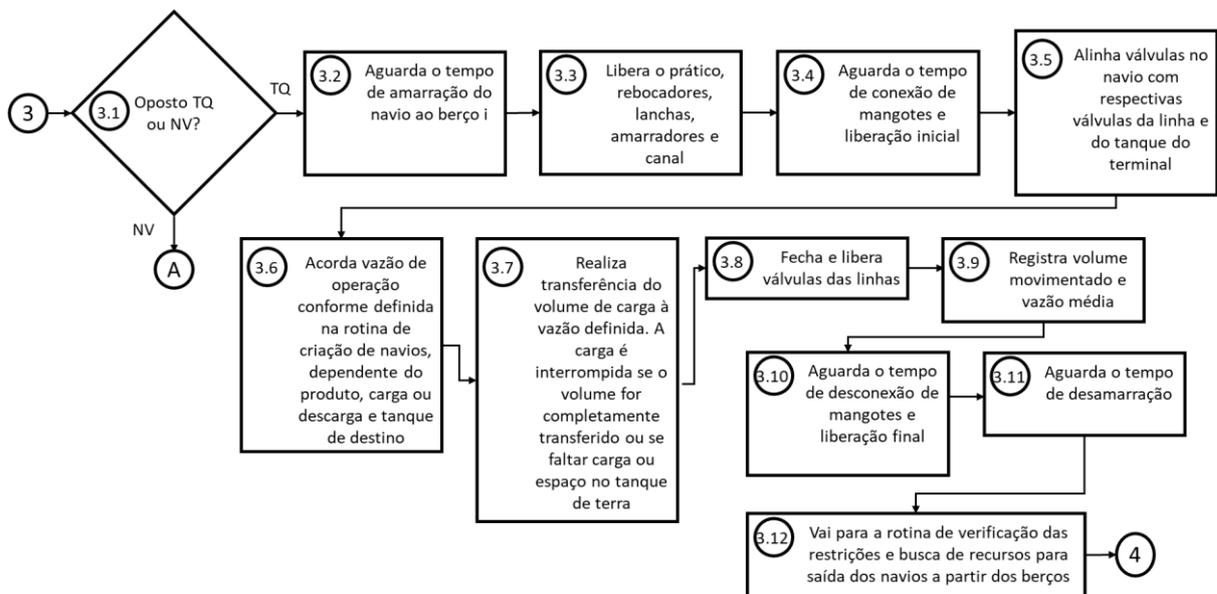


Figura 16 - Fluxograma atendimento de navios nos berços (parte 1)

No nó 3.2, a entidade aguarda o tempo necessário para realização da sua amarração ao berço a que tiver sido designada. Esse tempo é uma variável aleatória dada por uma distribuição estatística levantada na investigação do sistema em análise. Essa lógica é executada no Arena® por meio do módulo *Delay*.

Após a amarração do navio, os recursos prático, rebocadores, lanchas, amarradores e canal são liberados (3.3) para que possam ser utilizados por outras entidades na fila para acesso aos berços. Essa liberação de recursos é executada no Arena® por meio do módulo *Release*.

Na sequência é contabilizado o tempo (*Delay*) de conexão dos mangotes e liberação inicial da operação. Novamente esse tempo é dado por uma distribuição estatística levantada na etapa de investigação do sistema analisando os registros de atendimento de navios em cada berço. Um maior detalhamento do processo de análise e tratamento dos dados para o estudo de caso realizado por ser visto no item 4.1.

No nó 3.5, é realizado o alinhamento das válvulas no navio com respectivas válvulas da linha que vai do berço ao tanque do terminal. Essa lógica foi programada no Arena® por meio do módulo *Seize Regulator*.

Posteriormente (3.6), a vazão de operação entre navio e terminal é acordada. Como a vazão máxima é um atributo recebido pela entidade no submodelo de criação, atribuição de características e chegada de navios, no Arena® foi utilizado o módulo *Regulate* para replicação desse parâmetro para a linha que liga o terminal ao navio.

A transferência entre navio e terminal do volume de carga à vazão definida é realizada no nó 3.7, a qual é interrompida se o volume for completamente transferido ou se faltar carga (para operações CG) ou espaço (para operações DG) no tanque de terra. No Arena® essa lógica foi programada por meio do módulo *Flow*.

Em seguida, as válvulas das linhas são fechadas e liberadas (3.8), utilizando para isso o módulo *Release Regulator* do Arena®. O volume movimentado e a vazão da operação são então registrados (3.9, módulo *Record*). Por fim, os tempos de desconexão de mangotes e liberação (3.10) e desamarração (3.11) são contabilizados de maneira análoga ao feito para os tempos de amarração, conexão e liberação inicial. A entidade é então direcionada (3.12) para a rotina de verificação das restrições e busca de recursos para saída dos navios a partir dos berços.

A lógica específica para os navios que realizarão STS se inicia no nó 3.13 (Figura 17), no qual o tempo de amarração do navio ao berço ou ao navio interno é contabilizado. Analogamente ao feito nas operações com oposto TQ, esse tempo é uma variável aleatória dada por uma distribuição estatística levantada na investigação do sistema em análise. Essa lógica é executada no Arena® por meio do módulo *Delay*.

Após a amarração do navio, os recursos prático, rebocadores, lanchas, amarradores e canal são liberados (3.14).

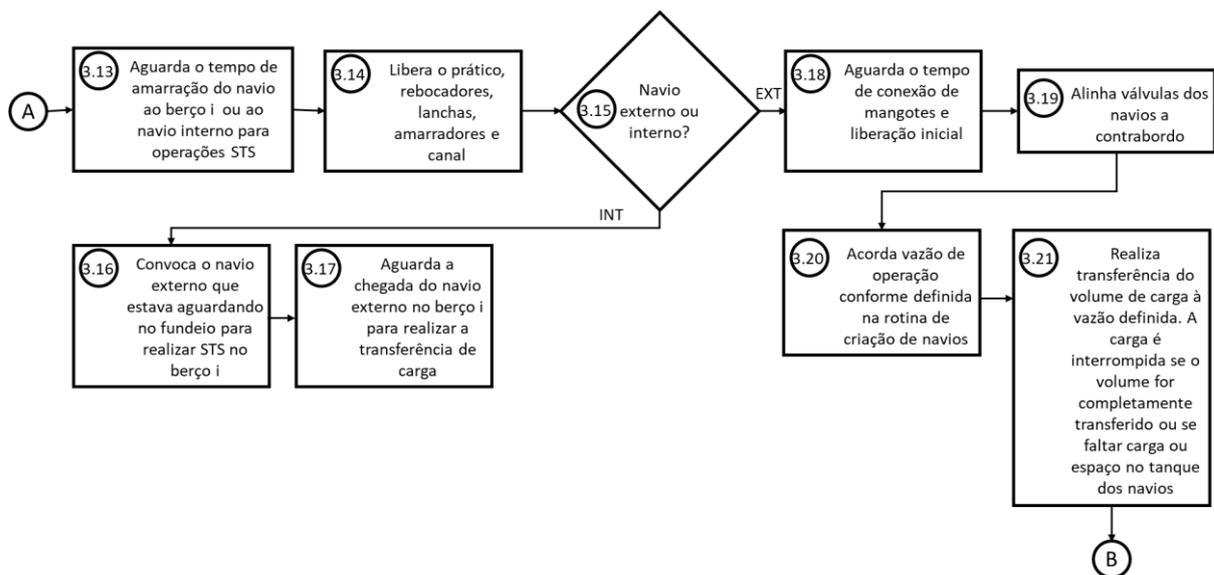


Figura 17 - Fluxograma atendimento de navios nos berços (parte 2)

Na sequência, a entidade chega a uma porta condicional (3.15), na qual é verificada a sua posição no STS. Os navios internos são direcionados ao nó 3.16, a partir do qual emitem um sinal para convocação do correspondente navio externo que estava aguardando no fundeio (nó 1.21) para realizar o STS no berço “i”. Essa etapa é programada no Arena® por meio do módulo *Remove*. Após isso, o navio interno aguarda (módulo *Hold*, tipo *Infinite Hold*) no nó 3.17 a chegada do navio externo no berço para realizar a transferência de carga.

O navio externo convocado passará, de maneira análoga à feita pelo navio interno, pela lógica de verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do fundeio ao berço e atendimento de navios até o nó 3.15. A partir desse ponto, o tempo de conexão de mangotes e liberação inicial é contabilizado (3.18), as válvulas dos manifolds dos navios são alinhadas (3.19), a vazão de operação é acordada (3.20) e a transferência da carga é executada (3.21). Novamente, a transferência é interrompida se o volume de carga for completamente transferido ou se faltar carga ou espaço nos tanques dos navios.

Após a transferência de carga entre navios, a válvulas são fechada e liberadas (3.22, Figura 18), o volume movimentado e a vazão média são registrados, o tempo de desconexão e liberação final (3.24) contabilizado.

Na sequência (3.25), é contabilizado o tempo de desamarração do navio externo, o qual segue (3.12) para a rotina de verificação das restrições e busca de recursos para saída do porto a partir do berço. O navio interno permanece amarrado até que seja emitido um sinal pela saída do navio externo do porto.

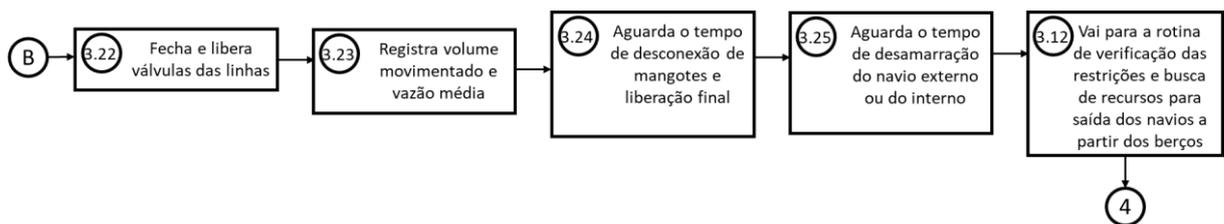


Figura 18 - Fluxograma atendimento de navios nos berços (parte 3)

3.3.1.4 Verificação das restrições e busca de recursos para deslocamento do navio do berço à saída

A lógica da sub-rotina de verificação de restrições e busca de recursos para deslocamento do berço à saída se encontra detalhada no fluxograma que consta na Figura 19.

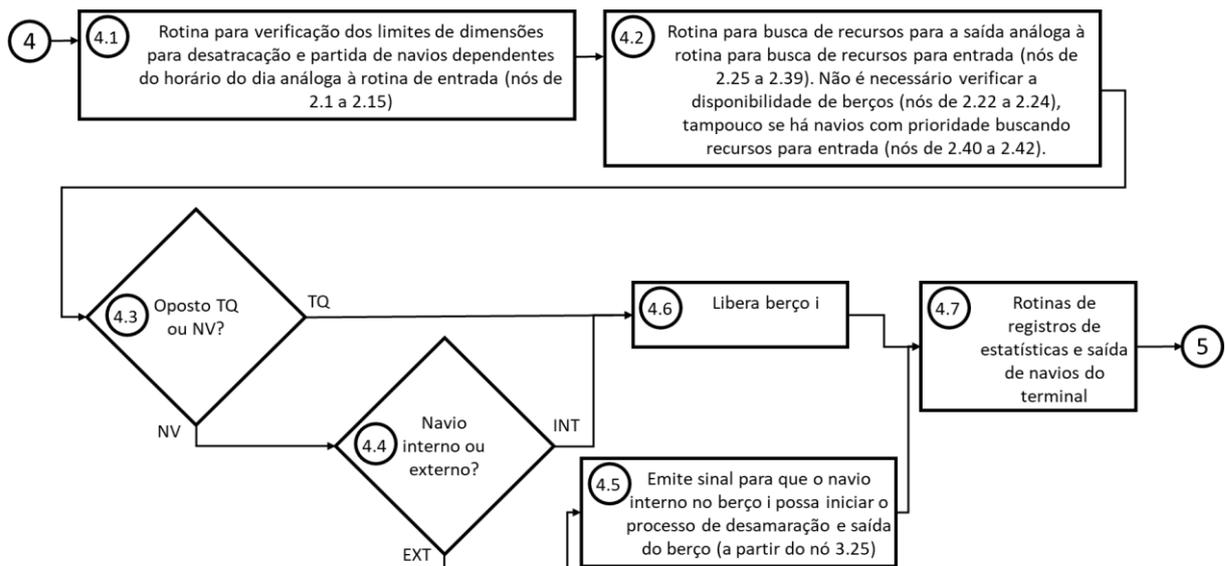


Figura 19 - Fluxograma verificação das restrições e busca de recursos para deslocamento do navio do berço à saída

Basicamente, esse submodelo consta de uma rotina (4.1) para verificação dos limites de dimensões para desatracação e partida de navios dependentes do horário do dia análoga à rotina de entrada (nós de 2.1 a 2.15), somada a uma rotina (4.2) para busca de recursos para a saída análoga à rotina para busca de recursos para entrada (nós de 2.25 a 2.39). Neste caso, não é necessário verificar a disponibilidade de berços (nós de 2.22 a 2.24), tampouco se há navios com prioridade buscando recursos para entrada (nós de 2.40 a 2.42).

Na sequência a entidade passa por uma porta condicional (4.3) em que os navios com oposto TQ são segregados dos navios com oposto NV. Os navios com oposto TQ seguem para o nó 4.6, em que o recurso berço em que operaram é liberado (módulo *Release*), de modo a permitir sua utilização por nova entidade.

Os navios com oposto NV são ainda segregados entre navio externo e interno (4.4), de modo que o navio externo não libera o berço, pois o navio interno ainda estará lá amarrado. Assim, o navio externo primeiro passa no nó 4.5, no qual emite um sinal (módulo *Remove*) para que o navio interno no berço em que operou possa iniciar o processo de desamarração e saída do berço (a partir do nó 3.25). Por sua vez, os navios internos ao passarem pelo nó 4.4 são direcionados para o nó 4.6, no qual finalmente liberam o berço em a operação STS foi realizada.

Por fim, todos os navios se dirigem (4.7) às rotinas de registros de estatísticas e saída de navios do terminal.

3.3.1.5 Registro de estatísticas e saída de navios

A lógica da sub-rotina de registro de estatísticas e saída se encontra detalhada no fluxograma que consta na Figura 20.

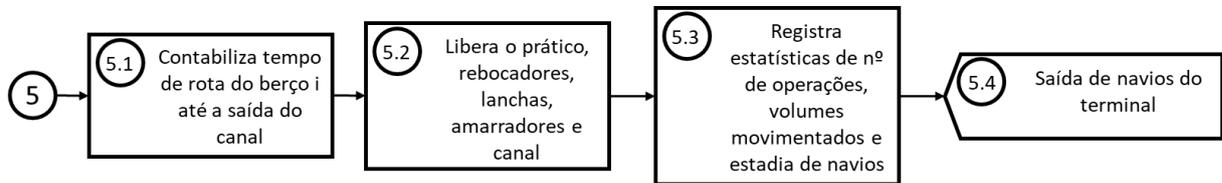


Figura 20 - Fluxograma registro de estatísticas e saída de navios

Esse submodelo se inicia com o nó 5.1, no qual é contabilizado o tempo de deslocamento (módulo *Route*) do navio do berço em que operou até a saída do canal do porto. Esse tempo é uma variável aleatória cuja distribuição estatística foi levantada na análise do sistema analisado no estudo de caso realizado.

No nó 5.2, representativo do final do canal, a entidade libera (módulo *Release*) o práctico, rebocadores, lanchas, amarradores e canal. Na sequência (5.3), são registradas as estatísticas de número de operações e volumes movimentados em cada berço, além do tempo estadia total do navio no terminal. Por fim, as entidades seguem para a saída do terminal (5.4), programada no Arena® por meio de um módulo *Dispose*.

3.3.1.6 Submodelos auxiliares

Além dos blocos que compõem o fluxo macro principal, o modelo contém submodelos auxiliares (Figura 21) que realizam rotinas independentes para: definição do horário do dia e intensidade de vento (1A); consumo, produção e distribuição de petróleo entre tanques de terra (2A); monitoramento do nível de tanques de armazenamento e convocação de navios em emergência quando o estoque atinge o ponto de convocação (3A); o registro diário do estoque de produtos nos tanques e número de navios no terminal (4A); e escrita na planilha de dados de saída (5A).

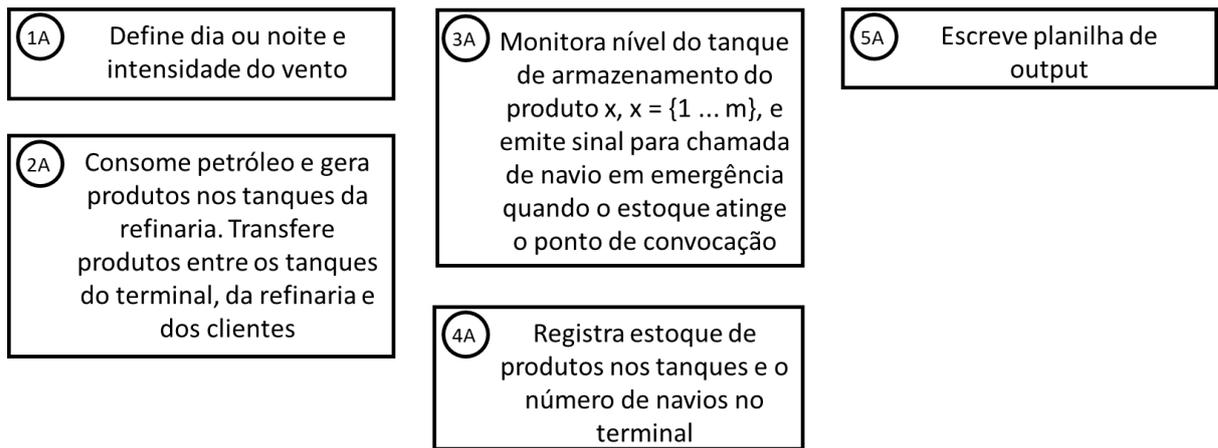


Figura 21 - Submodelos auxiliares

3.3.1.6.1 Submodelo para definição dia ou noite e intensidade do vento

O submodelo para definição do horário do dia e da intensidade do vento (Figura 22), pode ser dividido em duas sub-rotinas, uma que define se está dia ou noite e outra que define se o vento está abaixo ou acima do limite para amarração de navios aos berços do terminal.

A sub-rotina para definição do horário do dia se inicia com a criação (módulo *Create*) de uma entidade auxiliar (1A.1) no início de cada réplica da simulação, cuja a função é executar a lógica que resultará na definição do valor da variável binária “luz” que assume o valor 0 quando está noite e 1 quando está dia.

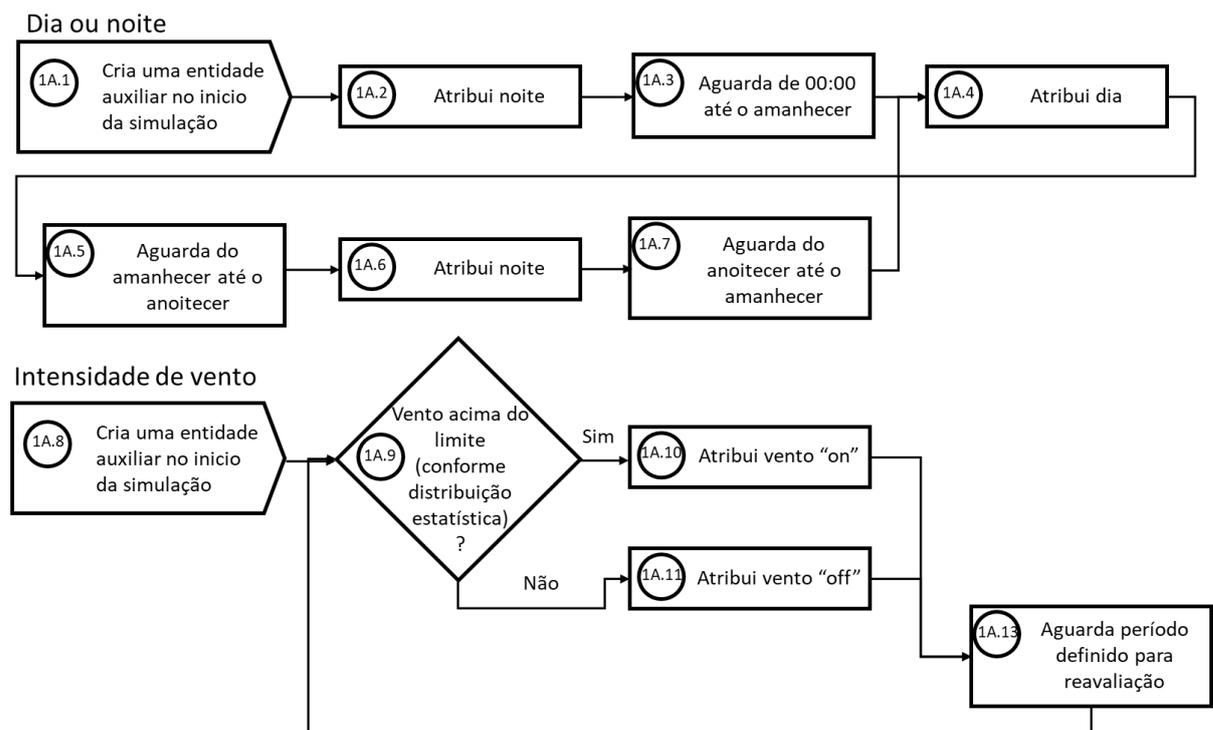


Figura 22 - Fluxograma definição dia ou noite e intensidade do vento

Assim, no nó 1A.2 é atribuído (módulo *Assign*) um valor de 0 para a variável “luz”, indicativo de horário noturno. Na sequência (1A.2), a entidade aguarda (módulo *Delay*) o período de tempo médio entre às 00:00 h e o amanhecer. Em seguida (1A.3), o valor de 1 é atribuído para a variável “luz”, indicando horário diurno. A entidade aguarda (1A.5) então o período entre o amanhecer e o anoitecer e segue para o nó seguinte (1A.6), no qual é atribuído novamente o valor de 0 para a variável “luz”. Por fim, a entidade aguarda (1A.7) o período do anoitecer até o amanhecer, retornando para nó 1A.4, no qual é atribuído o valor 1 à variável “luz”, indicando o início de mais um horário diurno. O ciclo descrito se repete ao longo de toda a simulação.

A sub-rotina para definição da intensidade do vento é estruturada de forma semelhante. O fluxo se inicia com a criação de uma entidade auxiliar (1A.8) no início de cada réplica da simulação, cuja a função é executar a lógica que resultará na definição do valor da variável binária “vento” que assume o valor 0, quando a intensidade do vento está abaixo do limite para amarração de navios aos berços do terminal, e 1, quando a intensidade do vento está acima do limite.

O nó 1A.9 se constitui uma porta condicional que distribui probabilisticamente (módulo *Decide*, tipo *2-way by chance*) a entidade auxiliar para um de dois caminhos possíveis. A cada passagem no nó 1A.9, a entidade tem determinada probabilidade de ser direcionada para o nó 1A.10, no qual o valor de 1 é atribuído para a variável “vento”, indicando intensidade de vento acima do limite, ou para o nó 1A.11, no qual o valor de 0 é atribuído para a variável “vento”, indicando intensidade de vento abaixo do limite. Por exemplo, caso estatisticamente seja avaliado que 98% do tempo as condições de vento fiquem abaixo do limite do terminal, somente em aproximadamente 2% das vezes em que a entidade passar no nó 1A.9 ela será direcionada para o nó 1A.10.

Após a atribuição do valor da variável indicativa da intensidade de vento, a entidade auxiliar segue para o nó 1A.13, no qual aguarda (módulo *Delay*) o período estipulado para reavaliação das condições de vento. Esse período tem relação com o tempo médio em que as condições climáticas mudam no local em que se encontra o sistema estudado. Assim, após aguardar o período de reavaliação, a entidade retorna para o nó 1A.9 e o ciclo se reinicia, se repetindo ao longo de toda a simulação.

3.3.1.6.2 Submodelo para consumo, produção e transferência de produtos dentro e entre os tanques de terra

O submodelo para consumo, produção e transferência de produtos dentro e entre os tanques de terra (Figura 23) visa representar o consumo de petróleo e a geração de produtos nos tanques da refinaria, além da transferência de produtos entre os tanques do terminal, da refinaria e dos clientes.

Esse submodelo, também se inicia pela criação de uma entidade auxiliar (2A.1) no começo de cada réplica da simulação. No nó 2A.2, a entidade auxiliar recebe como atributo (módulo *Assign*) o volume diário de produto a ser inserido (produção) ou retirado (consumo) do tanque “x” ou a ser transferido do tanque “x” ao tanque “y” (movimentação entre tanques). Se o refino estiver parado devido à falta de insumo ou espaço para armazenamento da produção, o volume atribuído para produção e consumo nos tanques da refinaria é igual a zero.

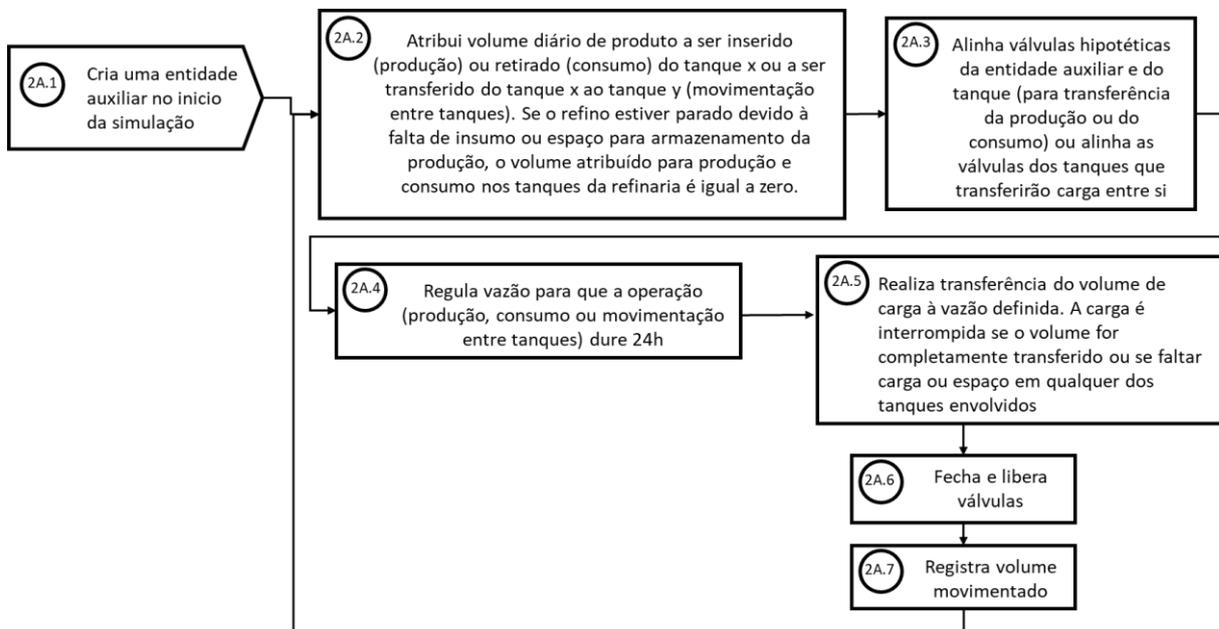


Figura 23 - Fluxograma consumo, produção e transferência de produtos dentro e entre os tanques de terra

Na sequência (2A.3), as válvulas hipotéticas da entidade auxiliar e do tanque (para transferência da produção ou do consumo) ou as válvulas dos tanques que transferirão carga entre si são alinhadas (módulo *Seize Regulator*). A entidade passa ao nó 2A.4, no qual a vazão é regulada para que a operação (produção, consumo ou movimentação entre tanques) dure exatamente 24 h.

No nó 2A.5, é realizada a transferência do volume de carga à vazão definida. A carga é interrompida se o volume for completamente transferido ou se faltar carga ou espaço em qualquer dos tanques envolvidos. Por fim, as válvulas são fechadas e liberadas (2A.6, módulo *Release Regulator*) e o volume movimentado é registrado (2A.7, módulo *Record*).

O fluxo apresentado foi implementado para representação da produção, consumo ou transferência de cada produto nos tanques existente do sistema estudado. Todo o ciclo se repete a cada 24 h de simulação, representando a produção, o consumo e a movimentação entre tanques diária.

3.3.1.6.3 Submodelo para monitoramento do nível de estoque de produtos

No submodelo para monitoramento do nível de estoque de produtos, o nível do tanque de armazenamento de cada produto de interesse é monitorado. Quando o estoque atinge o ponto de convocação, um sinal é emitido para chamada de navio em emergência, conforme já descrito no item 3.3.1.1.

Além disso, quando não há mais petróleo para ser consumido nos tanques da refinaria ou não há mais espaço em tanques para armazenamento dos derivados produzidos, a variável que controla o refino é atualizada e este é parado. Após o abastecimento ou alívio dos tanques motivadores da parada, a produção da refinaria é retomada. O número e a duração de cada parada de refino são contabilizados.

Lógica análoga foi implementada para o fornecimento de produtos aos clientes pela refinaria. Quando a quantidade de produto na refinaria não é suficiente para atendimento da demanda, a entrega ao mercado é interrompida. A entrega é retomada quando o estoque do produto em falta atinge nível suficiente para garantir o abastecimento dos clientes. O número e a duração de cada parada de abastecimento ao mercado também são contabilizados.

3.3.1.6.4 Submodelo para registro do estoque de produtos nos tanques e do número de navios no terminal

O propósito do submodelo para registro do estoque de produtos nos tanques e do número de navios no terminal (Figura 24) é tirar uma fotografia diária do sistema, de modo a registrar a quantidade de cada produto em estoque nos tanques do terminal, da refinaria, dos navios fundeados e operando no berço, além do número de navios no terminal. Esse registro é utilizado para contabilização do estoque médio de cada produto no sistema.

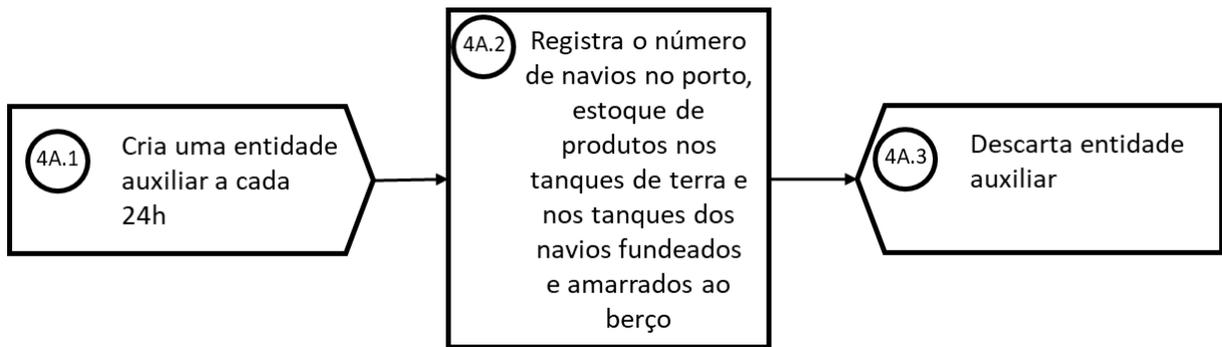


Figura 24 - Fluxograma registro do estoque de produtos nos tanques e do número de navios no terminal

A estrutura desse submodelo é bem simples, sendo constituída de um nó para criação a cada 24 h de uma entidade auxiliar (4A.1); um nó para registro do número de navios no porto, estoque de produtos nos tanques de terra e nos tanques dos navios fundeados e amarrados ao berço (4A.2); e um nó para descarte da entidade auxiliar criada (4A.3).

3.3.1.6.5 Submodelo para escrita da planilha de output

O submodelo para escrita da planilha de output (Figura 25), tem como objetivo registrar em um arquivo de saída os parâmetros de interesse para o cálculo dos indicadores de desempenho do sistema.

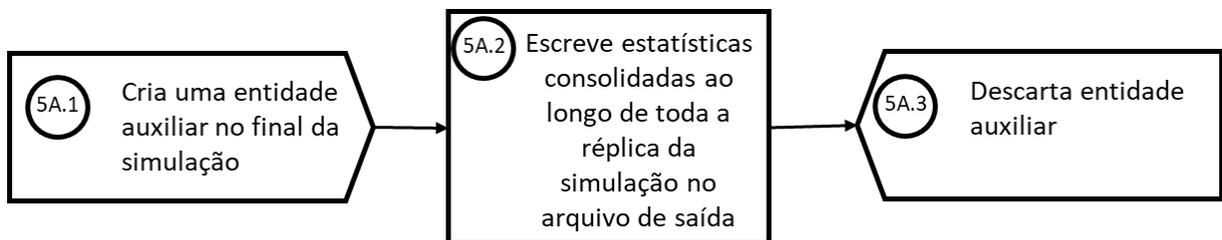


Figura 25 - Fluxograma escreve planilha de output

A estrutura desse submodelo é bem simples, sendo constituída de um nó para criação de uma entidade auxiliar no final da simulação (5A.1), um nó para registro dos parâmetros de interesse no arquivo de saída (5A.2) e um nó para descarte da entidade auxiliar criada (5A.3). Os indicadores de desempenho utilizados na análise realizada se encontram descritos no item 3.6.

3.4 Verificação e validação

De acordo Balci (1998), o processo de **verificação** (6) do modelo consiste em “confirmar que o modelo é transformado de um estado em outro, como pretendido, com precisão suficiente” (tradução nossa). A precisão de converter a representação de modelo (fluxograma) em um programa de computador executável é avaliada na verificação do modelo.

Por sua vez, a **validação** (7) “é a determinação de que o modelo conceitual é uma representação precisa do sistema real” (BANKS, 1998, p. 17). Balci (1998) apresenta 85 técnicas diferentes para realização dos processos de verificação e validação de um modelo de simulação.

Para a verificação do modelo de simulação desenvolvido foi utilizada a técnica de **Depuração (Debugging)**, a qual consiste em “um processo iterativo cuja finalidade é descobrir erros ou equívocos que causam a falha do modelo, além de definir e executar as alterações do modelo que corrigem os erros” (BALCI, 1998, p. 366, tradução nossa).

Este processo iterativo consiste em quatro etapas. Na etapa 1, o modelo é testado, revelando a existência de erros (*bugs*). A causa de cada erro detectado é determinada na etapa 2. Na etapa 3, as alterações do modelo que se acredita serem necessárias para corrigir os erros detectados são identificadas. As alterações do modelo identificadas são realizadas na etapa 4. A etapa 1 é executada novamente logo após a etapa 4 para garantir que a modificação foi bem-sucedida, pois uma alteração que corrige um erro pode criar outro. Este processo iterativo continua até que nenhum erro seja identificado na etapa 1 após realizados testes suficientes.

Para isso foi utilizada a ferramenta de depuração do Arena®, com a inserção de *break points* em nós críticos, avaliando a cada passo se a transformação do modelo ocorreria conforme o esperado.

Por sua vez, para a validação do modelo, foi utilizada inicialmente a técnica de *Face Validation*, na qual os usuários potenciais do modelo desenvolvido e profissionais com conhecimento sobre o sistema em estudo, com base em suas estimativas e intuição, compararam subjetivamente comportamentos de modelo e do sistema sob condições de entrada idênticas, de modo a julgar se o modelo e seus resultados são razoáveis.

Adicionalmente, em estágios mais avançados do desenvolvimento, o modelo foi submetido a um Teste de Turing, o qual também é baseado no conhecimento de especialistas sobre o sistema em estudo. Os especialistas foram apresentados com dois conjuntos de dados de saída obtidos, um do modelo e um do sistema, sob as mesmas condições de entrada. Sem identificar qual era qual, os especialistas consultados foram convidados a diferenciar entre os dois. Como não puderam diferenciá-los, a confiança na validade do modelo foi aumentada.

Por fim, os indicadores do modelo e do sistema real de número de total de operações realizada (N_{OP}) e volume total movimentado (V_T) por berço, para o mesmo conjunto condições de entrada foram comparados graficamente e a diferença relativa calculada. Os resultados dessa comparação para o estudo de caso realizado podem ser vistos no item 4.2.

3.5 Projeto dos experimentos

A etapa de **projeto dos experimentos** (8) consiste em definir para cada cenário da matriz de simulação (vide item 4.3) a duração de cada corrida, o período de aquecimento e o número de replicações.

De modo a contemplar todas as sazonalidades da operação do sistema em análise, foi definido que cada corrida deveria ter duração de 1 ano. Além de contemplar todas as estações de ano, esse período é o utilizado pela operadora do sistema em análise para o fechamento dos indicadores de desempenho e avaliação dos resultados de ações a nível de planejamento tático.

O período de aquecimento é o intervalo de tempo a partir do início da corrida de simulação durante o qual não são coletados dados de saída do modelo, com objetivo de desprezar resultados não-representativos do regime estacionário do sistema.

Para definição do período de aquecimento foi realizada uma análise de sensibilidade dos resultados da simulação. Nesta análise, o período de aquecimento foi variado de 0 a 90 dias, em intervalos de 10 dias, de modo a verificar a variação do indicador custo logístico total anual médio por volume movimentado (CL), vide item 3.6, no primeiro cenário de simulação, o qual é representativo das condições do sistema no momento do estudo.

Como esperado, a variação do CL entre simulações decresce com o aumento do período de aquecimento. Entre os 80 e 90 dias de período de aquecimento a variação do CL foi inferior a 1%, podendo ser considerado nesse caso que as estatísticas estavam sendo coletadas do modelo de simulação já para o período estacionário do sistema. Assim, foi selecionado um período de aquecimento de 90 dias ou 2160 h para a execução de todos os cenários de simulação.

Por fim, para a definição do número de replicações foi realizada nova análise de sensibilidade do indicador CL calculado para o primeiro cenário de simulação. Neste caso, foram realizadas de 1 a 20 réplicas de corridas de simulação, em intervalos de 1 réplica cada. A média do indicador CL foi então calculada considerando de 1 a 20 réplicas e, posteriormente, a variação entre as médias foi avaliada.

Assim, a variação entre linhas da média do CL decresce com o aumento do número de réplicas (Figura 26), ficando abaixo de 1% a partir da consideração de 11 réplicas. Como cada rodada do modelo de simulação programado estava sendo realizada rapidamente, optou-se por realizar 20 réplicas de cada cenário simulação.

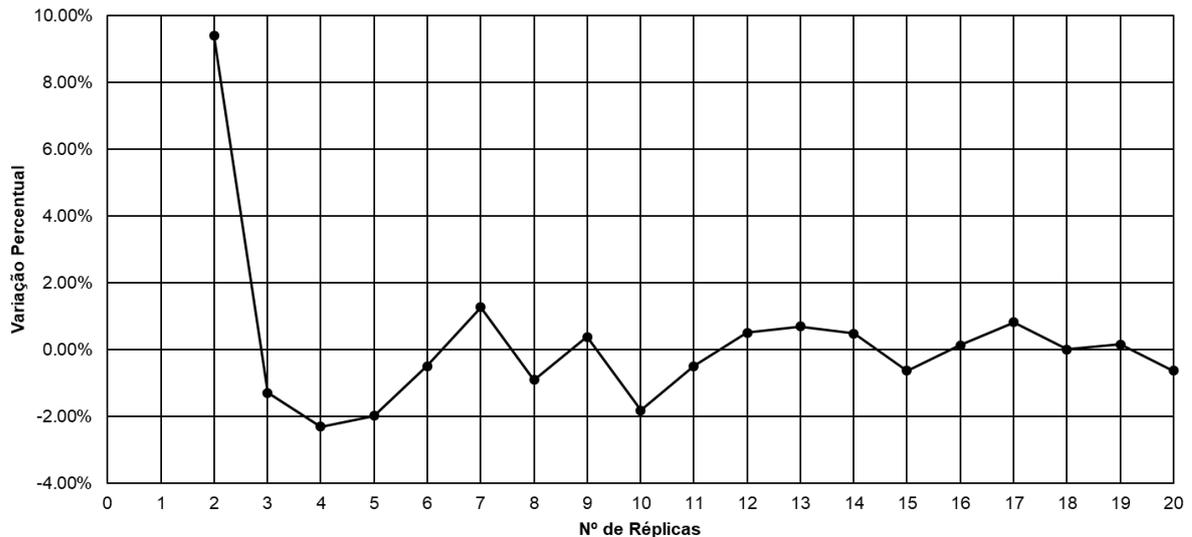


Figura 26 - Análise de convergência do Custo Logístico por volume movimentado (CL)

Após definido o número de réplicas, a análise de sensibilidade em relação ao período de aquecimento foi realizada novamente, tendo sido verificado que a variação entre resultados se manteve baixa entre os 80 e 90 dias, tendo sido mantida a escolha de 90 dias para o período de aquecimento.

Os parâmetros definidos para o projeto dos experimentos conduzidos se encontram resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de simulação adotados na etapa de projeto dos experimentos

| Parâmetro | Valor Adotado |
|----------------------|------------------------|
| Duração das corridas | 365 dias + aquecimento |
| Número de réplicas | 20 |
| Tempo de aquecimento | 90 dias |

3.6 Execução e análise

A etapa de **execução e análise** (9) consiste em rodar cada cenário previsto na matriz de simulação e posteriormente analisar os resultados com base nos **indicadores de desempenho** definidos, os quais se encontram descritos a seguir:

- N_{OP} = Número de operações total no terminal por ano;
- V_T = Volume movimentado total no terminal por ano dos produtos sob foco (diesel e petróleo);
- FUT = Fator de Utilização dos recursos, que explicita o percentual do tempo em que o recurso foi utilizado dentro do período em que se encontrava disponível para utilização. Esse indicador pode ser obtido pela fórmula: Tempo do recurso em utilização/Tempo do recurso disponível;

- NS = Nível de Serviço Logístico, o qual explicita o percentual da demanda de movimentação dos produtos sob foco atendida pelo terminal. Fórmula: Volume de produto demandado para envio ou recebimento/Volume entregue;
- TT_{NT} = Tempo total médio que um navio de determinada classe passa no porto, desde a emissão do sua NOR até a sua partida. Um parâmetro de referência da indústria é que TT_{NT} não deve ser superior à 36 h, para uma descarga ou carga completa do navio. Para uma carga parcial vale a fórmula $(Carga\ Movimentada/Capacidade\ de\ Carga\ Total)*24 + 12$;
- $TEXC_{NT}$ = Tempo de Excesso de Estadia do navio no terminal. Algumas possíveis fontes de espera incluem: condição de vento, restrições para atracação noturna, falta de espaço ou produto em tanques, indisponibilidade de berço, de rebocadores, de práticos, lanchas de amarração, amarradores e canal. Fórmula: $TT_{NT} - ((Carga\ Movimentada/Capacidade\ de\ Carga\ Total)*24 + 12)$;
- C_{ATRAC} = Custo anual de atracação por volume movimentado. Relacionado aos custos portuários com praticagem e rebocadores;
- C_{MREF} = Custo anual de perda de margem de refino por volume movimentado. Custo que tem relação com o percentual do tempo em que a refinaria ficou sem operar devido à falta de algum dos insumos de produção ou de espaço em tanques para armazenamento dos produtos refinados;
- C_{MSUP} = Custo anual de mudança de polo de suprimento por volume movimentado, oriundo de um desatendimento ao mercado. Caso o sistema terminal-refinaria não consiga prover a quantidade de produto (diesel) contratada, os clientes têm que deslocar sua frota de caminhões para abastecimento em outro polo. Esse custo adicional de frete rodoviário e consumo de combustível tem que ser reembolsado aos clientes;
- C_{EST} = Custo anual por volume movimentado de capital imobilizado em estoque de produtos nos tanques do terminal e da refinaria;
- C_{EXC} = Custo anual por volume movimentado de excesso de estadia, que faz referência ao custo adicional com diárias de navios esperando no porto no período de excesso de estadia.
- CL = Custo logístico total anual por volume movimentado, que é a soma dos custos de atracação, perda de margem de refino, mudança do polo de suprimento, capital

imobilizado em estoque e excesso de estadia. Por agregar todos os indicadores anteriores, o CL é o principal indicador de desempenho utilizado.

A descrição do resultado da etapa de execução e análise para o estudo de caso realizado pode ser vista no item 4.3.

3.7 Avaliação da necessidade de rodadas adicionais

Esta etapa consiste em realizar a **avaliação da necessidade de rodadas adicionais** (9) de forma a analisar algum cenário adicional que possa ter sido identificado como sendo de interesse após a análise de cenários já executados.

No estudo realizado foram feitas algumas iterações até que fosse definida a matriz de simulação final, a qual contempla todos os cenários de interesse identificados.

3.8 Apresentação dos resultados

Neste processo, “os resultados da simulação são interpretados e apresentados aos tomadores de decisão para sua aceitação e implementação” (BALCI, 1998, p. 344, tradução nossa). No presente trabalho, os resultados do estudo de caso realizado são encontrados no item 4.3.

Como todos os modelos de simulação são descritivos e não prescritivos, decidir sobre a implementação de uma solução para o problema formulado requer a análise e a interpretação rigorosa dos resultados apresentados.

3.9 Implementação das soluções

Balci (1998, p. 335) define um estudo de simulação bem-sucedido “como aquele que produz uma solução suficientemente confiável que é aceita e utilizada pelos tomadores de decisão” (tradução nossa). As conclusões e recomendações de um estudo de simulação bem-sucedido tem grandes chances de serem postas em prática na etapa de **implementação das soluções** (12), a qual se encontra fora do escopo do presente trabalho.

4 ESTUDO DE CASO

O modelo de simulação de eventos discretos descrito no capítulo 3 foi aplicado em um estudo de caso para análise logística de um sistema existente, composto por um terminal marítimo de petróleo, uma refinaria e seus clientes.

O terminal analisado é composto por 8 berços distintos, numerados de 1 a 8. Além das operações convencionais com os tanques em terra, nos berços de 5 a 8 os navios também realizam *Ship to Ship*.

No referido sistema são movimentados diferentes tipos de produtos que podem ser agrupados em 10 classes: diesel, etanol, gasolina, gás liquefeito de petróleo (GLP), nafta, paraxileno (PXL), petróleo, querosene de aviação (QAV), água oleosa e óleo combustível (OC). Os diferentes fluxos de produtos entre os componentes do sistema (Figura 27) foram considerados no estudo.

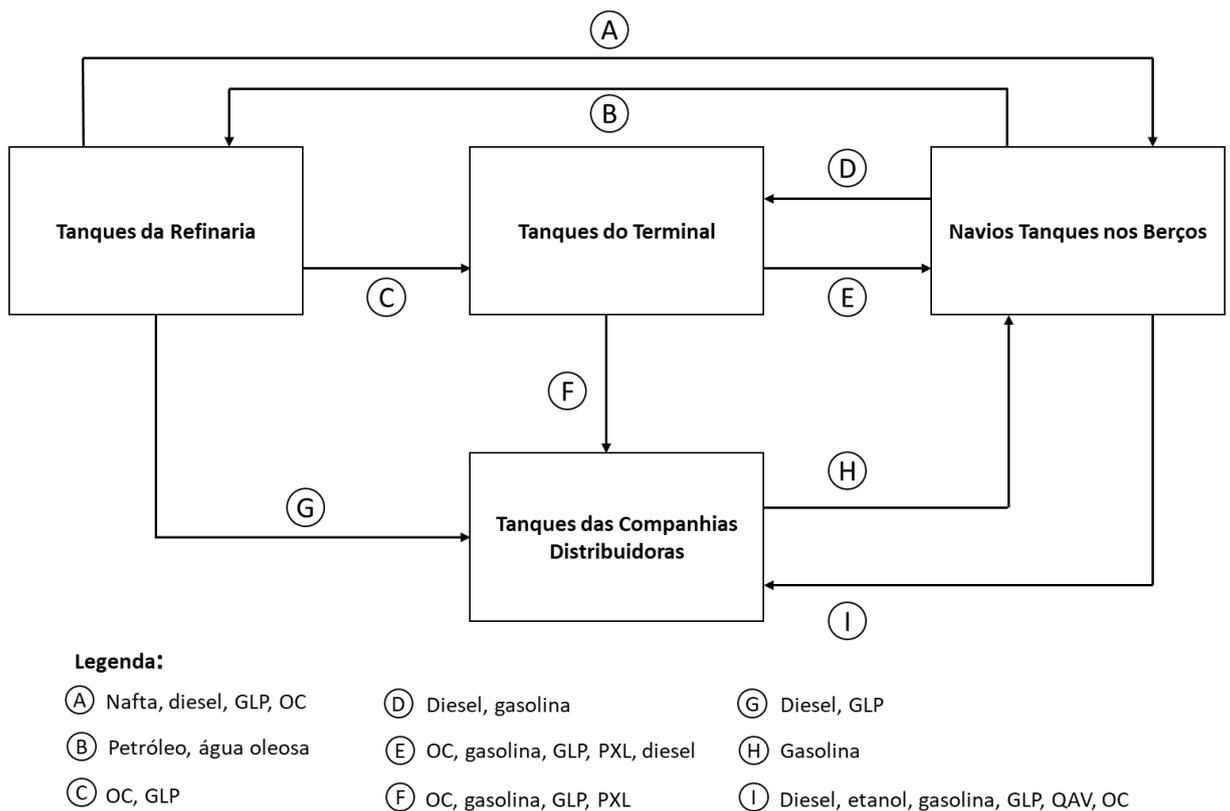


Figura 27 - Fluxo de produtos entre os componentes do sistema modelado

Por meio dos berços do terminal, a refinaria recebe petróleo e água oleosa, a qual, por sua vez, envia nafta, diesel, GLP e OC para os navios. A refinaria também envia OC e GLP para o terminal, que, por sua vez, recebe diesel e gasolina dos navios nos berços e envia OC, gasolina, GLP, paraxileno (PXL) e diesel para esses.

O terminal abastece as companhias distribuidoras (clientes) de OC, gasolina, GLP e PXL, as quais também recebem da refinaria diesel e GLP. Por fim, as companhias distribuidoras recebem dos berços diesel, etanol, gasolina, GLP, QAV e OC, e enviam gasolina em algumas ocasiões.

Dentre os diferentes fluxos apresentados, optou-se por focar a análise no fluxo do petróleo e do diesel, de modo que os indicadores de desempenho do sistema (vide item 3.6) foram calculados considerando apenas esses dois produtos, conforme já descrito anteriormente na apresentação das premissas e simplificações do modelo (3.3).

4.1 Coleta e tratamento de dados

Os dados do sistema real, representativos das variáveis de entrada (vide item 3.3) para o cenário base, foram conseguidos com a empresa operadora do terminal e da refinaria. Para cada classe de produto, foi levantada a massa específica média, utilizada no modelo para o cálculo do peso do volume de carga atribuído a cada navio.

O terminal conta com uma frota de 4 rebocadores e 2 lanchas de amarração, cujas atuações são coordenadas pelo práctico na faina de atracação. A passagem dos cabos nos berços é realizada por uma equipe de 4 amarradores cada e o terminal possui 16 amarradores disponíveis por turno.

Os limites máximos de dimensões de navios para cada berço (Tabela 2) foram obtidos por meio da análise das Normas da Autoridade Portuária Local. Conforme pode ser visto, em alguns berços, o limite de comprimento máximo para atracação noturna é mais restritivo que o para atracação diurna. Isso ocorre tanto para operações com um navio no berço, como para as operações STS. Além disso, o limite de porte bruto operacional (TPB) para a operações STS é equivalente a soma do TPB dos dois navios envolvidos na operação.

Tabela 2 - Limites máximos de dimensões de navios

| Locais | | Atracação Comprimento (LOA) Máximo (m) | | Desatracação Comprimento (LOA) Máximo (m) | | Porte Bruto Operacional (TPB) |
|-----------------|---|--|---------|---|---------|-------------------------------------|
| | | Diurno | Noturno | Diurno | Noturno | |
| Berços | 1 | 160,00 | 160,00 | 160,00 | 160,00 | 20.000 |
| | 2 | 280,00 | 280,00 | 280,00 | 280,00 | 80.000 |
| | 3 | 200,00 | 185,00 | 200,00 | 200,00 | 45.000 |
| | 4 | 200,00 | 185,00 | 200,00 | 200,00 | 45.000 |
| | 5 | 280,00 | 230,00 | 280,00 | 280,00 | 90.000 |
| | 6 | 280,00 | 230,00 | 280,00 | 280,00 | 90.000 |
| | 7 | 280,00 | 280,00 | 280,00 | 280,00 | 170.000 |
| | 8 | 300,00 | 280,00 | 300,00 | 280,00 | 170.000 |
| Berços (STS) | 5 | 280,00 | 135,00 | 280,00 | 230,00 | 90.000 |
| | 6 | 280,00 | 135,00 | 280,00 | 230,00 | 90.000 |
| | 7 | 280,00 | 135,00 | 280,00 | 230,00 | 170.000 |
| | 8 | 300,00 | 135,00 | 300,00 | 230,00 | 170.000 |

O terminal possui ainda uma restrição adicional relacionada ao tipo de cabos utilizado pelos navios para amarração. A atracação de navios dotados com cabos de aço não é permitida no horário noturno.

Os navios atendidos em cada berço foram divididos em 8 classes de LOA (de 0 a 135 m; de 135 a 160 m; de 160 a 185 m; de 185 a 200 m; de 200 a 230 m; de 230 a 260 m; de 260 a 280 m e de 280 a 300 m) e foram levantadas as estatísticas de percentual do número de navios atendidos em cada classe.

Adicionalmente, foi verificado que navios de maiores LOA tem maior probabilidade de serem dotados de cabos de aço. No sistema estudado, foi verificado que 50% dos navios com LOA menor ou igual a 200 m são dotados de cabos de aço. Esse percentual aumenta para 80% dos navios com LOA acima de 200 m.

A taxa de chegada média de navios para cada berço foi levantada com base nos dados de um ano de operação do terminal. Para cada berço foi levantado o percentual de navios que operam com os tanques em terra (oposto TQ) ou que realizam STS (oposto NV). Adicionalmente para os navios com oposto TQ, foi levantado o percentual de navios que

realizam operações de carga (CG) ou de descarga (DG). Em seguida, foi levantada a distribuição percentual do número de operações de cada classe de produto em cada berço, para as operações com oposto NV, TQ/CG ou TQ/DG.

Para as operações com oposto TQ, foi ainda levantado o percentual de operações com passagem direta dos produtos pelo terminal ou armazenamento nos seus tanques. Essa informação indica quantas operações de carga ou descarga de determinado produto, em determinado berço, são realizadas entre os tanques do terminal (TT) e os dos navios ou entre tanques da refinaria ou dos clientes (TC) e os dos navios. Na Figura 28, é mostrada, a título de exemplo do processo descrito, a sequência de distribuições percentuais levantadas relativas às operações no berço 7.

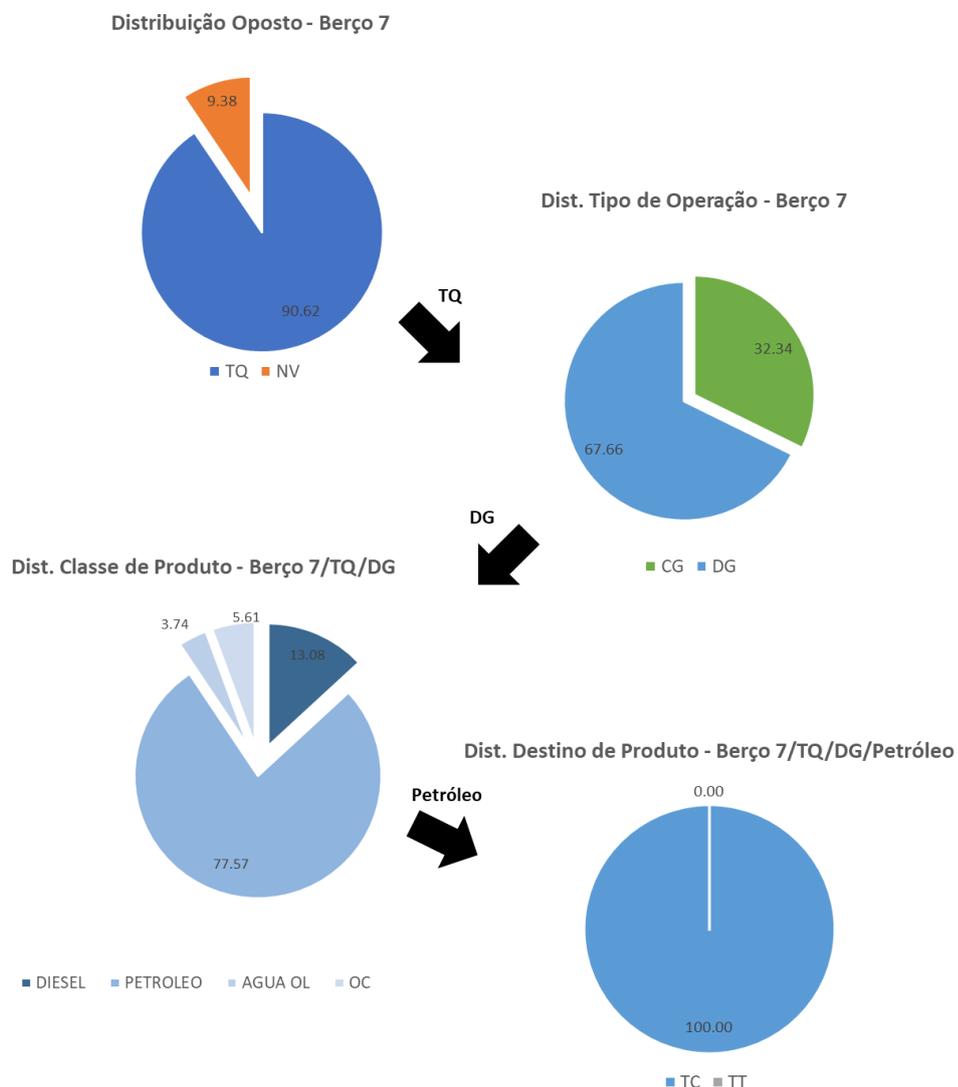


Figura 28 - Sequência de levantamento de distribuições percentuais para o berço 7

Como pode ser visto, no berço 7, 90.6% das operações são realizadas com os tanques de terra (oposto TQ), dentre estas 67.7% são operações de descarga de navio (DG). Dentre as

operações DG, 77.6% são de petróleo, sendo que 100% desse produto vai para os tanques da refinaria (TC).

As distribuições estatísticas relacionadas aos tempos para execução das atividades do navio no porto foram obtidas a partir de registros dos quatro últimos anos do terminal. Foram processadas, ao todo, 4059 linhas de dados e modo a levantar estatísticas para o tempo de navegação do fundeio ao berço, tempo de amarração, conexão de mangotes e liberação inicial, desconexão e liberação final, desamarração e navegação do berço à saída do canal.

O tempo de navegação é contabilizado desde a chegada do práctico a bordo, com o navio ainda na zona de fundeio, até passagem do primeiro cabo para amarração no berço. Na sequência, o tempo de amarração é contabilizado desde a passagem do primeiro cabo até a conclusão da amarração, com a passagem do último cabo.

O tempo de conexão e liberação é, então, contabilizado desde o instante do término na amarração até o início do bombeio. Por sua vez, o tempo de bombeio é resultado da divisão do volume transferido pela vazão de transferência de carga.

Após o bombeio, a operação entra na etapa de liberação final e desconexão de mangotes, a qual se encerra no início da desamarração, que abrange o período desde a retirada do primeiro ao último cabo. Por fim, é contabilizado o tempo de navegação do berço à saída do canal até o desembarque do práctico e liberação dos rebocadores.

Os dados coletados de cada um dos tempos descritos anteriormente, para cada um dos berços e segmentados entre operações com oposto TQ e NV, foram normalizados e tratados com auxílio do programa KNIME® para filtragem dos outliers. Dados cujos valores se situam fora do limite de 1,5 vezes a distância interquartil, a partir da extremidade dos quartis de dados, foram desconsiderados (Figura 29).

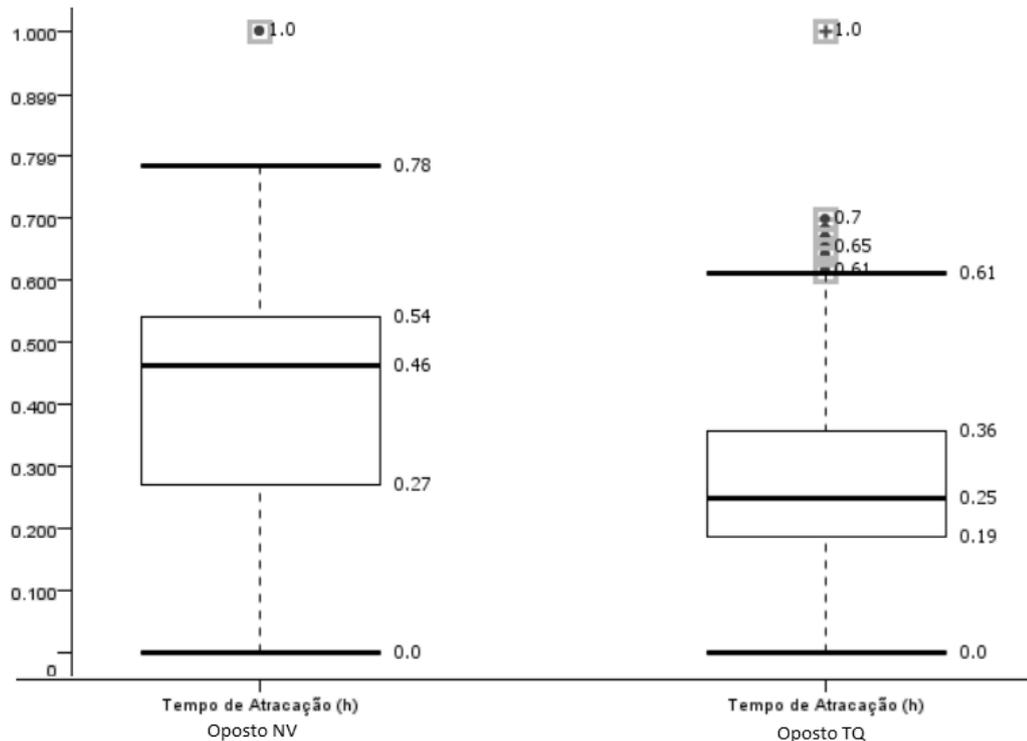


Figura 29 - Gráfico de caixa dos tempos de atracação no berço 7 normalizados para operações STS (oposto NV) e com os tanques em terra (oposto TQ). Os outliers filtrados se encontram marcados

As distribuições estatísticas que melhor ajustam os dados de tempo das atividades realizadas no terminal, após a filtragem dos outliers, foram obtidas com auxílio da ferramenta *Input Analyzer* do programa *Arena*®. A aderência das distribuições estatísticas, medida pelos testes do Chi-Quadrado e de Kolmogorov-Smirnov, cujo detalhamento é apresentado por Siegel (1956), é melhor ou pior conforme maior ou menor número de dados disponíveis. Assim, as distribuições representativas das atividades nos berços que recebem maior número de navios, e possuem mais dados disponíveis, tiveram melhor aderência (Figura 30).

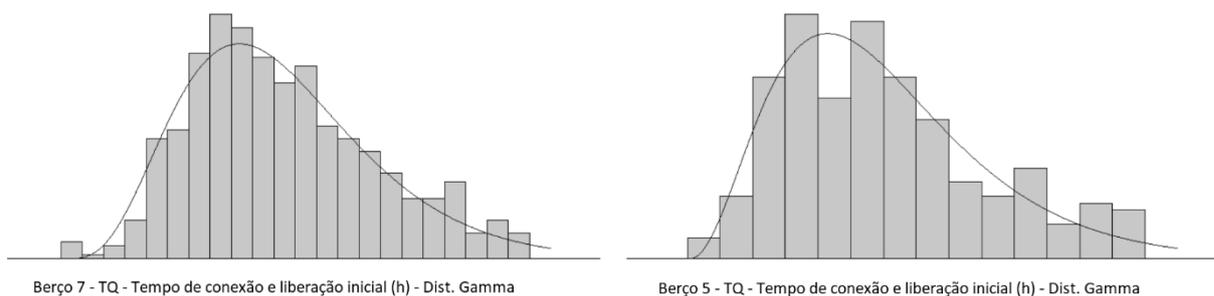


Figura 30 - Distribuições estatísticas ajustadas aos dados de tempos das atividades dos navios no porto. As distribuições dos berços com mais dados disponíveis tiveram melhor aderência

Os dados de volume de carga movimentado por cada navio, por berço, classe de produto, oposto (TQ ou NV) e tipo de operação (CG ou DG), coletados do sistema real, foram tratados para exclusão dos *outliers* de maneira semelhante ao descrito anteriormente para o tempo das atividades. No sistema real, esse parâmetro, representativo do lote de cada produto transportado

pelos navios, é definido pela programação de acordo com a demanda comercial recebida, variando pouco ao longo do horizonte de tempo do estudo (1 ano). Assim, para fins de simplificação, a variação aleatória desse parâmetro foi modelada como uma distribuição uniforme com limites entre 95% a 105% do valor da média amostral.

O mesmo processo descrito para o volume de carga foi realizado para os dados de vazão de transferência nas operações STS. Nesse caso, como as operações com oposto NV são menos frequentes que as operações TQ, optou-se por não segregar os dados em classes de produtos na análise estatística descrita.

A vazão para as operações TQ foi considerada de acordo com o limite máximo admitido em cada berço para operações de carga ou descarga de cada tipo de produto. Essa informação também foi obtida com a empresa operadora do terminal e a flutuação aleatória desse parâmetro foi modelada como uma distribuição uniforme com limites entre 95% a 105% do valor nominal informado.

Para o cálculo do tempo de excesso de estadia ($TEXC_{NT}$) do navio no terminal (vide item 3.6) é necessário conhecer, além do volume movimentado, a capacidade de carga total do navio com o qual foi feita a movimentação. Assim, no modelo de simulação, o valor dessa característica de cada navio foi adotado como a média amostral desse parâmetro, levantada estatisticamente a partir dos registros do terminal para os navios de cada classe de produto.

O volume médio de produção e demanda diária de cada produto da refinaria e dos clientes foi obtido junto à empresa operadora do sistema em estudo. Por fim, a distribuição estatística da ocorrência de ventos acima do limite de amarração de navios ao berço foi obtida por meio da análise do registro local de dados meteoceanográficos.

4.2 Validação do modelo

Conforme descrito no item 3.4, uma das etapas do processo de validação do modelo elaborado consistiu na comparação gráfica e cálculo da diferença relativa dos indicadores do modelo e do sistema real de número de total de operações (N_{OP}) e volume total movimentado (V_T) por berço, para o conjunto condições de entrada referentes ao cenário base.

No geral, as diferenças relativas entre os valores dos resultados do modelo e dos dados do sistema real (Tabela 3) ficaram dentro da faixa de $\pm 5\%$, o que foi julgado como tolerável. Para que fosse atingido esse nível de acurácia, foi realizado processo iterativo com ajustes no intervalo médio entre chegadas de navios para cada berço e na distribuição do volume de carga atribuído a cada navio.

Tabela 3 - Diferença relativa entre indicadores do modelo e do sistema real

| Berço | Nº Op. Total | V. Mov. Total | TQ | | Shio To Ship | |
|-------|--------------|---------------|--------|---------|--------------|---------|
| | | | Nº Op. | V. Mov. | Nº Op. | V. Mov. |
| 1 | -1,82% | -1,04% | -1,82% | -1,04% | - | - |
| 2 | 0,91% | 1,49% | 0,91% | 1,49% | - | - |
| 3 | -0,76% | -0,90% | -0,76% | -0,90% | - | - |
| 4 | 0,41% | 1,13% | 0,41% | 1,13% | - | - |
| 5 | -0,52% | -1,14% | -0,09% | -1,01% | -2,31% | -1,68% |
| 6 | 0,42% | 0,24% | -1,33% | -1,97% | 4,13% | 4,05% |
| 7 | 0,57% | 0,72% | 0,84% | 0,91% | -4,44% | -4,37% |
| 8 | 1,40% | 3,07% | 1,32% | 3,62% | 1,74% | 1,83% |

O volume movimentado e o número de operações de cada produto em cada berço também foram comparados no processo de validação do modelo. Foi dada especial atenção ao ajuste dos volumes e número de operações de diesel e petróleo, produtos nos quais o estudo de caso foi focado. Graficamente a comportamento do modelo aderiu bem aos registros do sistema real para o cenário base tanto para o número de navio atendidos (Figura 31) quanto para o volume movimentado (Figura 32). Os valores do eixo y dos gráficos apresentados foram normalizados para proteção da informação dos registros da empresa operadora do terminal.

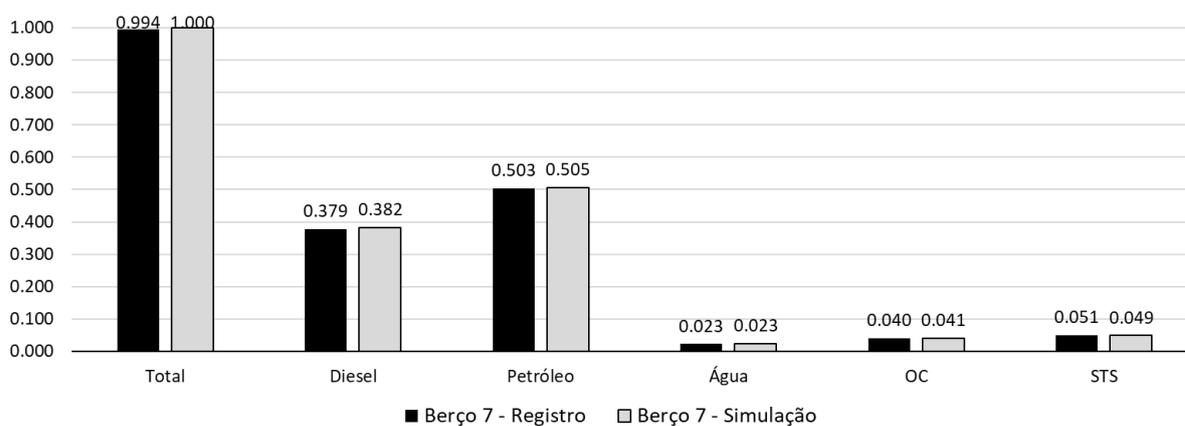


Figura 31 - Comparação entre o registro e resultado da simulação relativo ao Número de Operações no Berço 7 normalizado

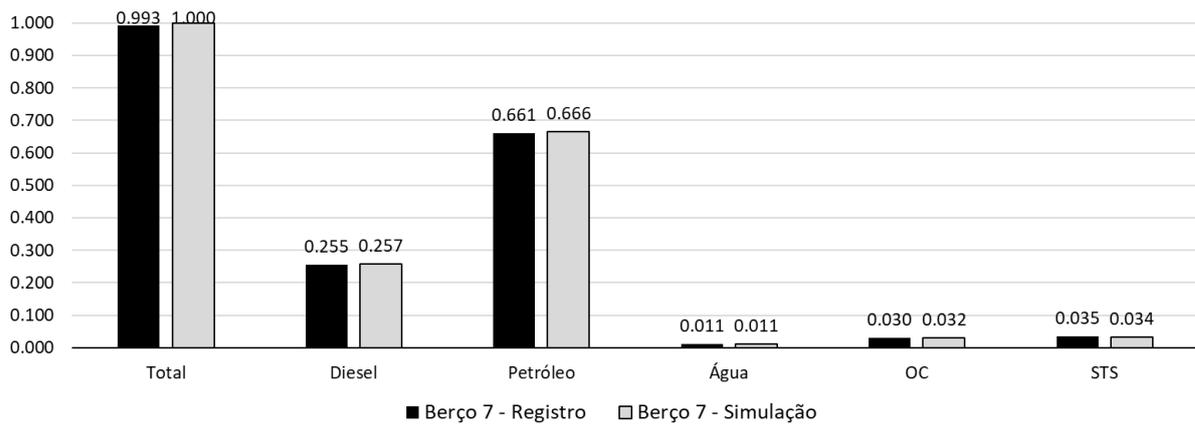


Figura 32 - Comparação entre o registro e o resultado da simulação relativo ao Volume Movimentado no Berço 7 normalizado

4.3 Cenários analisados e resultados

De posse de um modelo de simulação validado, é possível analisar diferentes cenários, com o objetivo de avaliar o impacto de mudanças nas características e nas restrições operacionais do sistema sobre os seus indicadores de desempenho. Além disso, é possível avaliar quais restrições operacionais têm maior ou menor impacto, de modo a identificar os gargalos logísticos presentes.

Assim, foi desenvolvida uma matriz de simulação (Tabela 4) composta de 20 cenários, nos quais as variáveis de entrada relacionadas à taxa de chegada de navios, número de rebocadores disponíveis, restrições para atracação noturna, vazão de operação e produção da refinaria são modificadas individualmente ou em conjunto, para avaliação posterior do respectivo impacto sobre os indicadores de desempenho do sistema.

Tabela 4 - Matriz de cenários de simulação analisados

| ID | Taxa de chegada de navios |
|----|---------------------------|
| 1 | Original |
| 2 | 2,0 x |

| ID | Rebocadores disponíveis |
|----|-------------------------|
| 1 | 4 |
| 2 | 6 |

| ID | Restrição atracação noturna para navios com cabos de aço |
|----|--|
| 1 | SIM |
| 2 | NÃO |

| ID | Restrição adicional de LOA para atracação noturna nos berços |
|----|--|
| 1 | SIM |
| 2 | NÃO |

| ID | Vazão descarga de PETRÓLEO no berço 7 |
|----|---------------------------------------|
| 1 | 5500 m3/h |
| 2 | 8000 m3/h |

| ID | Vazão carga de DIESEL no berço 7 |
|----|----------------------------------|
| 1 | 1100 m3/h |
| 2 | 2800 m3/h |

| ID | Produção de DIESEL pela refinaria |
|----|-----------------------------------|
| 1 | Original |
| 2 | 1,5 x |

| ID | Taxa de chegada de navios | Rebocadores disponíveis | Restrição atracação noturna para navios com cabos de aço | Restrição adicional de LOA para atracação noturna nos berços | Vazão descarga de PETRÓLEO no berço 7 | Vazão carga de DIESEL no berço 7 | Produção de DIESEL pela refinaria |
|----|---------------------------|-------------------------|--|--|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 8 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 9 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 11 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 12 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 13 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 14 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 15 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| 16 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 17 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 18 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 19 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 20 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |

O cenário 1 (base) é representativo do estado atual do sistema, sem modificações, o qual foi utilizado no processo de validação do modelo. No cenário 2, são acrescentados 2 rebocadores à frota disponível no terminal. No cenário 3, a restrição existente relacionada à proibição da atracação noturna de navios dotados de cabos de aço é relaxada. De forma semelhante, no cenário 4, os limites de LOA mais restritivos para atracação noturna (vide Tabela 2) nos berços de 3 a 8 são igualados aos limites para amarração diurna.

No cenário 5, a vazão máxima de descarga de petróleo para os tanques da refinaria a partir do berço 7 é aumentada de 5500 para 8000 m³/h, o que é feito de maneira análoga no cenário 6, só que com a vazão de carregamento de navios de diesel, a qual é aumentada de 1100 m³/h para 2800 m³/h. O cenário 7 é representativo da combinação dos cenários 5 e 6, com o aumento de ambas as vazões máximas descritas. Por sua vez, o cenário 8 é a combinação dos cenários 3, 5 e 6. Já o cenário 9 é representativo do cenário base (1) com todas as restrições relaxadas.

Os cenários de 10 a 16 têm como objetivo analisar o impacto sobre os indicadores do desempenho de um aumento de 100% na demanda de atendimento de navios do terminal. Assim, no cenário 10, a frequência de chegada de navios é dobrada, sendo somando a isso o aumento na frota de rebocadores (11), a relaxação da restrição de atracação noturna devido aos cabos de aço (12) ou LOA (13), o aumento da vazão de descarga de petróleo (14) ou de carga de diesel (15). Por fim, o cenário 16 representa uma combinação dos cenários de 10 a 15.

No cenário de 17 é analisado o impacto de um aumento de 50% na produção diária de diesel da refinaria, o qual resulta também no aumento da demanda de petróleo do sistema. Nos cenários seguintes, o aumento de produção descrito é combinado com o aumento de vazão carregamento de diesel (18) ou de descarga de petróleo (19) no berço 7 ou com ambos (20).

Cada um dos referidos cenários foi rodado de acordo com os parâmetros de simulação de duração de corridas, número de réplicas e tempo de aquecimento definidos no item 3.5 (Tabela 1). Os indicadores de desempenho (item 3.6) foram então obtidos e a respectiva diferença em relação ao cenário base calculada.

4.3.1 Número de operações e volume movimentado total

Inicialmente foi avaliado o comportamento do indicador do número total de operações (N_{OP}) no terminal para cada cenário analisado e sua variação em relação ao cenário base (Figura 33).

Em princípio, esse indicador é função da taxa de chegada de navios no terminal. Espera-se que quantos mais navios forem designados ao terminal, maior será o número de operações realizadas. Essa lógica é válida até o estágio em que o terminal atinge sua capacidade máxima de atendimento de navios no horizonte de tempo avaliado (1 ano). A partir desse ponto, por questões de limite de disponibilidade de recursos, um aumento na frequência de chegada de navios ocasionará um aumento equivalente na fila para atendimento, não mais influenciando o número de operações realizadas no terminal.

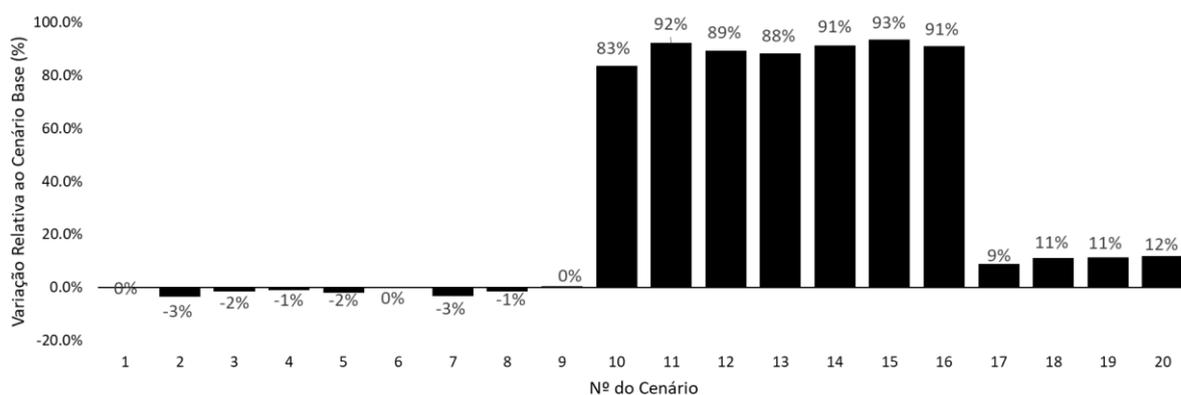


Figura 33 - Variação relativa ao cenário base do Número de Operações Total

Na análise realizada, observou-se que esse indicador se mantém quase constante ou apresenta pequena variação negativa nos cenários de 2 a 9. Isso é um indicativo de que no seu estado atual, o terminal consegue atender todos os navios que designados a operar em suas instalações em um mesmo ano. Assim, melhorias de eficiência no processo de atendimento de navios não impactam o número de operações realizadas, já que no modelo isso não implica em um aumento na taxa de chegada de navios. Naturalmente, no sistema real, um aumento de eficiência do terminal poderia influenciar em um ajuste na programação de navios. No entanto, essa possibilidade não foi considerada no modelo elaborado.

Nos cenários de 10 a 16, nos quais a frequência de chegada de navios é o dobro da atual, houve um aumento significativo do número de operações realizada no terminal. Além disso, nesses cenários, o terminal está operando mais próximo de sua capacidade máxima de atendimento de navios, de modo que melhorias de eficiência no processo de atendimento de navios impactam mais o número de operações realizadas em um ano. Isso pode ser percebido por meio das diferenças entre o valor para o cenário 10 e o valor para os cenários de 11 a 16, as quais oscilam entre 5 e 10%.

Nos cenários de 17 a 20, a produção de diesel da refinaria é aumentada em 50%, o que ocasiona um consequente aumento adicional de sua demanda por petróleo. Assim, são necessárias mais operações com navios tanto para escoar o diesel produzido, quanto para receber o petróleo, o que se reflete no aumento entre 9 e 12% do indicador de N_{OP} em relação ao cenário base.

A análise para a variação relativa do volume movimentado total de diesel e petróleo (Figura 34) é análoga à realizada para o número total de operações. O aumento no volume movimentado de diesel é destacadamente maior nos cenários de 17 a 20, nos quais a produção de diesel da refinaria sofre um aumento significativo.

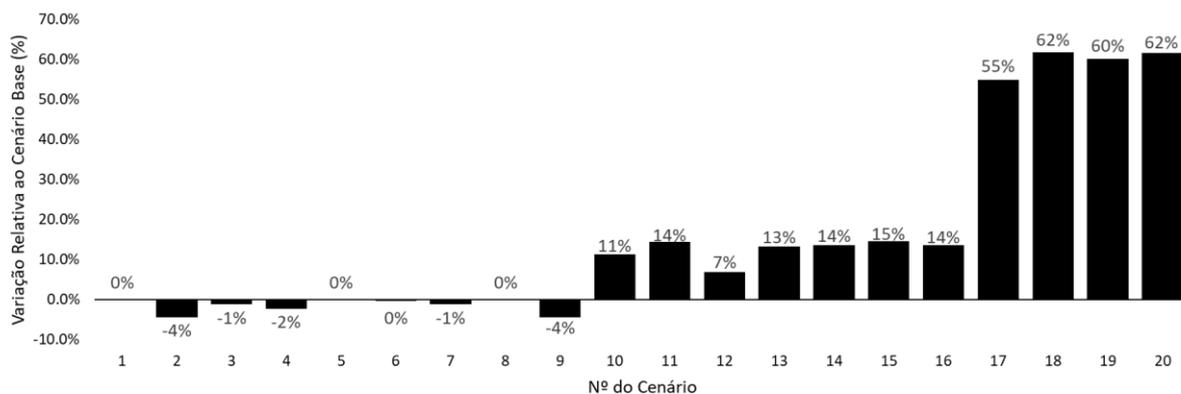


Figura 34 - Variação relativa ao cenário base do Volume Movimentado Total de diesel e petróleo

4.3.2 Fator de utilização dos recursos

O fator de utilização dos recursos (FUT), o qual explicita o percentual do tempo em que o recurso foi utilizado dentro do período em que se encontrava disponível para utilização, foi calculado no modelo para os berços, o conjunto de rebocadores, lanchas de amarração, práticos e amarradores. Quando não há uma alteração na quantidade de recursos presentes no sistema, a tendência é que o FUT dos recursos aumente juntamente com o crescimento no número de operações com navios.

Isso pode ser observado no comportamento desse indicador para as lanchas de amarração, práticos e amarradores (Figura 35), o qual se comporte de maneira análoga ao parâmetro N_{OP} (Figura 33).

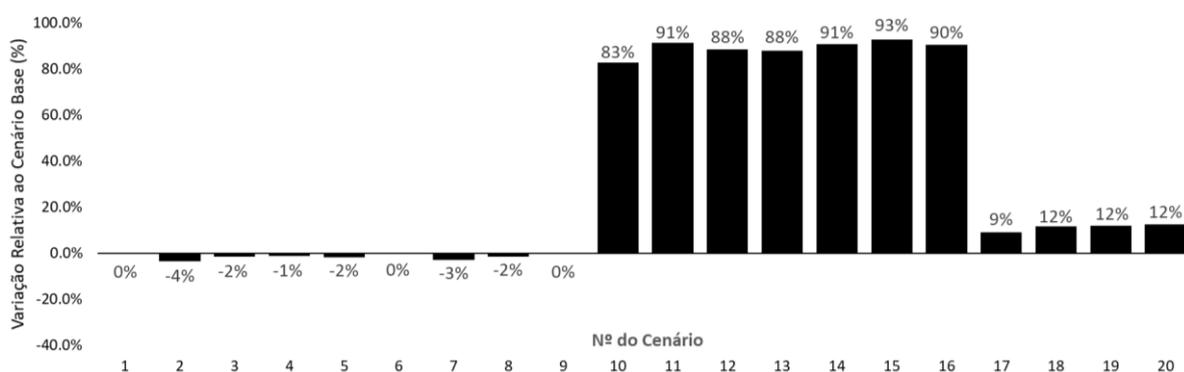


Figura 35 - Variação relativa ao cenário base do FUT das lanchas de apoio à amarração, práticos e amarradores

O comportamento do FUT dos rebocadores (Figura 36) se diferencia nos cenários 2, 9 e 11, nos quais a frota dessas embarcações recebe um acréscimo de duas unidades. Assim, nesses casos, é perceptível a queda da variação relativa ao cenário base desse indicador decorrente de uma maior disponibilidade desses recursos e consequente menor fator de utilização.

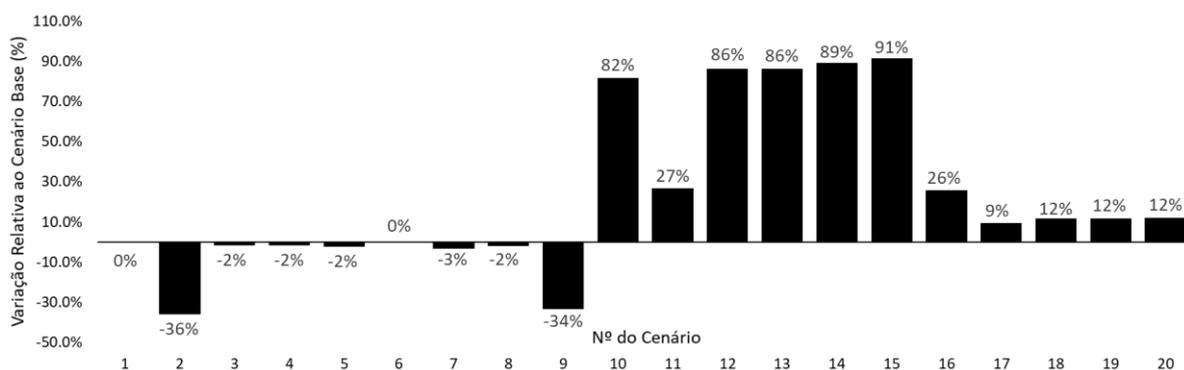


Figura 36 - Variação relativa ao cenário base do FUT dos rebocadores

Por fim, analisou-se o FUT do berço 7 (Figura 37), no qual são movimentados os navios que descarregam petróleo ou são carregados de diesel pela refinaria. Nesse caso, as maiores reduções no FUT foram percebidas nos cenários 6 a 9, nos quais foi contemplada um aumento nas vazões máximas de carregamento de diesel e descarga de petróleo a partir do berço 7, resultando na redução do tempo da etapa de bombeio da operação e conseqüente redução do tempo de ocupação do berço.

Por sua vez, o maior aumento relativo do FUT do berço 7 ocorreu para o cenário 17, no qual a produção de diesel da refinaria e seu consumo de petróleo foram aumentados, resultando em maior número de operações nesse berço, sem a modificação das restrições de vazão originais.

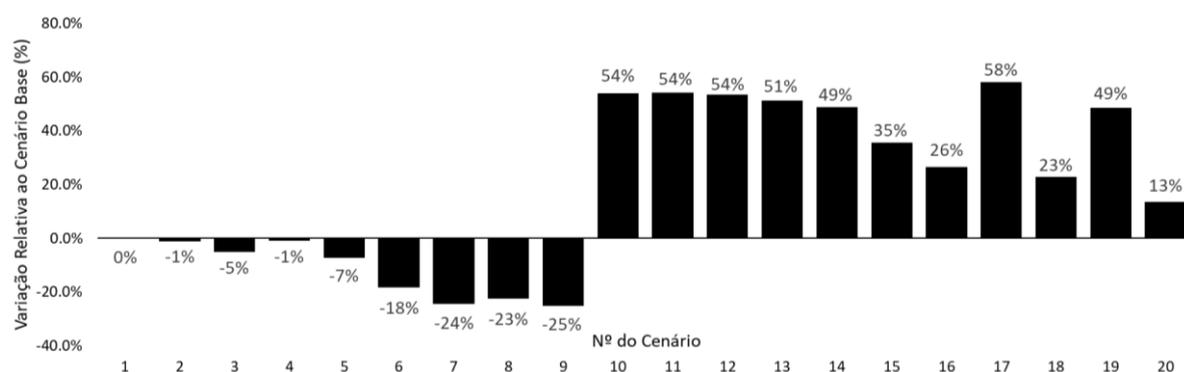


Figura 37 - Variação relativa ao cenário base do FUT do berço 7

4.3.3 Nível de serviço logístico

O indicador de nível de serviço logístico (NS), o qual explicita o percentual da demanda de movimentação atendida pelo terminal, foi calculado em cada cenário de simulação analisado, considerando a entrega de petróleo para a refinaria, a retirada de diesel da refinaria e a entrega de diesel para o mercado (clientes).

Na maior parte dos cenários, o NS relacionado a entrega de petróleo para a refinaria não variou (Figura 38) em relação ao cenário base, ou seja, se manteve em 100%. Nos cenários de 17 a 20, nos quais há um aumento na demanda de petróleo da refinaria, o nível de serviço sofreu pequenas reduções entre 0,39 e 2,57%, ou seja, mesmo com um aumento significativo da demanda de petróleo, o sistema foi capaz de supri-lo a altos níveis de serviço.

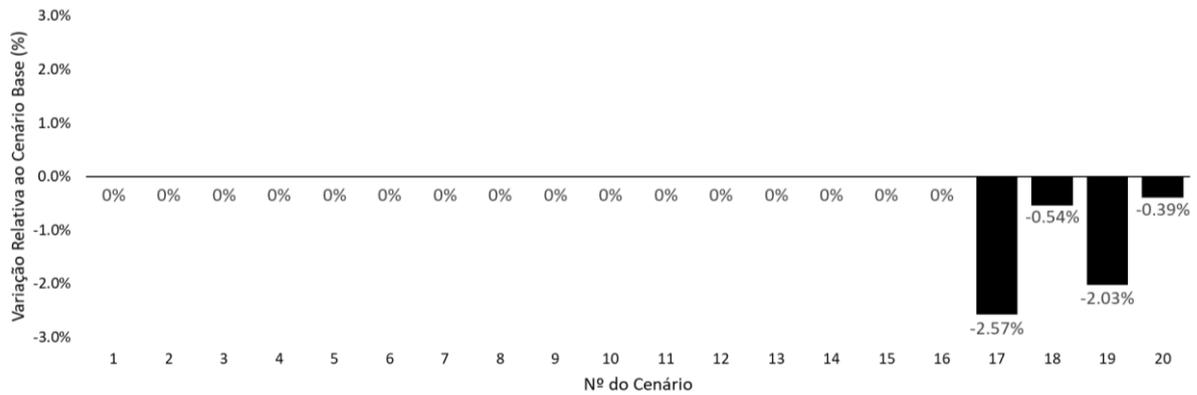


Figura 38 - Variação relativa ao cenário base do Nível de Serviço de entrega de Petróleo à refinaria

Raciocínio análogo pode ser aplicado a análise da variação relativa do NS relacionado à retirada de diesel dos tanques da refinaria (Figura 39). Mesmo com o aumento em 50% da produção de diesel da refinaria (cenários 17 a 20), o sistema foi capaz escoar essa produção de forma rápida o suficiente de modo manter o NS em patamares superiores a 99%, mitigando possíveis custos associados à parada do refino devido à falta de espaço em tanques.

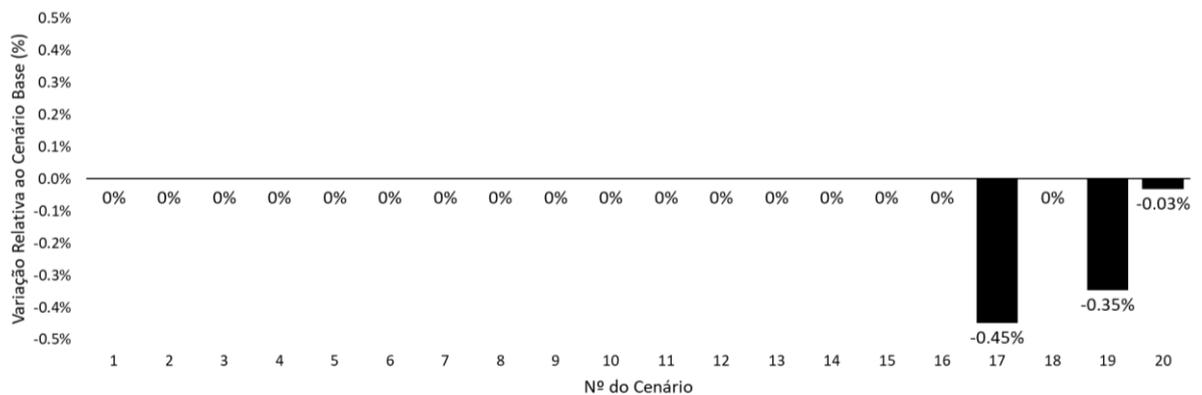


Figura 39 - Variação relativa ao cenário base do Nível de Serviço de retirada de Diesel da refinaria

Por fim, o NS de entrega de diesel ao mercado também analisado (Figura 40). Esse indicador apresentou pequena variação para os cenários de 2 a 9. Nos cenários de 10 a 16, nos quais a taxa de chegada de navios foi dobrada, o NS de entrega de diesel ao mercado sofreu redução significativa. Como no modelo elaborado o atendimento dos navios é priorizado sobre a distribuição por dutos para as companhias clientes, uma maior parcela da produção de diesel é desviada do abastecimento aos clientes por dutos sempre que mais navios são atendidos.

Movimento inverso é percebido nos cenários de 17 a 20, nos quais o aumento na produção de diesel e manutenção da taxa de chegada de navios acarretam no crescimento da quantidade excedente de diesel, a qual é direcionada ao abastecimento dos clientes por modal dutoviário. Assim, nesses casos, o NS relacionado à entrega do diesel ao mercado aumenta.

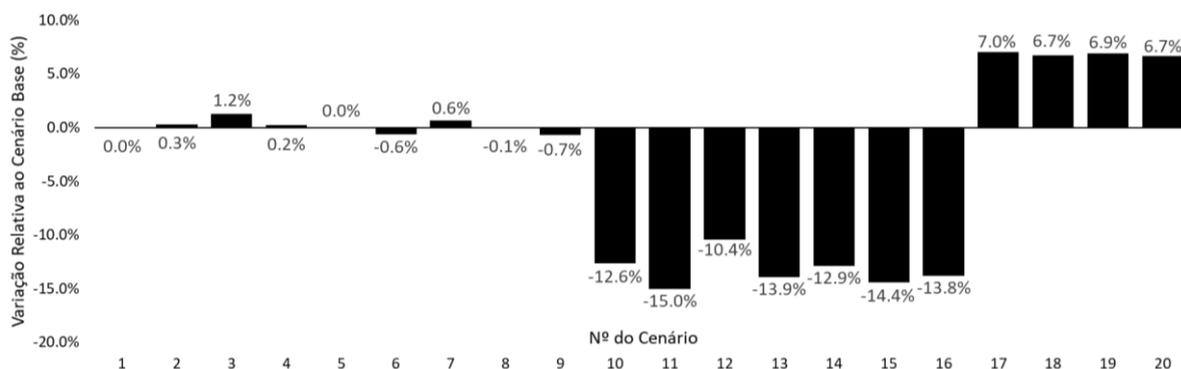


Figura 40 - Variação relativa ao cenário base do Nível de Serviço de entrega de Diesel ao mercado

4.3.4 Tempo e custo anual de excesso de estadia

No modelo, o tempo total (TT_{NT}) que cada entidade de navio de determinada classe passa no porto é contabilizado desde o momento da emissão da sua NOR até a sua partida. Um parâmetro de referência da indústria é que TT_{NT} não deve ser superior à 36 h, para uma descarga ou carga completa do navio. Para uma carga parcial, o tempo total admissível de estadia é determinado pela fórmula $(Carga\ Movimentada/Capacidade\ de\ Carga\ Total) * 24 + 12$ (em horas). Por exemplo, caso um navio opere no terminal uma quantidade de carga equivalente a 50% da sua capacidade total, é esperado que sua estadia no porto se limite a 24 horas.

Todo o tempo que o navio passa no porto acima do limite determinado pela fórmula anterior é contabilizado como tempo de excesso de estadia ($TEXC_{NT}$), o qual é um indicador que mede as ineficiências no processo de atendimento de navios pelo terminal. Algumas possíveis fontes de espera que podem implicar no aumento do $TEXC_{NT}$ incluem: condição de vento acima do limite de atracação, restrições para atracação noturna, falta de espaço ou de produto em tanques, indisponibilidade de berço, de rebocadores, de práticos, lanchas de amarração, amarradores e/ou canal.

O $TEXC_{NT}$ se reflete em um custo adicional com diárias de navios esperando no porto no período de excesso de estadia. Na prática, a contabilização do custo de sobreestadia para fins de pagamento varia de acordo com cada contrato de afretamento praticado com o cada navio e seu desenvolvimento não é objeto do presente trabalho. No entanto, para fins de simplificação,

o custo de excesso de estadia pode ser calculado pelo produto entre o $TEXC_{NT}$ (em dias) de cada navio e a sua respectiva taxa de frete diária.

Os valores das taxas de frete típicas dos navios de cada classe foram fornecidos pela empresa operadora do terminal em análise. Como o presente estudo de caso focou na análise da movimentação de petróleo e diesel no sistema, o custo anual de excesso de estadia foi contabilizado apenas para os navios de diesel e petróleo.

Esse custo anual de excesso de estadia dos navios de diesel e petróleo foi então dividido pelo volume total desses produtos movimentado no terminal no intervalo de tempo analisado (1 ano), resultando no indicador custo anual médio por volume movimentado de excesso de estadia (C_{EXC}).

A variação relativa ao cenário de base do C_{EXC} foi calculada para cada cenário analisado (Figura 41). Esse indicador é reduzido entre 9 e 65% com a implementação das mudanças presentes nos cenários de 2 a 9.

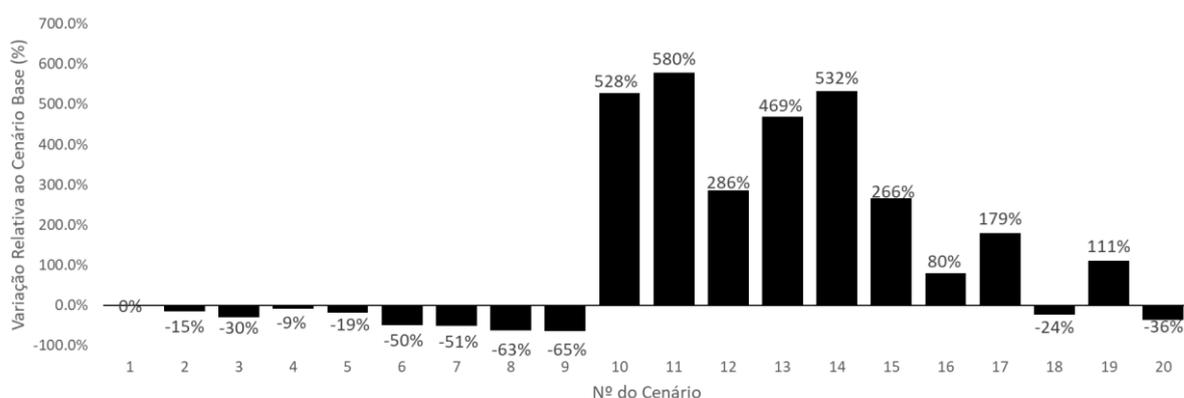


Figura 41 - Variação relativa ao cenário base do Custo Exc. de Estadia/Vol. Mov.

Individualmente a mudança que apresentou maior efetividade na redução do C_{EXC} foi o aumento da vazão das operações de carga de diesel no berço 7 (cenário 6). No geral, o cenário 9, em que todas as restrições foram relaxadas, mantendo-se a taxa de chegada de navios atual, apresentou maior redução no C_{EXC} (65%).

Nos cenários 10 a 16, em que a frequência de chegada de embarcações foi dobrada, o C_{EXC} disparou, aumentando até 580% no cenário 11. Isso é decorrente do aumento da fila de navios para atendimento nos berços nesses cenários, que acarreta em um maior tempo que cada entidade permanece no sistema.

Por fim, destaca-se que, no cenário 20, mesmo com o aumento das movimentações de diesel e petróleo no terminal, com conseqüente crescimento do número de navios atendidos, a implementação conjunta do aumento da vazão máxima de carga de diesel e descarga de petróleo

no berço 7 proporcionou uma redução de 36% no C_{EXC} em relação ao cenário base, o que demonstra a efetividade dessas modificações sobre o aumento de eficiência do sistema.

4.3.5 Custo anual de atracação

A análise da variação do custo anual médio de atracação por volume movimentado (C_{ATRAC}) foi realizada para cada cenário estudado (Figura 42). Esse custo está relacionado com os custos portuários de serviços de praticagem e apoio de rebocadores e, em geral, é diretamente proporcional ao número de manobras atracação e desatracação de navios realizadas.

Assim, o comportamento do C_{ATRAC} nos cenários analisados é análogo ao do número de operações (N_{OP}) no terminal discutido no item 4.3.1. Quanto maior o N_{OP} , maior o número de atracações e desatracações realizadas. Os custos de cada manobra variam com a classe dos navios, de modo que os custos unitários para cada classe foram obtidos com a empresa operadora do terminal. Novamente, na análise realizada foi somente considerado o custo associado aos navios de petróleo e diesel.

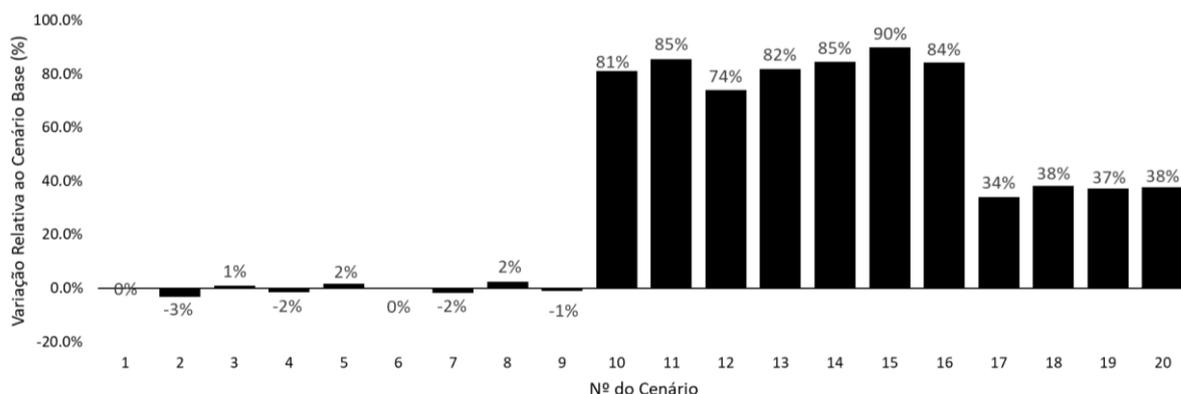


Figura 42 - Variação relativa ao cenário base do Custo de Atracação/Vol. Mov.

4.3.6 Custo anual de perda de margem de refino

O custo anual médio de perda de margem de refino por volume de petróleo e diesel movimentado (C_{MREF}) foi calculado para cada cenário. Esse custo tem relação com o percentual do tempo em que a refinaria ficou sem operar devido à falta de petróleo, como insumo de produção, ou de espaço em tanques para armazenamento dos produtos refinados.

Esse indicador é calculado pelo produto do consumo médio diário de petróleo da refinaria pelo tempo em que o refino esteve parado multiplicado pelo o custo unitário do barril de petróleo não processado.

Conforme discutido no item 4.3.3, o nível serviço (NS) do terminal relacionado à entrega de petróleo (Figura 38) ou retirada de diesel da refinaria (Figura 39) se manteve inalterado, em

100%, nos cenários 1 a 16. Nesses casos, o C_{MREF} se manteve zero, visto que não houve parada da refinaria.

Por sua vez, nos cenários de 17 a 20, nos quais foi simulado um aumento significativo na produção de diesel pela refinaria, o NS sofreu uma variação negativa de até 2,57%, o que acarretou em paradas da refinaria, de modo que o C_{MREF} foi contabilizado. O cenário 17, o qual apresentou menor nível de serviço relacionado a entrega de petróleo e retirada de diesel da refinaria, teve o maior C_{MREF} associado.

4.3.7 Custo anual mudança de polo de suprimento

A variação relativa ao cenário de base do custo anual médio de mudança de polo de suprimento por volume movimentado (C_{MSUP}) foi calculada para cada cenário analisado (Figura 43).

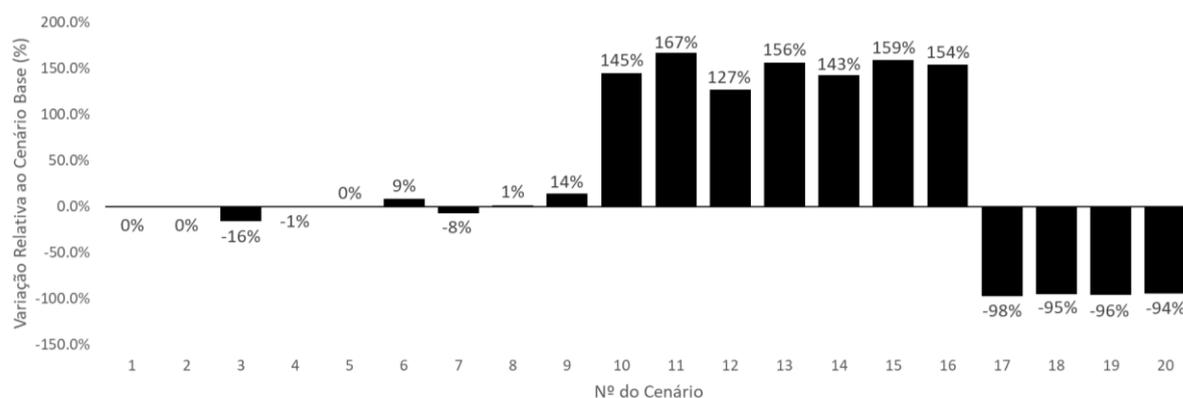


Figura 43 - Variação relativa ao cenário base do Custo Mud. de Polo de Suprimento/Vol. Mov.

Caso o sistema terminal-refinaria não consiga prover a quantidade de produto (diesel) contratada, os clientes têm que deslocar sua frota de caminhões para abastecimento em outro polo. Isso acarreta em custos adicionais de frete rodoviário e de combustível dos caminhões, os quais devem que ser reembolsados aos clientes. O C_{MSUP} é o indicador de desempenho que contabiliza esses custos.

Conforme explicado no item 4.3.3, no modelo elaborado, o atendimento dos navios é priorizado sobre a distribuição por dutos para as companhias clientes. Assim, nos cenários em que maior número de navios de diesel foram operados no terminal, maior parcela da produção da refinaria foi destinada a esses navios, comprometendo em parte o abastecimento do mercado por modal dutoviário. Esse comportamento pode ser identificado por meio do aumento significativo do C_{MSUP} nos cenários de 10 a 16, nos quais a taxa de chegada de navios foi dobrada.

Em contrapartida, nos cenários de 17 a 20, em que a produção de diesel pela refinaria foi aumentada em 50% e a taxa de chegada navios foi mantida original, o C_{MSUP} sofreu forte redução (entre 94% e 98%). Isso é um indicativo de que a quantidade excedente de diesel produzida pela refinaria nesses cenários é necessária para o abastecimento dos clientes por modal dutoviário caso seja mantida a frequência original de chegada de navios.

4.3.8 Custo anual de capital imobilizado em estoque

A variação relativa ao cenário de base do custo anual de capital imobilizado em estoque (C_{EST}) de diesel e petróleo nos tanques do terminal e da refinaria também foi calculada para cada cenário analisado (Figura 44).

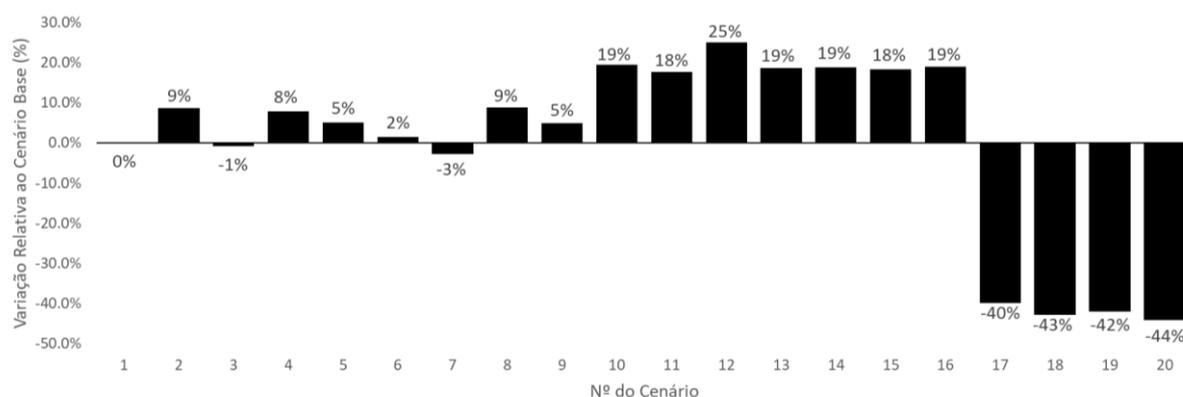


Figura 44 - Variação relativa ao cenário base do Custo de Estoque/Vol. Mov.

O C_{EST} é calculado pelo somatório dos produtos entre o volume total médio de cada produto armazenado nos tanques pelo seu respectivo valor de mercado. No modelo de simulação, o volume total de cada produto nos tanques é registrado a cada 24 horas (vide item 3.3.1.6.4). Ao final da simulação, é feita a média entre todos os registros para o cálculo do volume total médio em estoque de cada produto.

Nos cenários de 10 a 16, o aumento da frequência de chegadas de navios acarretou no aumento dos níveis de estoque do petróleo nos tanques da refinaria. Isso acarretou em um aumento de 25% no C_{EST} .

Por sua vez, nos cenários de 17 a 20, o C_{EST} sofreu reduções consideráveis de até 44%. Apesar da maior produção de diesel nesses cenários, esse produto excedente foi utilizado para abastecimento dos clientes por dutos, não impactando em um aumento no estoque médio de diesel da refinaria. Em contrapartida, o maior consumo diário de petróleo pela refinaria ocasionou uma redução significativa no estoque desse insumo, o que acarretou na forte redução do C_{EST} observada.

Na maior parte dos cenários de 2 a 9, o C_{EST} aumentou. Esses cenários tem a particularidade de corresponderem ao cenário base, só que com uma ou mais restrições relaxadas, não tendo sido alteradas a frequência de chegada dos navios para operação no terminal. Nesses casos, o estoque resultante do equilíbrio entre a entrada e a saída de produtos nos tanques ficou superior ao do cenário base, aumentando o C_{EST} .

Na prática, o estoque é controlado no por meio do ajuste na programação de navios designados para o terminal. No modelo elaborado, a programação planejada inicialmente é ajustada por meio da convocação de navios em emergência quando o estoque atinge o ponto que acusa quando o nível do estoque de petróleo está muito baixo ou o nível do estoque de diesel está muito alto, aumentando o risco de parada do refino. Esse ponto de convocação foi calibrado para o cenário base, de modo a manter um nível de estoque de produtos nos tanques do modelo compatível com os dados do sistema real.

No entanto, esse ponto de convocação não foi ajustado para os demais cenários, o que eventualmente seria feito no sistema real, para que o nível de estoque não sofresse grandes variações e permanecesse em um limite estabelecido como admissível. Assim, a representatividade dos resultados de C_{EST} para esses cenários pode ter sido comprometida.

4.3.9 Custo logístico total

A variação relativa ao cenário de base do custo logístico total anual médio por volume movimentado (CL) foi calculada para cada cenário analisado (Figura 45). Esse indicador consiste na soma dos custos de atracação, perda de margem de refino, mudança do polo de suprimento, capital imobilizado em estoque e excesso de estadia dividido pelo volume movimentado de diesel e petróleo. Por agregar todos os indicadores anteriores, o CL é o principal indicador utilizado na análise do impacto das mudanças estudadas sobre o desempenho do sistema.

No sistema em análise, os volumes armazenados nos tanques são muito grandes e o valor agregado dos produtos é alto, de modo que o custo de estoque (C_{EST}) chega a ser 6 vezes o valor da soma das demais parcelas que compõe o CL em alguns cenários. Desta forma, pequenas variações no C_{EST} afetam em grande magnitude o resultado do CL de cada cenário, tornando difícil a avaliação do impacto do demais parâmetros operacionais sobre o desempenho do terminal. Assim, a consideração do C_{EST} pode distorcer análise do CL, indicando como melhor solução, aquela que casualmente ficou com nível de estoque um pouco mais baixo, porém com os demais indicadores de custo muito mais elevados.

Além disso, conforme detalhado no item 4.3.8, a representatividade dos resultados de C_{EST} para alguns cenários pode ter sido comprometida pelo fato do ponto de convocação de navios em emergência ter sido calibrado apenas para o cenário base. Na prática, esse ponto seria ajustado para cada configuração do sistema.

Desta forma, optou-se por desconsiderar o C_{EST} da composição do CL, de modo a poder analisar de maneira efetiva o impacto das mudanças implementadas em cada cenário sobre os demais aspectos da operação do sistema.

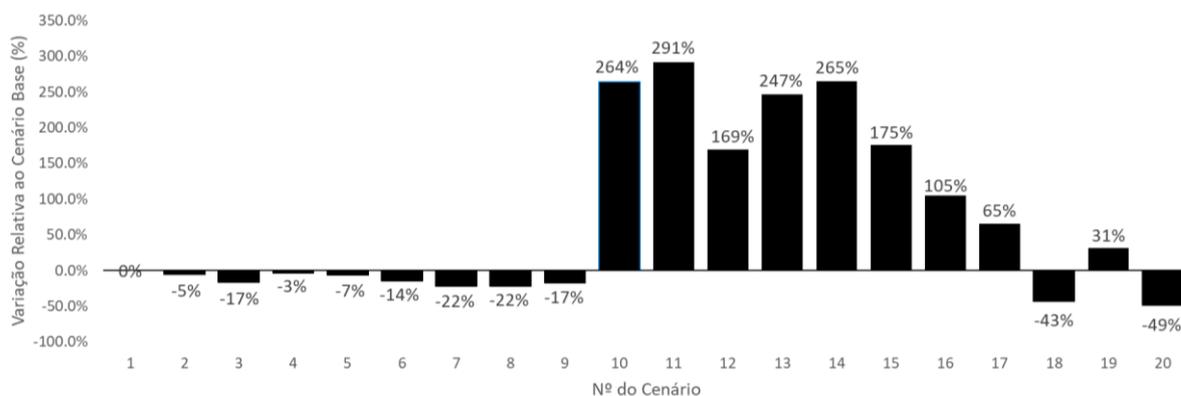


Figura 45 - Variação relativa ao cenário base do Custo Total (sem custo de estoque)/Vol. Mov.

Conforme pode ser visto, o CL foi reduzido nos cenários de 2 a 9, em que as restrições existentes foram relaxadas individualmente ou em conjunto, sem alteração da frequência de chegada de navios. Nesses cenários, a mudança que mais impactou individualmente o CL do sistema foi a retirada da restrição de atracação noturna para navios com cabo de aço (cenário 3), a qual provocou uma redução de 17% no CL.

Por sua vez, os cenários 7 e 8 apresentaram a maior redução do CL (22%) do conjunto (de 2 a 9), nos quais a combinação do aumento da vazão máxima para as operações de carregamento de diesel em navios e descarga de petróleo no berço 7 reduziram consideravelmente o custo de excesso de estadia de navios (C_{EXC}), reduzindo, conseqüentemente, o CL.

Conforme discutido no item 4.3.4, a maior redução do C_{EXC} ocorreu no cenário 9, no qual todas as restrições existentes foram relaxadas. No entanto, nesse cenário, uma maior parcela da produção de diesel da refinaria passou a ser utilizada para carregamento dos navios nos berços, em detrimento da distribuição para os clientes por dutos. Isso acarretou em um aumento de 14% no custo de mudança de polo de suprimento (C_{MSUP}), conforme discutido no item 4.3.7, o que fez com que a redução do CL fosse limitada a 17%.

O CL aumentou consideravelmente nos cenários de 10 a 16, nos quais a taxa de chegada de navios foi dobrada. Nesses cenários, o aumento no volume movimentado total (Figura 34)

de diesel e petróleo não foi suficiente para compensar o aumento nos demais componentes do CL.

O cenário 20 foi o que apresentou maior redução total do CL (49%). Nesse cenário, a combinação do aumento das vazões das operações com petróleo e diesel no berço 7 com o aumento da produção de diesel pela refinaria, fez com que o C_{EXC} e C_{MSUP} se reduzissem significativamente, o que contrabalanceou o aumento do custo de atracação (C_{ATRAC}) e do custo de perda de margem de refino (C_{MREF}).

A Figura 46, que contém a distribuição dos diferentes indicadores de custos para cada cenário de simulação, ilustra variação do indicador CL conforme descrita anteriormente. Nessa figura, os valores do eixo das ordenadas foram ocultados para a proteção da informação da empresa operadora do sistema logístico estudado.

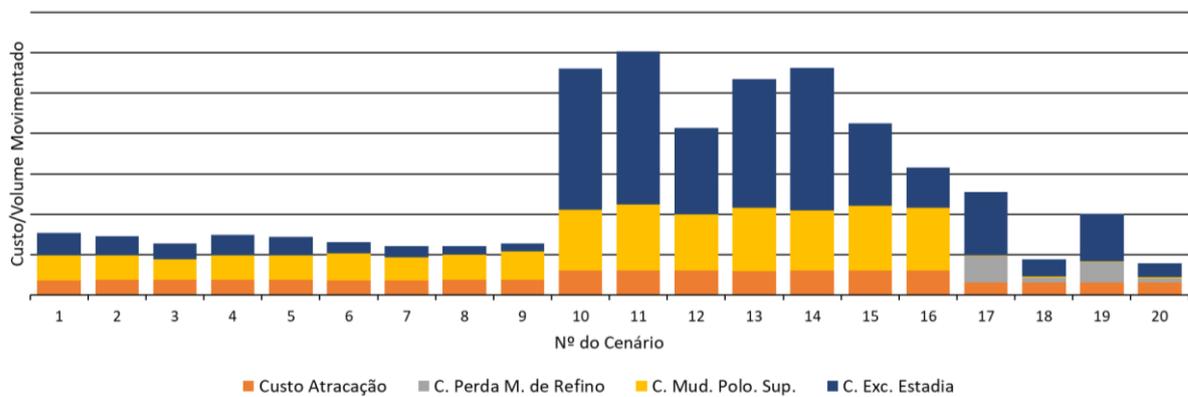


Figura 46 - Distribuição de custos/volume movimentado de diesel e petróleo por cenário (sem custo de estoque)

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um modelo de simulação de eventos discretos para a análise logística de sistemas compostos por um terminal marítimo de petróleo, uma refinaria e seus clientes. Cada etapa da modelagem realizada, a estrutura algorítmica do modelo elaborado e a sua programação em um ambiente de simulação foram discutidas detalhadamente, de modo a garantir a sua reprodutibilidade.

O modelo elaborado foi submetido a um processo de validação, no qual foi identificado que o ajuste aos dados registrados em campo do sistema foi adequado, ficando o erro relativo entre as diferenças dos indicadores de número de operações e volumes movimentados abaixo de 5% para todos os berços e produtos modelados.

Após validado, o modelo foi aplicado a um estudo de caso de um sistema real. Para isso, foram coletados e tratados dados estatísticos, registrados em campo, relativos à operação do sistema. Além disso, foi elaborada uma matriz de simulação composta de 20 cenários, nos quais mudanças em diferentes parâmetros e restrições operacionais foram avaliadas individualmente e em conjunto. O objetivo do estudo foi avaliar o impacto de cada uma desses parâmetros e restrições sobre o desempenho do sistema.

Em princípio, foi verificado que, mantidas as demais características do sistema, a restrição de atracação noturna para navios com cabos de aço é a que apresenta maior impacto individual sobre a eficiência do sistema, medida por meio do custo logístico total por volume movimentado (CL). Percebeu-se também, que a combinação entre relaxar a restrição para atracação noturna e o aumento da vazão máxima permitida nas operações de carga de diesel e descarga de petróleo de navios no berço 7 proporciona a maior redução do CL do sistema, quando não alterado o nível de produção diário da refinaria.

Caso haja um aumento da produção de diesel da refinaria em 50%, agregado ao aumento da vazão máxima permitida nas operações de carga de diesel e descarga de petróleo de navios no berço 7, percebe-se que seria possível obter uma redução ainda mais significativa do CL do sistema.

Em contrapartida, verificou-se também que o CL aumentou consideravelmente nos cenários nos quais a taxa de chegada de navios no terminal foi dobrada. Nesses cenários, o aumento no volume movimentado total não foi suficiente para compensar o aumento nos demais componentes do CL, dentre eles o custo de excesso de estadia de navios.

As capacidades de diagnóstico e prognóstico do modelo foram demonstradas por meio dos resultados descritos, os quais explicitam o impacto de restrições existentes e de eventuais

mudanças sobre o desempenho do sistema. Essas são informações fundamentais para a composição de um estudo de viabilidade técnica e econômica para fundamentar a tomada de decisão quanto à realização ou priorização de investimentos para mudanças das configurações do sistema, de modo relaxar uma ou mais restrições associadas.

Como trabalho futuro, pretende-se realizar a integração de um processo de otimização ao modelo de simulação desenvolvido, de modo a permitir a identificação da configuração do sistema em que o CL seria mínimo.

REFERÊNCIAS

- AIRES, M., LUCENA, A., ROCHA, R., SANTIAGO, C., SIMONETTI, L. *Optimizing the petroleum supply chain at PETROBRAS*. Computer Aided Chemical Engineering, v. 18, p. 871-876, 2004.
- BANKS, J.; CARSON, J.S.; NELSON, B.L.; NICOL, D.M. *Discrete-Event System Simulation*. 5th ed. New Jersey: Pearson Education, 2010.
- BANKS, J. *Principles of Simulation*. Handbook of Simulation, ed. J. Banks, New York: John Wiley & Sons, 1998.
- BALCI, O. *Verification, Validation, and Testing*. Handbook of Simulation, ed. J. Banks, New York: John Wiley & Sons, 1998.
- BATRA, P. *Planning crude oil supply system through simulation*. Omega, v. 8, n. 4, p. 493-497, 1980.
- BIERLAIRE, M. *Simulation and optimization: A short review*. Swiss, Transportation Research, part C, v. 55, 2015.
- CAROTENUTO, P., GIORDANI, S., ZACCARO, A. *A simulation based approach for evaluating the impact of maritime transport on the inventory levels of an oil supply chain*. Transportation Research Procedia, v. 3, p. 710-719, 2014.
- CHEN, H., ZUO, L., WU, C., LI, Q. *An MILP formulation for optimizing detailed schedules of a multiproduct pipeline network*. Transportation Research Part E, v. 123, p. 142-164, 2019.
- CHENG, L., DURAN, M. *Logistics for world-wide crude oil transportation using discrete event simulation and optimal control*. Computers and Chemical Engineering, v. 28, p. 897-911, 2004.
- ESCUADERO, L. F., QUINTANA, F. J., SALMERON, J. *CORO, a modeling and an algorithmic framework for oil supply, transformation and distribution optimization under uncertainty*. European Journal of Operational Research, v. 114, n. 3, p. 638-656, 1999.
- IERAPETRITOU, M. G., FLOUDAS, C. A., VASANTHARAJAN, S., CULLICK, A. S. *Optimal location of vertical wells: decomposition approach*. AIChE Journal, v. 45, n. 4, p. 844-859, 1999.
- IYER, R. R., GROSSMANN, I. E., VASANTHARAJAN, S., CULLICK, A. S. *Optimal planning and scheduling of offshore oil field infrastructure investment and operations*. Industrial and Engineering Chemistry Research, v. 37, p. 1380-1397, 1998.
- KELTON, W. D., SADOWSKI, R. P., SADOWSKI, D. A. *Simulation with Arena*. New York, McGraw-Hill, 1998.
- KOSMIDIS, V. D., PERKINS, J. D., PISTIKOPOULOS, E. N. *A mixed integer optimization strategy for integrated gas/oil production*. Haia, ESCAPE proceedings, v. 12, p. 697-702, 2002.

LEE, H., PINTO, J. M., GROSSMANN, I. E., PARK, S. *Mixed-integer linear programming model for refinery short-term scheduling of crude oil unloading with inventory management*. Industrial and Engineering Chemistry Research, v. 35, n. 5, p. 1630-1641, 1996.

LIAO, Q., LIANG, Y., XU, N., ZHANG, H., WANG, J., ZHOU, X. *An MILP approach for detailed scheduling of multi-product pipeline in pressure control mode*. Chemical Engineering Research and Design, v. 136, p. 620-637, 2018.

LIN, X., CHAJAKIS, D., FLOUDAS, C. A. *Continuous-time scheduling of tanker lightering in crude oil supply chain*. Computer Aided Chemical Engineering, v. 15, 547-552, 2003.

MAGATÃO, L., ARRUDA, L. V. R., NEVES JR, F. *A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline*. Haia, ESCAPE proceedings, v. 12, p. 715-720, 2002.

MARINHA DO BRASIL. *DPC promove 1º Workshop sobre Operações Ship to Ship em AJB*. 2017. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/noticias/dpc-promove-1o-workshop-sobre-operacoes-ship-ship-em-ajb>>. Acesso em: 06 set. 2019, 13:08:00.

NEIRO, S.M.S., PINTO, J.M. *A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains*. Nova York, Computers & Chemical Engineering, v. 28, p. 871-896, 2004.

NEIRO, S.M.S., PINTO, J.M. *Supply Chain Optimization of Petroleum Refinery Complexes*. São Paulo, Proceedings Foundations of Computer-Aided Process Operations, 2003.

PINTO, J. M., MORO, L. F. L. *A planning model for petroleum refineries*. São Paulo, Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 17, p. 575-585, 2000.

QUINTEROS, M., GUIGNARD, M., WEINTRAUB, A., LLAMBIAS, M. *Optimizing the pipeline planning system at the national oil company*. European Journal of Operational Research, v. 277, p. 727-739, 2019.

ROCHA, R., GROSSMANN, I.E., ARAGÃO, M.V.S.P. *Petroleum allocation at PETROBRAS: Mathematical model and a solution algorithm*. Computers and Chemical Engineering, v. 33, p. 2123-2133, 2009.

ROSS, A. D. *Performance-based strategic resource allocation in supply networks*. International Journal of Production Economics, v. 63, p. 255-266, 2000.

SAAD, S., UDIN, Z.M., HASNAN, N. *Dynamic Supply Chain Capabilities: A Case Study in Oil and Gas Industry*. London, International Journal of Supply Chain Management, v. 3, n. 2, p. 70-76, 2014.

SEAR, T. N. *Logistics planning in the downstream oil industry*. Journal of Operational Research Society, v. 44, n. 1, p. 9-17, 1993.

SHANNON, R. E. *Systems simulation: the art and science*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, p. 42-52, 1975.

SIEGEL, S. *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences*. New York: McGraw-Hill, 1956.

STEBEL, S. L., NEVES JR, F., ARRUDA, L. V. R., FABRO, J. A., RODRIGUES, L.C.A. *Modeling liquefied petroleum gas storage and distribution*. *Computer Aided Chemical Engineering*, v. 10, p. 805-810, 2002.

TROYANOVSKYI, V. M., AUNG, Y. L. *Probabilistic description of stock movement at the terminal with regular completion*, *IFAC-PapersOnLine*, v. 48, n. 3, p. 1351-1356, 2015.

VAN DEN HEEVER, S. A., GROSSMANN, I. E. *An iterative aggregation/disaggregation approach for the solution of a mixed-integer nonlinear oilfield infrastructure planning model*. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 39, p. 1955-1971, 2000.

VAN DEN HEEVER, S., GROSSMANN, I. E., VASANTHARAJAN, S., EDWARDS, K. *Integrating complex economic objectives with the design and planning of offshore oilfield infrastructure*. *Computers and Chemical Engineering*, v. 24, p. 1049–1055, 2000.

ZHANG, H.R., LIANG, Y.T., Liao, Q., MA, J., YAN, X.H. *An MILP approach for detailed scheduling of oil depots along a multi-product pipeline*. *Petroleum Science*, v. 14, p. 434-458, 2017.