



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

BRUNO DA FONTE LEITE

**MODELAGEM DE CENÁRIOS DE PROGRAMAÇÃO DE PRODUÇÃO DE
COMBUSTÍVEIS EM REFINARIAS DE PETRÓLEO VIA SIMULAÇÃO
CONTÍNUA**

Recife

2025

BRUNO DA FONTE LEITE

**MODELAGEM DE CENÁRIOS DE PROGRAMAÇÃO DE PRODUÇÃO DE
COMBUSTÍVEIS EM REFINARIAS DE PETRÓLEO VIA SIMULAÇÃO
CONTÍNUA**

Tese de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Pesquisa Operacional

Orientador: Prof. Dr. Márcio das Chagas Moura

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Leite, Bruno da Fonte.

Modelagem de cenários de programação de produção de combustíveis em refinarias de petróleo via simulação contínua / Bruno da Fonte Leite. - Recife, 2025.

79f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Estudos e Ensaaios em Risco e Modelagem Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2025.

Orientação: Márcio das Chagas Moura.

Inclui referências.

1. Simulação contínua; 2. Produção e logística de derivados de petróleo; 3. Modelagem de sistemas de movimentação e armazenamento de fluidos. I. Moura, Márcio das Chagas. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

BRUNO DA FONTE LEITE

**MODELAGEM DE CENÁRIOS DE PROGRAMAÇÃO DE PRODUÇÃO DE
COMBUSTÍVEIS EM REFINARIAS DE PETRÓLEO VIA SIMULAÇÃO CONTÍNUA**

Tese de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Pesquisa Operacional

Aprovada em: 07/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Márcio José das Chagas Moura (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Arnaldo Barra Montevechi (Examinador Externo)
Universidade de São Paulo

Profa. Dra. Isis Didier Lins (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Roberto e Elisabete Leite, pilares da minha criação e exemplos da minha vida, por terem me dado a educação, os valores, o amor e a estrutura familiar para chegar até aqui.

A minha esposa, Camila, pelo apoio de sempre em tudo que eu busco realizar, pela paciência com as horas dedicadas e com os momentos de maior estresse durante esse caminho, pelo amor, e por ser a base de uma família e de um lar cheio de cumplicidade e felicidade.

A minha filha, Mariah, que apesar de nem ter idade suficiente para saber, garantia meus momentos de alegria e distração todos os dias, tão necessários durante uma jornada desafiadora.

A minhas colegas de mestrado, Lavínia, Júlia, Gabrielly e Fernanda, por toda a parceria e ajuda durante a passagem pelas disciplinas do mestrado.

À graduanda em engenharia de produção e futura colega de profissão, Gabriela Farias Gomes, pela parceria no desenvolvimento do modelo descrito neste trabalho, e no aprendizado no uso da ferramenta de simulação. Sua competência e comprometimento demonstrados ao longo desse processo reforçam que o mercado está prestes a receber uma excelente engenheira de produção.

Ao meu orientador e professor Márcio Moura, uma grande mente do meio acadêmico e que sempre teve uma visão diferenciada de aplicação do vasto conhecimento teórico a problemas desafiadores da realidade prática. Obrigado por ter acreditado nesta ideia de projeto, que fugia um pouco da área mais forte de pesquisa do CEERMA, de análises em risco e confiabilidade, por ter me feito o convite para esta reentrada no meio acadêmico, e por ter demonstrado compreensão com as dificuldades da realização deste mestrado acadêmico com uma rotina de trabalho bastante demandante na Petrobras, e por ter me desafiado e incentivado a iniciar e concluir este trabalho.

Ao meu colega e gerente na Petrobras, Wagner Germano, também por ter acreditado neste projeto e me incentivado em todos os momentos, mesmo quando isso concorria com atividades da rotina de trabalho. Ainda, por acreditar, incentivar, e trabalhar para reabrir as portas para as parcerias entre a academia e a Petrobras, valorizando o enorme potencial que as mentes do meio acadêmico têm para contribuir com a resolução de problemas reais.

A Deus, por ter me dado a saúde, paciência, força, disposição e resiliência para cumprir essa jornada desafiadora, e por ter colocado na minha vida todas as pessoas lembradas acima, sem as quais isso não seria possível.

RESUMO

A programação de produção de uma cadeia de suprimentos de petróleo e derivados é uma atividade bastante complexa, que envolve o tratamento direto de múltiplas variáveis, diversos agentes de produção e de distribuição e meios de deslocamento de matérias primas e produtos capazes de interligar esses agentes entre si e aos mercados consumidores. Tanto o planejamento de médio e longo prazo quanto o acompanhamento das operações no nível operacional, no dia a dia, envolvem a tomada constante de decisões que impactam diretamente na capacidade de suprimento dos consumidores e na viabilidade de operação dos atores produtivos e de distribuição, e consequentemente na lucratividade das unidades envolvidas. Essas decisões geralmente precisam ser tomadas de forma rápida e eficaz, sempre envolvendo a assumpção de algum nível de incerteza. A utilização de simulação de eventos discretos tem um largo histórico de aplicação em plantas industriais para avaliação de múltiplos cenários possíveis, quantificação de incertezas, identificação de gargalos operacionais e estudo de alternativas ótimas. O problema tratado neste trabalho envolve, porém, movimentação de correntes líquidas com vazão variável, em um processo cuja natureza é intrinsecamente contínua. Para modelagem deste tipo de sistema, foi utilizado o software de simulação FlexSim, e seu módulo especificamente desenvolvido para o tratamento de problemas com correntes fluidas, o FloWorks, que traz uma abordagem voltada para eventos contínuos. O modelo desenvolvido neste trabalho buscou representar o sistema real de recebimento, mistura, movimentação e expedição de nafta petroquímica de uma refinaria real de petróleo. O modelo mostrou bom potencial de aplicação em tomadas de decisão reais acerca deste sistema, a partir da avaliação do comportamento probabilístico das principais variáveis de interesse definidas, como necessidade de uso de tancagem em diferentes cenários de qualidade e vazão das correntes, além de diferentes cenários de tempo de espera por navios para carregamento dos lotes produzidos. Além disso, o modelo e a ferramenta também mostraram grande potencial para desenvolvimentos futuros, com acréscimo de complexidades que possam refletir ainda melhor o problema real, e expansão para outros sistemas de derivados ou outras unidades operacionais e sistemas de tancagem.

Palavras-chave: simulação contínua; produção e logística de derivados de petróleo; avaliação de capacidade de tancagem; indústria de petróleo e gás; modelagem de sistemas de movimentação e armazenamento de fluidos.

ABSTRACT

Production programming in a crude oil and derivatives supply chain is a very complex activity, which involves direct treatment of multiple variables, numerous production and distribution agents and transportation ways for raw material and products that can connect these agents between them and to the consuming markets. Both medium and long term planning, and also the activities monitoring at an operational level, on a daily basis, require constant decision making that impact directly in the capacity of fulfilling consumers demand and in the feasibility of keeping operation of the production and distribution agents, and consequently on profitability of these units. These decisions generally need to be made in a fast and effective manner, always involving the assumption of some risk level. The use of discrete event simulation has a long history of application in industrial plants to evaluate multiple possible scenarios, quantify risks, identify operational bottlenecks and study optimal alternatives. The problem addressed in this work involves, however, the movement of liquid currents with variable flow rates, in a process whose nature is intrinsically continuous. To model this type of system, the simulation software FlexSim was used, and its module specifically developed for dealing with problems with fluid currents, FloWorks, which brings an approach focused on continuous events. The model developed in this work sought to represent the real system for receiving, mixing, moving and shipping petrochemical naphtha from a real oil refinery. The model showed good potential for application in real decision-making regarding this system, based on the evaluation of the probabilistic behavior of the main defined variables of interest, such as the need to use tankage in different quality and flow scenarios of the currents, in addition to different scenarios of waiting time for ships to load the produced batches. Furthermore, the model and the tool also showed great potential for future developments, like adding complexities that could even better reflect the real problem, and expansion to other derivative systems or other operational units and tankage systems.

Keywords: continuous simulation; production and logistics of petroleum derivatives; tank capacity assessment; oil and gas industry; modeling of fluid movement and storage systems.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -REPRESENTAÇÃO DE MODELO DE SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICO	21
FIGURA 2 - METODOLOGIA PARA PROJETOS DE SIMULAÇÃO DE MONTEVECHI ET AL (2010)	23
FIGURA 3 - EXEMPLO DE GRÁFICO DE PROBABILIDADES EM TESTE DE ANDERSON-DARLING	28
FIGURA 4 - ACOMPANHAMENTO DA SIMULAÇÃO UTILIZANDO TIME-SLICING X BASEADA EM EVENTOS	29
FIGURA 5 - PÁGINA DE DOWNLOAD DO MÓDULO FLOWWORKS PARA O FLEXSIM	30
FIGURA 6 - BIBLIOTECA DE RECURSOS DO FLOWWORKS	30
FIGURA 7 – ESQUEMA DE REFINO DA RNEST	39
FIGURA 8 - VISTA SUPERIOR DA TANCAGEM DE NAFTA PETROQUÍMICA	40
FIGURA 9 - VISTA SUPERIOR DOS TERMINAIS E PORTO DE SUAPE	41
FIGURA 10 - FLUXOGRAMA COM MODELO CONCEITUAL	44
FIGURA 11 - VISTA GERAL DO MODELO DE SIMULAÇÃO	45
FIGURA 12 - PAR DE "DUMMY TANKS" PARA NAFTA DD E NAFTA HDT	46
FIGURA 13 - BLOCO DO PROCESSFLOW PARA ALTERAÇÃO DAS VAZÕES DIÁRIAS	48
FIGURA 14 - BLOCO LÓGICO DE INICIALIZAÇÃO DA RODADA DE SIMULAÇÃO	49
FIGURA 15 - BLOCO LÓGICO DE SELEÇÃO DO TANQUE RECEBEDOR	49
FIGURA 16 - TRECHO DE CÓDIGO EM FLEXSCRIPT PARA SELEÇÃO DO TANQUE RECEBEDOR	50
FIGURA 17 - LÓGICA ESPECÍFICA PARA ENCHIMENTO DO TANQUE 5 (ACESSÓRIO)	50
FIGURA 18 - LÓGICA DE CONSUMO DO CONTEÚDO ACUMULADO NO TANQUE 5 E TANQUE INTERMEDIÁRIO	52
FIGURA 19 - LÓGICA DE DECISÃO DE ALINHAMENTO PARA TANQUE INTERMEDIÁRIO E ENCHIMENTO DO TANQUE RECEBEDOR PRINCIPAL	52
FIGURA 20 - LÓGICA DE DEFINIÇÃO DO TEMPO DE ESPERA ATÉ CHEGADA DE UM NAVIO	53
FIGURA 21 - SUBFLUXO LÓGICO DE EXPEDIÇÃO DE LOTE PARA NAVIOS	54

FIGURA 22 - SUBFLUXO LÓGICO PARA RASTREAMENTO DAS COMPOSIÇÕES (NAFTA DD E HDT) DOS TANQUES	55
FIGURA 23 - RANKING DE ADERÊNCIA DE DISTRIBUIÇÕES PARA A NAFTA HDT	57
FIGURA 24 - HISTOGRAMA DE VAZÕES REAIS DE NAFTA HDT X DISTRIBUIÇÃO JOHNSON SU.....	57
FIGURA 25 - RANKING DE ADERÊNCIA DE DISTRIBUIÇÕES PARA A NAFTA DD	58
FIGURA 26 - HISTOGRAMA DE VAZÕES REAIS DE NAFTA DD X DISTRIBUIÇÃO WEIBULL	58
FIGURA 27 - SEQUÊNCIA DE ENCHIMENTO DOS TANQUES PRINCIPAIS AO LONGO DE UMA RODADA	59
FIGURA 28 - SEQUÊNCIA DE ENCHIMENTO DOS DUMMY TANKS DE NDD AO LONGO DE UMA RODADA	60
FIGURA 29 - USO DA TANCAGEM INTERMEDIÁRIA AO LONGO DE UMA RODADA	61
FIGURA 30 - RELATÓRIO DE RODADAS DO EXPERIMENTER	64
FIGURA 31 - HISTOGRAMA DO ESPAÇO MÉDIO INTERMEDIÁRIO POR CENÁRIO	67
FIGURA 32 - ALGUMAS ESTATÍSTICAS DISPONÍVEIS SOBRE CADA VARIÁVEL DE PERFORMANCE	68
FIGURA 33 - NUVEM DE VALORES E BOXPLOT.....	68

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - EXEMPLO DE NÚMEROS ALEATÓRIOS GERADOS A PARTIR DE DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL	24
TABELA 2 - AUMENTO DA PRECISÃO DOS RESULTADOS COM AUMENTO DO NÚMERO DE OBSERVAÇÕES	25
TABELA 3 - SEGUNDO CONJUNTO DE TESTES PARA ESTIMATIVA DA MÉDIA DA EXPONENCIAL	25
TABELA 4 - EXCERTO DA BASE DE DADOS DE VAZÕES DE NAFTA POR CORRENTE PARA A TANCAGEM FINAL	56
TABELA 5 - RESUMO DAS RODADAS - TEMPO PARA NAVIOS DE 3 A 8 DIAS	65

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	13
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.3.1 Objetivo Geral	16
1.3.2 Objetivos Específicos.....	16
1.4 METODOLOGIA DE PESQUISA	16
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 MODELOS DE SIMULAÇÃO.....	19
2.2 METODOLOGIAS USADAS EM PROJETOS DE SIMULAÇÃO	22
2.3 MÉTODOS DE MONTE CARLO EM SIMULAÇÃO	23
2.4 ANÁLISE DE ADERÊNCIA.....	26
2.5 MÓDULO FLOWWORKS PARA SIMULAÇÃO DE PROCESSOS DE FLUIDOS	28
2.6 REVISÃO DE LITERATURA	31
3 METODOLOGIA.....	38
3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	38
3.2 MODELO CONCEITUAL	43
3.3 DESCRIÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO	44
3.3.1 Descrição do fluxo lógico do modelo	48
3.4 ANÁLISE DE DADOS HISTÓRICOS E AJUSTE DE PARÂMETROS	55
3.5 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL	59
4 RESULTADOS	63
4.1 CONJUNTO DE RODADAS 1 – 3 A 8 DIAS PARA NAVIOS	64
4.2 CONJUNTO DE RODADAS 2 – 2 A 5 DIAS PARA NAVIOS	69

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
5.1 CONCLUSÕES.....	71
5.2 LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS	73
REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A programação de produção de uma cadeia de suprimentos de petróleo e derivados é uma atividade bastante complexa, que envolve o tratamento direto de múltiplas variáveis, diversos agentes de produção e de distribuição e meios de deslocamento de matérias-primas e produtos capazes de interligar esses agentes entre si e aos mercados consumidores. Tanto o planejamento de médio e longo prazo quanto o acompanhamento das operações no nível operacional, no dia a dia, envolvem a tomada constante de decisões que impactam diretamente na capacidade de suprimento dos consumidores e na viabilidade de operação dos atores produtivos e de distribuição, e consequentemente na lucratividade das unidades envolvidas. Essas decisões geralmente precisam ser tomadas de forma rápida e eficaz, sempre envolvendo a assumpção de algum nível de incerteza.

Os diversos programadores envolvidos nas várias etapas da cadeia de suprimentos precisam, então, ter a habilidade de constantemente avaliar as incertezas associados a cada decisão, dentro de um leque de alternativas disponíveis, para então optar pelo caminho que avalie como o de menor risco (aqui considerado como a probabilidade de ocorrência de um evento indesejado mais a consequência desse evento), seja de causar uma queda de suprimento de produto no mercado, ou de falta de matéria-prima para alguma refinaria, ou de gerar um custo que impacte significativamente na rentabilidade de uma unidade produtiva.

Acontece que, na maioria das vezes, a avaliação de incertezas feita pela equipe responsável pelo planejamento e programação da produção das unidades é baseada fundamentalmente na sua experiência e conhecimento do sistema com que lida, na comparação com fatos já ocorridos e na sua expectativa que cada decisão tem de dar certo ou errado. Não é incomum, no entanto, que pessoas diferentes optem por decisões diferentes. Em geral, não há ferramentas que quantifiquem objetivamente as incertezas associadas a cada opção, e essa ausência gera uma lacuna que impossibilita que os tomadores de decisão tenham a plena segurança de que estão seguindo o caminho de menor risco e consigam demonstrar isso de forma efetiva para os demais atores envolvidos.

Ao mesmo tempo, nem sempre a opção de menor incerteza é a de melhor custo-benefício. Muitas vezes, a diminuição da tolerância à incerteza implica em custos maiores, e

cabe aos gestores dessa cadeia avaliar esse trade-off entre incerteza e custo para determinar que tolerância será adotada.

Este trabalho buscará se aprofundar na área de modelos e ferramentas probabilísticas que possam auxiliar na tomada de decisões rotineiras, tentando torná-las mais objetivas, a partir da quantificação das incertezas associadas em diferentes cenários. Mais especificamente, buscará modelar, de maneira quantitativa e probabilística, os processos de recebimento de produção, mistura, armazenamento e expedição de derivados finais em uma refinaria de petróleo.

Dado o tamanho e a complexidade da cadeia logística envolvida, considerando-se a disponibilidade de várias refinarias presentes no Brasil, diversos terminais acumuladores e distribuidores de produtos, dezenas de unidades produtoras de petróleo e centenas de navios utilizados para cabotagem, percebe-se a inviabilidade de adotar um modelo único que avalie todo o sistema de maneira conjunta. Dessa forma, este trabalho será focado especificamente nas operações de movimentação de derivados da Refinaria Abreu e Lima – RNEST, situada no polo de SUAPE, estado de Pernambuco. Todavia, é bastante plausível imaginar que as ferramentas desenvolvidas para esta planta específica podem, posteriormente, com pequenas adaptações, aplicar-se a outras refinarias e a diferentes cenários logísticos como, por exemplo, o abastecimento de petróleo das mesmas.

O modelo desenvolvido deverá ser capaz de representar com bom grau de fidedignidade as variáveis de interesse do sistema real, e isso será feito através de uma ferramenta de simulação. Como aqui será tratado um sistema de escoamento de fluidos, não sendo possível discretizar individualmente as unidades de produto movimentado, nem há intervalos de tempo específicos para a ocorrência dos eventos (ex.: enchimentos / esvaziamento de tanques, trocas de direcionamento de correntes, movimentação para navios), é possível dizer que estaremos trabalhando com um sistema de eventos contínuos.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A indústria de óleo e gás é um dos maiores setores produtivos do Brasil, correspondendo a cerca de 15% do PIB Industrial, e compondo 47% da matriz energética do país. Em 2022, o Brasil era o 9º maior produtor mundial de petróleo, e o 8º colocado em consumo equivalente de petróleo (consumo dos derivados convertidos em volume de matéria prima correspondente).

É reconhecida a forte participação da indústria de petróleo brasileira na composição do cenário econômico do país (IBP, 2022).

A indústria de petróleo é conhecida por movimentar investimentos vultosos desde as etapas de avaliação e estudo de potenciais reservas, perfuração, extração, distribuição logística do petróleo entre terminais e refinarias, processamento e produção de derivados, e nova logística de distribuição dos derivados até a chegada nos consumidores finais. Cada decisão tomada ao longo dessa cadeia, especialmente as associadas ao investimento em infraestrutura, costuma ter impactos avaliados no patamar dos milhões de dólares.

É este o caso das estruturas de armazenamento e logística de refinarias de petróleo. A quantidade e capacidade disponível dos parques de tancagem precisa ser avaliada em detalhe durante o projeto de construção, pois a construção de tanques tem custos bastante elevados e costumam se estender por alguns anos. O mesmo vale para a estrutura de dutos, interligações, bombas, conexões, misturadores, válvulas. É comum que a estrutura definida no projeto de construção seja utilizada ao longo de diversos anos, dada a complexidade envolvida para a realização de reformas estruturais significativas. E, ainda, que as alterações de estrutura mais significativas envolvam novos estudos de escoamento e capacidade, já que também se objetiva que sejam utilizáveis por vários anos. Neste âmbito, para avaliações de longo prazo, faz-se fundamental o uso de ferramentas que embasem a tomada de decisão, preferencialmente que possam avaliar os diversos cenários possíveis e suas incertezas associadas, trazendo de forma mais clara uma visão de custo-benefício para as importantes definições de investimento a ser alocado.

Passando então para um cenário de médio prazo, tem-se uma estrutura logística já disponível e conhecida, e deseja-se avaliar a forma ótima de seu aproveitamento para atender às necessidades previstas do mercado consumidor dos diversos derivados de combustíveis. Esse cenário é avaliado com frequência (diversas vezes ao longo de um mês) e de maneira integrada, considerando todo o sistema de refinarias e logística do país, utilizando um modelo global que representa de forma menos detalhada todas as refinarias, terminais, correntes de petróleo disponíveis, mercados consumidores e estrutura logística.

O input do modelo são todas as capacidades e restrições das unidades produtoras, e a necessidade de escoamento do petróleo produzido e atendimento dos mercados consumidores. O output é uma indicação otimizada (maior retorno financeiro) de alocação dos diferentes óleos para as diferentes unidades de processamento, assim como a indicação dos derivados a produzir, e a eventual necessidade de importação e exportação de petróleo e derivados.

Neste modelo global de otimização do sistema, cada refinaria alimenta uma série de premissas, limites operacionais, capacidades de armazenamento, processamento e produção. O modelo não enxerga em detalhe a tancagem individual de cada refinaria, mas sim a sua capacidade em converter as matérias-primas em produtos finais, como se a refinaria fosse uma “caixa fechada”. Assim, programadores de cada refinaria são responsáveis por avaliar e gerar essas premissas e limites quantitativos e alimentá-los no modelo global. Percebe-se que é fundamental ter estimativas bem calibradas para os diferentes cenários de produção, para que, não só as decisões de produção da refinaria, mas do sistema como um todo, sejam as mais assertivas possíveis.

Cabe ainda destacar o dinamismo dos cenários de programação de produção e logística em um sistema de refinarias de petróleo. Preços variam bruscamente, navios sofrem atrasos e contratempos por mau tempo, unidades de processamento param de forma não planejada, demandas aquecem e desaquecem, tanques precisam ser liberados para manutenção preventiva ou corretiva, e todo o sistema trabalha de forma interligada. Ou seja, uma variação de processo em um local distante pode impactar fortemente na otimização econômica e viabilidade operacional de uma refinaria. É muito importante ter ferramentas que avaliem preliminarmente as incertezas associadas, e que tenham flexibilidade para reavaliar as decisões em mudanças de cenário.

Tudo isso posto, fica claro que a modelagem por simulação computacional de um sistema complexo como a tancagem de derivados de uma refinaria, considerando suas incertezas e aleatoriedade, pode trazer um auxílio fundamental aos decisores especialmente no horizonte de médio prazo (planejamento mensal de produção, avaliação de premissas, capacidades e limitações) e longo prazo (decisões de investimento em tancagem e infraestrutura logística). Ainda, como será visto ao longo do trabalho, supre uma lacuna acadêmica de trabalhos que desenvolvam modelos de simulação para sistemas da indústria de óleo e gás com uma metodologia direcionada para eventos contínuos e quantificação de incertezas de cenários logísticos e de programação de produção.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo de simulação de eventos contínuos de sistemas de recebimento, mistura, armazenamento e expedição de derivados em refinarias de petróleo, agregando avaliações probabilísticas das diversas variáveis aleatórias envolvidas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar revisão de literatura para avaliar o estado da arte em simulações de processos logísticos de combustíveis em refinarias de petróleo;
- Realizar levantamento de dados para análise estatística sobre as principais variáveis que interferem na capacidade de escoamento dos sistemas logísticos (vazões, características de qualidade dos produtos, tempo entre chegada de navios, probabilidade de ocorrência de eventos externos indesejados, entre outros) e ajuste das melhores distribuições de probabilidade;
- Modelar o sistema de tancagem de nafta petroquímica / gasolina da Refinaria Abreu e Lima (RNEST), considerando as qualidades das correntes, possibilidade de recebimento de produto externo, mistura e concorrência entre as duas campanhas;
- Validar o resultado das simulações com dados históricos de produção da refinaria, criando embasamento para tomada de decisão de cenários futuros, como limites de produção, avaliação de melhor uso da tancagem e necessidade de tancagem adicional para atendimento de novas demandas.

1.4 METODOLOGIA DE PESQUISA

Quanto à abordagem, esta pesquisa se classifica como quantitativa. As variáveis de interesse (vazões, qualidades, volumes, tempos) serão estudadas e avaliadas com uma abordagem estatística e probabilística. A inclusão de um modelo de simulação objetiva trazer

resultados quantificados de incerteza associada aos diferentes cenários de produção possíveis, capacidades de produção e movimentação.

Quanto à natureza, esta pesquisa se classifica como aplicada, pois visa estudar especificamente o problema de armazenamento e movimentação de derivados de petróleo da Refinaria Abreu e Lima, podendo ser futuramente aproveitado e expandido para outras refinarias ou indústrias similares. O estudo objetiva desenvolver uma ferramenta que traga insumos para decisões reais de médio e longo prazo para a gestão da refinaria.

Gil (2008) adota uma classificação de pesquisas em 3 grupos: exploratórias, descritivas e explicativas. As exploratórias normalmente abrangem um conhecimento mais preliminar de um problema e menor rigidez no planejamento, buscando esclarecer e modificar conceitos e ideias. Normalmente não utilizam técnicas quantitativas de análise ou amostragem de dados. As pesquisas descritivas objetivam evidenciar as características de uma dada população ou fenômeno, ou identificar relações entre variáveis. Por fim, as pesquisas explicativas são as que mais se aprofundam no problema e no conhecimento da realidade, buscando identificar a razão das coisas. É considerada a mais complexa entre as três. Este trabalho, considerando esta classificação, pode ser enquadrado como uma pesquisa explicativa, visto que utilizar-se-á do método experimental, por simulação para modelar, quantificar e compreender um problema real complexo, e o impacto trazido pelas relações de causa e efeito entre as variáveis.

Quanto aos procedimentos adotados, esta pesquisa se classifica como um estudo de caso, visto que será focada em caracterizar de forma aprofundada um objeto específico (no caso o sistema específico de armazenamento e movimentação de derivados de uma refinaria), buscando permitir o seu conhecimento amplo e detalhado (Gil, 2008).

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além deste Capítulo de Introdução, o restante deste trabalho será apresentado com a seguinte estrutura:

- o Capítulo 2 apresenta uma base teórica geral sobre modelos de simulação, métodos de Monte Carlo, análise de aderência em estatística, uma breve descrição do módulo FloWorks do FlexSim para simulação de processos, e finaliza com uma revisão de literatura de trabalhos similares, além de comentários sobre as lacunas encontradas na literatura pesquisada, que o presente trabalho procura preencher;

- o Capítulo 3 foca na descrição e detalhamento do problema aqui tratado, tanto o problema físico do mundo real, quanto a abordagem de modelagem que foi utilizada para tratá-lo. Ainda, traz uma análise dos dados históricos utilizados e ajuste dos parâmetros das distribuições de probabilidade;
- o Capítulo 4 mostra os resultados das rodadas de simulação realizadas, com seus respectivos comentários;
- o Capítulo 5 traz as conclusões do trabalho, suas contribuições, lacunas, e sugestões para trabalhos futuros relacionados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MODELOS DE SIMULAÇÃO

A simulação ocupa um lugar muito alto no ranking das ferramentas mais utilizadas no campo da Pesquisa Operacional (Hillier, 2001). A ferramenta envolve usar um computador para imitar um comportamento real de um equipamento, processo, ou sistema inteiro. A simulação pode ser bastante utilizada, por exemplo, para realizar análises de risco em sistemas financeiros a partir da “imitação” repetida da evolução de transações financeiras e seus resultados possíveis. Ela também é amplamente utilizada para analisar a operação contínua de sistemas estocásticos. Nesse caso, o computador gera números aleatórios, que são convertidos em eventos aleatórios, e armazena a sequência dessas ocorrências, como se reproduzissem o sistema real que está fisicamente operando, para avaliar sua performance. Dessa forma, o computador consegue simular muitas vezes anos de operação em um tempo real de segundos, avaliar designs, modos e condições alternativos de operação e comparar esses diversos cenários antes de implementar de fato um.

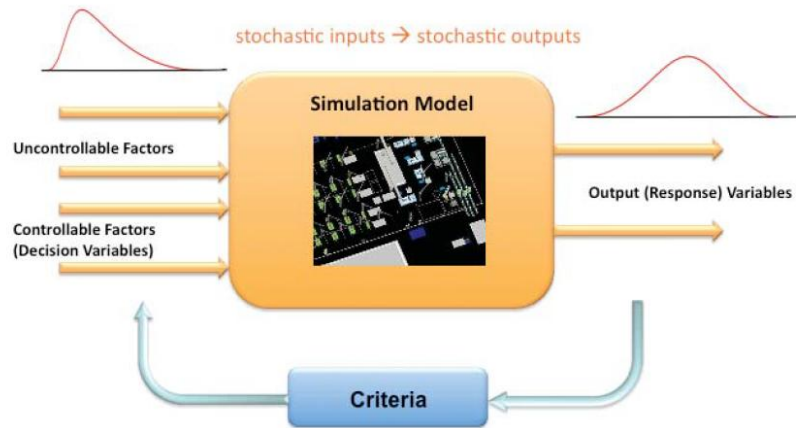
Hillier (2001) divide as ferramentas de simulação em 2 macro-categorias: simulação de eventos discretos e simulação contínua. Na simulação de eventos discretos, as mudanças de estado no sistema ocorrem instantaneamente e de maneira abrupta em pontos aleatórios no tempo. Em exemplo simples é um sistema de filas, onde o estado do sistema é o número de clientes no sistema, e os eventos discretos que alteram esse estado são a chegada de um novo cliente ou saída de um cliente que já foi atendido. Na simulação contínua as mudanças no estado do sistema acontecem continuamente no tempo. Em um voo, por exemplo, a posição corrente da aeronave pode representar o estado, e essa está em contínua alteração. Um outro exemplo seria o recebimento de um líquido em um tanque, onde o estado atual do sistema seria a quantidade de líquido no tanque, problema que será diretamente tratado nesta pesquisa. Simulações contínuas costumam ter por base o uso de equações diferenciais para descrever a taxa de mudança nas variáveis de estado, o que tende a tornar as análises significativamente complexas. Entretanto, frequentemente é possível aproximar as mudanças contínuas no sistema por mudanças discretas ocasionais, permitindo o uso de simulação de eventos discretos para modelar o comportamento de sistemas contínuos, e simplificando bastante sua análise (Hillier, 2001).

Rubinstein (2016) lista de maneira genérica algumas situações em que a simulação é uma ferramenta adequada para resolução de problemas. Quando o sistema é muito complexo para ser modelado por uma equação matemática (muitos sistemas no mundo real caem nessa situação); quando a solução matemática formulada é impossível de ser resolvida analiticamente; quando se deseja utilizar a simulação com fins pedagógicos ou de treinamento; quando se deseja ganhar conhecimento aprofundado e insights sobre um problema, muitas vezes o desenvolvimento do modelo de simulação gera aprendizado e conhecimentos mais valiosos do que simplesmente seu resultado.

Beaverstock et al (2017) explicam que quase todos os eventos no mundo real irão acontecer diferentemente a cada ocorrência. Isso porque cada evento é único e influenciado por inúmeras variáveis do seu ambiente. Em simulação, esse fenômeno é caracterizado por eventos aleatórios, definidos por distribuições de probabilidade, que podem ser estimadas com base em dados históricos, ou por profissionais com experiência na área. Um modelo de simulação que se utiliza de variáveis aleatórias é considerado um modelo estocástico. As entradas do modelo se dividem entre variáveis controláveis (ou de decisão) e não controláveis (aleatórias). Em função das variáveis de entrada estocásticas, as variáveis de saída também o serão. Ou seja, o modelo não gera resultados determinísticos, o que requer bastante cuidado na sua avaliação. Por exemplo, uma decisão jamais deve ser baseada em uma ou poucas rodadas do modelo, pois poucas rodadas podem gerar resultados que sem encontram nos extremos da distribuição de probabilidades, não representando os cenários mais prováveis. Qualquer simulação que utilize eventos aleatórios deve ser rodada ou por um longo período de tempo ou por uma grande quantidade de vezes. A Figura 1 representa de forma genérica um modelo de simulação estocástico.

Ross (2012) descreve o que chama de abordagem da simulação de eventos discretos. Ele lista os elementos chave dessa abordagem como sendo as variáveis e os eventos. O processo de simulação envolve o acompanhamento de certas variáveis ao longo de uma sequência de ocorrências de eventos. O autor divide essas variáveis em 3 tipos: as de tempo, que representam a quantidade de tempo decorrido na simulação; as de contagem, que representam a quantidade de eventos ocorridos em dado tempo; e as de estado, que descrevem o estado do sistema simulado no momento do tempo. Todas estas variáveis são alteradas quando ocorre um evento.

Figura 1 -Representação de modelo de simulação estocástico



Fonte: Beaverstock et al (2017)

A indústria 4.0, termo referente à 4ª revolução industrial, tem como principal foco o uso da tecnologia nas indústrias, sendo tanto nas operações rotineiras quanto em planejamentos estratégicos. Rojko (2017) traz a ideia de que a indústria 4.0 possui seis dimensões, entre elas: estratégia e organização, fábrica inteligente, operação inteligente, produtos inteligentes, serviços baseados em dados e recursos humanos. Entrando no contexto de fábrica inteligente, algumas das abordagens muito utilizadas são a modelagem digital 3D e os gêmeos digitais, proporcionando trabalhar com sistemas complexos reais por meio de simulação. Ou seja, o gêmeo digital baseia-se na ideia de que uma construção informacional digital sobre um sistema físico poderia ser criada como uma entidade por conta própria (Grieves and Vickers, 2017). Assim, a partir do conceito de simulação de eventos discretos e contínuos, também é comentado por Grieves e Vieckers (2017) que esse tipo de ferramenta aumenta o leque de possibilidades estratégicas a partir da habilidade de modelar e simular de forma digital.

A ferramenta utilizada para simulação neste trabalho será o FlexSim, mais especificamente o seu módulo voltado para simulação de fluidos, o FloWorks. O FlexSim é um gêmeo digital que permite modelagem, simulação, previsão e visualização em sistemas de negócios de uma variedade de indústrias: manufatura, manuseio e armazenamento de material, mineração, logística, entre outros (FLEXSIM, 2023). O manual relata, entre os ganhos que podem ser obtidos com seu uso: testar métodos para alocação de recurso mais eficiente, reduzir tempos de espera, minimizar efeitos negativos de indisponibilidades / falhas, estabelecer tamanho ótimo de lotes, estudar o efeito de tempos de setup, entre outros.

Sabendo que a simulação de processos ocorre de forma estocástica, ou seja, há aleatoriedade probabilística no modelo, o software busca reduzir incertezas por meio da ferramenta Experimenter, que foca em gerar a mesma simulação milhares de vezes para obter resultados mais próximos à realidade possível, além de também testar cenários alternativos e compará-los (FLEXSIM, 2023).

2.2 METODOLOGIAS USADAS EM PROJETOS DE SIMULAÇÃO

Montevecchi et al (2015) fizeram uma revisão das diversas metodologias usadas para desenvolver projetos de simulação. Os autores constataram a existência de distintas propostas de sequenciamento lógico de etapas para o bom desenvolvimento de um projeto, cada uma com suas características, porém todas guardando o objetivo de auxiliar os analistas de simulação a uma melhor condução dos projetos. O artigo mostra que a metodologia proposta por Montevecchi et al (2010) é uma das mais completas em termos de quantidades de etapas presentes na metodologia.

A Figura 2 resume a sequência de passos proposta na metodologia de Montevecchi et al (2010). Ela é dividida em 3 grandes blocos: concepção, implementação e análise. Em linhas gerais, este trabalho buscará seguir esta sequência de atividades até a obtenção do resultado final.

A etapa de definição dos objetivos e sistema estará descrita na Seção 3.1.

As etapas referentes ao modelo conceitual (criação, validação e documentação) correspondem à Seção 3.2.

A modelagem dos dados de entrada estará descrita na Seção 3.4.

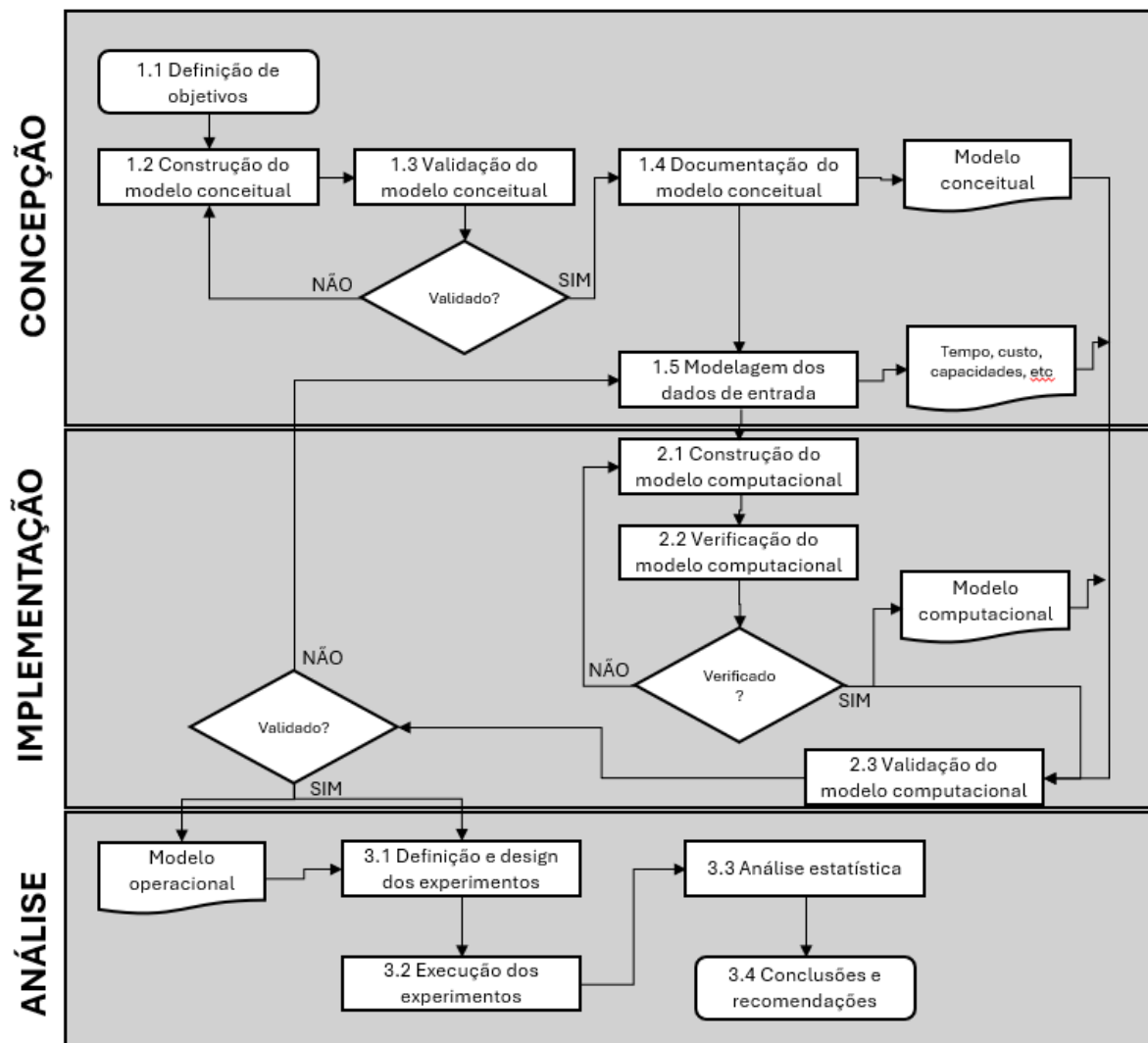
A construção do modelo computacional construído será detalhada na Seção 3.3.

As etapas de verificação e validação do modelo estarão descritas na Seção 3.5.

As fases de definição e execução dos experimentos, bem como sua análise estatística, serão detalhadas no Capítulo 4.

Por fim, as conclusões e recomendações fazem parte do Capítulo 5.

Figura 2 - Metodologia para projetos de simulação de Montevechi et al (2010)



Fonte: traduzida de Montevechi et al (2015)

2.3 MÉTODOS DE MONTE CARLO EM SIMULAÇÃO

Métodos de Monte Carlo, de maneira geral, consistem em realizar repetidos experimentos de modelos que possuem variáveis aleatórias como input, de modo a obter resultados numéricos consistentes. Hillier (2001) descreve as técnicas de Monte Carlo como técnicas de redução de variância. O autor destaca a importância da aplicação dessas técnicas em modelos de simulação para aumentar a precisão (isto é, diminuir a variância) dos resultados encontrados.

O método é mais facilmente explicado a partir de um exemplo: considere-se a distribuição exponencial, que tem função densidade de probabilidade conhecida pela fórmula

$f(x) = e^{-x}$, e Função de Distribuição Acumulada (FDA) $F(x) = 1 - e^{-x}$. É sabido que a média dessa distribuição é igual a 1. Supondo que não conhecêssemos essa média, e que seu valor não fosse facilmente calculado de forma analítica, gostaríamos de estimar o seu valor usando simulação, com avaliação de um número determinado de repetições geradas com base em números aleatórios.

Para gerar valores aleatórios da variável desejada seguindo uma determinada distribuição de probabilidade, faz-se necessário usar a sua FDA inversa. No caso da exponencial, a FDA inversa é dada por $F_{inv}(x) = -\ln(1 - x)$. A Tabela 1 mostra exemplo de 10 valores aleatórios que seguem a distribuição exponencial, gerados em Excel com base na função geradora de números aleatórios entre 0 e 1.

Tabela 1 - Exemplo de números aleatórios gerados a partir de distribuição exponencial

Observação (i)	Número Aleatório (Ri)	Variável observada (Xi = -ln(1-Ri))
1	0,3083	0,3686
2	0,7799	1,5137
3	0,3515	0,4331
4	0,5896	0,8906
5	0,2766	0,3238
6	0,0954	0,1003
7	0,0040	0,0040
8	0,3264	0,3951
9	0,5577	0,8158
10	0,5000	0,6931

Fonte: Elaborada pelo autor

Ao calcularmos diretamente a média desses números, chegamos a um valor de 0,5538, muito longe da média real da distribuição, que é de um. Contudo, ao se aumentar o número de observações aleatórias para valores bem maiores, observa-se que o valor de média encontrado se aproxima cada vez mais do valor real, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Aumento da precisão dos resultados com aumento do número de observações

Número de repetições	Média	Erro	Desvio Padrão
10	0,5538	-44,6%	0,316
100	1,0515	5,2%	0,100
1000	1,0090	0,9%	0,032
10000	1,0048	0,5%	0,010

Fonte: Elaborada pelo autor

Isso acontece porque o desvio padrão da média amostral é dado por $1/\sqrt{n}$ (HILLIER, 2001), valor que cai bastante ao se aumentar significativamente o número de observações n . Observa-se que entre 1.000 e 10.000 observações o erro do estimador da média já atinge valores bem baixos. Interessante ressaltar ainda que, como os experimentos são baseados em números aleatórios, ao repetirmos o método utilizando 10.000 observações diferentes, chegaremos a resultados diferentes, porém o estimador de média continua atingindo valores de erro baixos entre 1.000 e 10.000 observações, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Segundo conjunto de testes para estimativa da média da exponencial

Número de repetições	Média	Erro	Desvio Padrão
10	0,6879	-31,2%	0,316
100	1,0418	4,2%	0,100
1000	1,0100	1,0%	0,032
10000	0,9907	-0,9%	0,010

Fonte: Elaborada pelo autor

Esta metodologia é bastante aplicada em modelos de simulação, que tem variáveis aleatórias entre seus inputs. Primeiro, utiliza-se uma distribuição de probabilidade para a variável em questão, que pode ser obtida por ajuste de dados históricos, por exemplo. Utiliza-se a FDA inversa para gerar valores aleatórios seguindo a distribuição definida, a partir de um gerador de números aleatórios entre 0 e 1. Assim, as variáveis apresentarão um comportamento aleatório conforme a distribuição desejada. Em função disso, a análise de uma ou poucas rodadas de simulação é insuficiente para reproduzir o comportamento real do sistema e apresentar resultados consistentes. Por isso, faz-se necessário repetir a simulação um número

grande de vezes, e analisar os resultados médios e o formato de distribuição das variáveis de saída que se deseja obter.

No modelo utilizado neste trabalho, por exemplo, serão modeladas como variáveis aleatórias de entrada as vazões específicas de cada uma das correntes de fluido (nafta hidrotratada e nafta de destilação direta) e o tempo de chegada de um navio para carregamento após conclusão do volume de um lote de nafta para expedição.

O FlexSim já vem equipado com a ferramenta Experimenter, cujo objetivo é automatizar a rodada repetitiva de um modelo sob diferentes inputs, coletar e resumir os resultados, buscando evidenciar a sensibilidade das principais variáveis acompanhadas aos parâmetros de entrada sujeitos a variação aleatória (FLEXSIM, 2023).

2.4 ANÁLISE DE ADERÊNCIA

Em análise estatística, testes de aderência são utilizados para ajudar a decidir se uma amostra se parece com um tipo particular de população. O teste qui-quadrado, por exemplo, pode ser utilizado para comparar frequências de amostra com qualquer distribuição de probabilidade. Apesar de serem fáceis de entender, até o surgimento de planilhas eletrônicas e softwares estatísticos, os cálculos eram muito cansativos (DOANE, 2014).

O FlexSim vem equipado com sua própria ferramenta de análise estatística de dados, o ExpertFit. A ferramenta determina automaticamente e com precisão a distribuição de probabilidade que melhor se ajusta a um conjunto de dados em alguns segundos. Para tanto, são aplicados testes de aderência qui-quadrado, de Kolmogorov-Smirnov e de Anderson-Darling, e testadas 40 distribuições de probabilidade diferentes (AVERILL-LAW & ASSOCIATES, 2024)

O teste qui-quadrado para ajuste de aderência utiliza a estatística qui-quadrado para decidir se uma amostra é de uma distribuição especificada (ex.: multinomial, uniforme, Poisson ou normal). Os parâmetros da distribuição ajustada (a média, por exemplo) podem ser especificados a priori, mas normalmente são estimados a partir da amostra. Os graus de liberdade para o teste de aderência são $c-m-1$, onde c é o número de categorias e m o número de parâmetros estimados. A estatística qui-quadrado é calculada da seguinte forma (DOANE, 2014):

$$X_{calc}^2 = \sum_{j=1}^c \frac{[f_j - e_j]^2}{e_j}$$

Onde f_j é a frequência real identificada na amostra de cada uma das c categorias e e_j é a frequência esperada calculada com base na curva de distribuição específica que se está querendo testar. Se os dados amostrais tiverem uma boa aderência à distribuição, a estatística de teste terá valor próximo de 0. O teste de hipóteses é montado com as seguintes hipóteses:

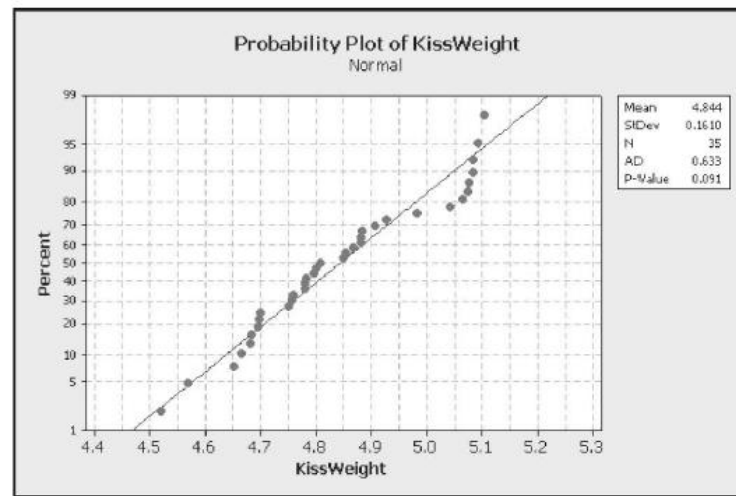
H_0 : A amostra segue a distribuição de frequência testada;

H_1 : A amostra não segue a distribuição de frequência testada.

Caso o valor da estatística de teste exceda o valor crítico de qui-quadrado, identificado em uma tabela de referência com os graus de liberdade e o nível de confiança desejado, rejeita-se a H_0 , concluindo-se que a distribuição da amostra não é estatisticamente aderente à distribuição de frequência testada. Caso contrário, aceita-se a H_0 , concluindo-se pela boa aderência entre as distribuições.

O teste de Anderson-Darling é amplamente utilizado para casos de não normalidade dos dados, por causa do seu poder. Ele é feito no computador, pois exige a Função de Distribuição Acumulada (FDA) inversa da distribuição hipotética que se quer testar (DOANE, 2014). O teste utiliza um gráfico de probabilidade, que deve se aproximar muito de uma reta no caso de uma boa aderência dos dados à distribuição hipotética. A estatística do teste mede a distância quadrada ponderada entre as distribuições real e hipotética. A fórmula de seu cálculo é bastante complexa, e por isso se diz que normalmente ele é aplicado com auxílio computacional. O teste de Anderson-Darling é mais poderoso que o qui-quadrado, se estiverem disponíveis dados brutos, porque ele trata as observações individualmente, e adicionalmente traz o benefício da visualização gráfica pelo gráfico de probabilidades, que permite identificar mais facilmente valores discrepantes entre a amostra e a distribuição hipotética testada. A Figura a seguir mostra um exemplo de gráfico de probabilidades em teste de Anderson Darling.

Figura 3 - Exemplo de gráfico de probabilidades em teste de Anderson-Darling



Fonte: Doane (2014)

Um teste alternativo é o de Kolmogorov-Smirnov (K-S). A estatística de teste D é a maior diferença absoluta entre as frequências relativas acumuladas reais e as esperadas dos n valores dos dados. E estatística é calculada pela fórmula:

$$D = \text{Max } |F_a - F_c|$$

Onde F_a é a frequência acumulada real na observação i , e F_c é a frequência acumulada esperada na mesma observação, calculada pela assumpção de que os dados vieram daquela distribuição hipotética. O teste de Kolmogorov-Smirnov assume que nenhum parâmetro seja estimado. Este teste não é recomendado para dados agrupados, pois pode ser menos poderoso que o teste qui-quadrado (DOANE, 2014).

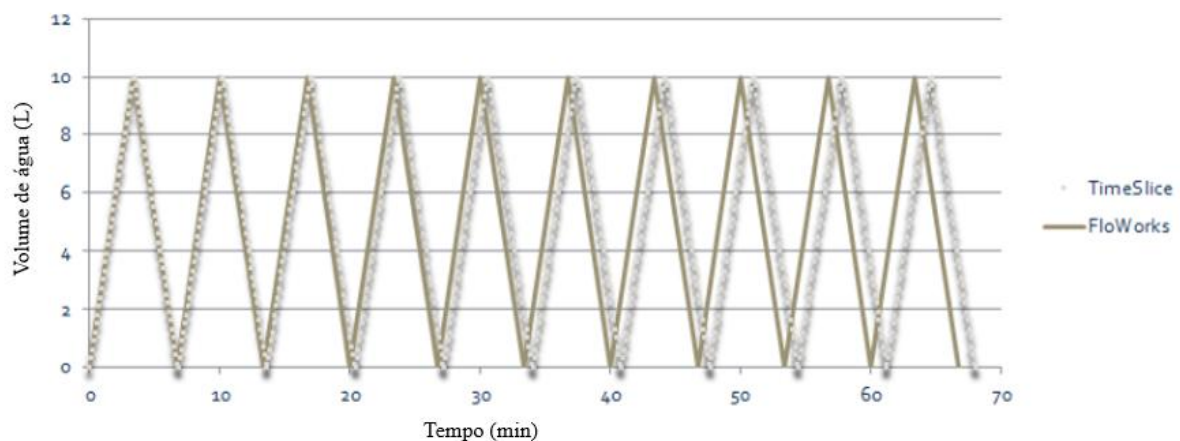
2.5 MÓDULO FLOWWORKS PARA SIMULAÇÃO DE PROCESSOS DE FLUIDOS

O FloWorks é um módulo integrado ao FlexSim, desenvolvido pela empresa Talumis para auxiliar na modelagem e simulação de sistemas onde o material se movimenta num fluxo contínuo, ao contrário da biblioteca normal do FlexSim, que é desenhada para materiais que se movem em quantidades discretas (caixas, peças, pessoas, etc.). De acordo com a página virtual da empresa (TALUMIS, 2024), o simulador é um poderoso módulo do FlexSim para analisar com precisão e otimizar a logística de granéis, fluidos e gases em uma cadeia de suprimentos,

trazendo uma abordagem que combina eventos discretos e processos contínuos para realização de “cálculos contínuos direcionados por eventos”.

Apesar de existir uma biblioteca específica para fluidos, o FlexSim tem suas mudanças baseadas em cronômetro (tempo de simulação), enquanto o FloWorks é baseado em eventos (FLEXSIM, 2023). É como se só houvesse movimentação de material em eventos específicos, como: mudanças de vazão, enchimento ou esvaziamento de um tanque ou qualquer gatilho definido pelo usuário. Observa-se que o FloWorks faz uma aproximação discreta para representar um sistema de fluxo contínuo. Ainda assim, o manual reporta um ganho de precisão e de performance em relação à abordagem baseada em cronômetro da biblioteca regular do FlexSim. Como exemplo, é demonstrado um gráfico de enchimento de um tanque de 10 litros, enchido e esvaziado consecutivamente por 10 vezes, a uma vazão de 3 litros/minuto. A abordagem por time slicing, neste processo, performou 682 cálculos, com um erro total relativo próximo de 2%. Já a abordagem baseada em evento performou apenas 20 cálculos (eventos de esvaziamento ou enchimento do tanque), e atingiu um erro total menor que $10^{-8}\%$.

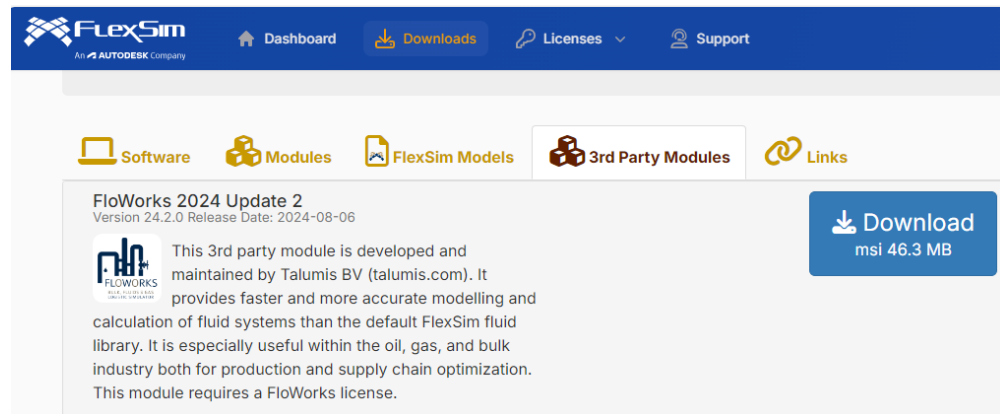
Figura 4 - Acompanhamento da simulação utilizando time-slicing x baseada em eventos



Fonte: FLEXSIM (2023)

O FloWorks aparece como um módulo adicional desenvolvido por terceiros, disponível para download dentro da página virtual do FlexSim, como mostrado na Figura 5.

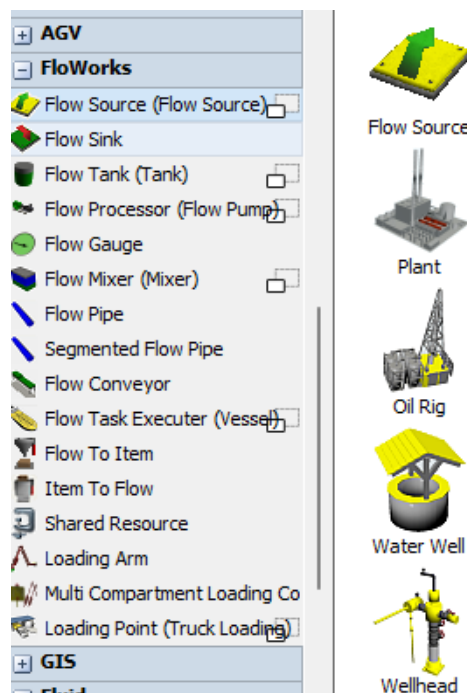
Figura 5 - Página de download do módulo FloWorks para o FlexSim



Fonte: FLEXSIM (2023)

Ao baixar e instalar este módulo, uma nova biblioteca de recursos passa a ser exibida no FlexSim, incluindo, por exemplo: tanques de fluido, fontes (*sources*) e sumidouros (*sinks*), tubulações, navios e braços de carregamento, misturadores, entre outros, conforme mostrado na Figura 6. As opções de sources disponíveis (ex.: plantas de processo, sondas / plataformas, cabeças de poço) mostram que a ferramenta tem realmente um intuito voltado para modelar problemas da indústria de óleo e gás.

Figura 6 - Biblioteca de recursos do FloWorks



Fonte: FLEXSIM (2023)

Os recursos específicos utilizados para desenvolver o modelo deste trabalho, bem como o fluxo lógico aplicado para definir o relacionamento e sequenciamento de utilização desses recursos, serão descritos em detalhes no Capítulo 3.

2.6 REVISÃO DE LITERATURA

A seguir, descrevem-se alguns trabalhos que utilizaram ferramentas de simulação para tratar problemas de logística e armazenamento na indústria de refino de petróleo e similares. Para busca pelas referências que possuem similaridade com o trabalho aqui desenvolvido, foram utilizadas palavras-chave como: simulação de eventos contínuos, FloWorks, FlexSim, simulação em indústria de óleo e gás, simulação em processos contínuos, e estes mesmos termos foram pesquisados também em inglês. Foram consultadas ao longo de 2024 bases de artigos científicos, como Web of Science, e periódicos específicos correlatos ao tema de estudo, como Journal of Simulation, Simulation Modelling Practice and Theory, Winter Simulation Conference, Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional e Rio Oil & Gas. Porém ao longo das buscas observou-se que o tipo de problema aqui tratado, bem como o uso desta ferramenta específica para sua modelagem e análise, e quantificação de incertezas não havia sido ainda tratado em nenhum trabalho científico encontrado, reforçando o caráter inovador desta pesquisa, e que a mesma buscará preencher esta lacuna identificada na base acadêmica. Aqui mostraremos apenas os artigos em que foi identificada maior proximidade com o trabalho aqui desenvolvido.

Afonso et al (2020) desenvolveram um modelo de simulação de eventos discretos para avaliação de cenários de composição de lotes de derivados de petróleo para carregamento por navios. O simulador comercial utilizado foi o ARENA. O objetivo principal da simulação era avaliar potenciais alterações em 3 variáveis principais dos cenários: a capacidade da tancagem de armazenamento da refinaria, a vazão de produção, e o tamanho dos lotes carregados no navio, enxergando o impacto dessas variáveis na capacidade de produção anual. A criticidade da avaliação reside no fato de que a produção pode ser interrompida por falta de capacidade de armazenamento, e por incertezas e restrições nas operações de produção, armazenamento e transporte. O modelo foi utilizado no sentido de fornecer insumos para tomada de decisão na elaboração da política de estoques. O trabalho ressalta a importância da possibilidade de análise de diversos cenários sem a necessidade de implementá-los, o que seria muito custoso. Entre as conclusões, identificou-se o ganho de trabalhar com menores lotes de carregamento para

embarque marítimo. Também forneceu insumo para eventuais estudos de viabilidade técnica e econômica para investimentos adicionais em tancagem, e aumento da vazão de produção.

Isaksen et al (2018) elaboraram um modelo para tratar do correto dimensionamento da capacidade das instalações de um terminal logístico da indústria de óleo e gás, considerando a decisão ainda na etapa de projeto. Os autores destacaram o desafio envolvido, dado um conjunto de incertezas operacionais, e a alta volatilidade envolvida nas etapas de suprimento e demanda do terminal. O trabalho utilizou uma abordagem integrativa para otimizar o dimensionamento do terminal, onde partes da função objetivo foram resolvidas com auxílio de simulação de eventos discretos. Foi realizado um estudo de caso para um terminal ainda em construção no norte da Noruega. Uma variedade de fatores, tais como instabilidades climáticas, variações de perfil de produção, tipos de navios aliviadores e píeres de carregamento foi avaliada, buscando trazer o melhor embasamento para a decisão de projeto do terminal, especialmente o número de tanques necessário e o seu tamanho. A função objetivo desenhada para a otimização considerou a minimização dos custos totais em um dado período de tempo, incluindo tanto os custos de investimento (CAPEX) quanto os de operação (OPEX), considerando como variável por exemplo potenciais perdas de receita por interrupção na produção por falta de capacidade de armazenamento no terminal. O software comercial de simulação utilizado foi o ExtendSim. Os autores concluíram que as avaliações em simulação trouxeram valiosos insights na quantificação de parâmetros de performance do terminal e como eles são influenciados por alterações nas variáveis de entrada. Ainda reportaram as dificuldades de se encontrar um único ponto ótimo com os resultados rodados, porém ainda assim foi possível gerar informação valiosa para avaliações de custo-benefício.

Oliveira e Arruda (2013) desenvolveram um modelo para planejar de forma otimizada o acúmulo de petróleo nas refinarias do estado de São Paulo REPLAN e REVAP num período anterior a uma interrupção do suprimento causado por parada no duto OSVAT I, responsável por abastecer ambas as refinarias. As incertezas presentes na vazão de transferência do duto e no consumo de petróleo de cada refinaria foram consideradas um processo estocástico e modeladas por uma cadeia de Markov. Foi realizado levantamento histórico e análise estatística dos dados da refinaria para alimentar o modelo, e usados modelos de programação linear para otimizar a melhor composição de petróleos a ser recebida no período pré-parada (divididos em grupos de características como “leve”, “médio”, “pesado”, “extrapesado”, entre outras) de modo a maximizar a rentabilidade da operação da refinaria durante o período de parada.

Nunes et al (2012) apresentaram uma formulação matemática baseada em Programação Estocástica Linear Inteira Mista para modelar um sistema de transferência de petróleo entre terminal e refinaria via duto. O modelo foi aplicado com dados reais para otimização da programação do suprimento de petróleo da REPAR via transferências do terminal de São Francisco de Sul pelo duto OSPAR, tendo como variáveis de decisão e tamanho e sequenciamento dos lotes, buscando minimizar os custos do modal dutoviário (horários de pico de preço da energia) e marítimo (sobrestadia de navios).

Paolucci et al (2002) utilizaram uma abordagem baseada em simulação para tratar o problema de distribuição de descargas de petróleo dos navios petroleiros para tanques de terminais e refinarias, considerando como principais aspectos de *scheduling*: a sequência de chegada dos navios no porto, e a sequência de processamento de cada lote de petróleo na refinaria. O objetivo era utilizar a ferramenta tanto como suporte de aprendizado para o treinamento de pessoal quanto como um sistema de suporte à decisão. A interface com o usuário e o modelo de simulação foram desenvolvidos na plataforma Extend V4. Os dados gerados pelo modelo foram comparados com dados históricos de armazenamento e processamento de petróleo de uma refinaria de pequeno porte. Os autores concluíram que a simulação prévia de alternativas de descarga e seus impactos, antes da chegada do navio cargueiro, permitia otimizar diversos fatores de performance, sendo o principal deles a quantidade de petróleo que a companhia teria que revender por falta de espaço na tancagem de recebimento.

Barlas e Ozgun (2018) fizeram um interessante trabalho de comparação de performance entre simulação de eventos discretos e simulação de eventos contínuos para sistemas de filas, especialmente em ambientes onde ocorre feedback (ex.: ritmo de chegadas no sistema dependente do seu estado de congestionamento). Os autores lembram que a natureza discreta e estocástica de problemas típicos de filas normalmente chama por simulação de eventos discretos. Porém, a simulação de eventos contínuos pode ser aplicável para sistemas grandes e complexos de filas. O trabalho realizou experimentos de comparação em diversos tipos de sistemas de filas, desde o mais simples M/M/2 até sistemas grandes e complexos. Conforme esperado, observou-se que, nos sistemas mais simples as duas abordagens de modelagens geraram resultados bem diferentes em seus estados estacionários. Ao se aumentar a escala do problema, aumentando significativamente o número de servidores e a taxa de chegadas, as abordagens de simulação de eventos discretos e contínuos se aproximaram bastante. A principal contribuição reportada foi mostrar que foram identificadas configurações de sistemas de filas onde a simulação contínua se mostrou melhor, onde tipicamente se aplicaria, sem muita

análise, a simulação de eventos discretos. Um exemplo potencial seria um call center com grande quantidade de atendentes e clientes, onde os clientes desistem da chamada quando sabem que a fila de espera para atendimento está muito grande.

Kim et al (2020) utilizaram simulação de eventos contínuos para modelar operações complexas em uma refinaria de biocombustíveis, envolvendo carga, descarga e tratamento de matérias-primas divididas em 9 macroprocessos na produção de etanol a partir de grãos de milho. O objetivo era estudar e otimizar a capacidade de refino da planta. O modelo de simulação foi elaborado utilizando o software AnyLogic, e a otimização do número de reatores para hidrólise e fermentação, diretamente associado à capacidade total da planta, foi realizada com uso do software OptQuest. A proposta integrando o software de simulação com o software de otimização foi capaz de atingir o que os autores chamaram de solução “quase ótima”, indicando o número de reatores que maximizaria o lucro da planta para um dado cenário de quantidade de matéria-prima a processar. A maior dificuldade reportada foi o tempo gasto para desenvolver um modelo de simulação de eventos contínuos, sendo necessário associar uma equipe hábil em modelagem por simulação com a engenharia do processo.

Hong et al (2020) utilizaram uma discretização de um sistema de fluxo contínuo para modelar um sistema contendo simultaneamente fluxos discretos e contínuos. No caso em questão, o principal sistema de transporte em uma mina subterrânea de carvão, onde há um fluxo contínuo de produção de carvão através das escavadoras e esteiras durante intervalos de tempo específicos, mas todo o material escavado precisa ser elevado para a superfície por elevadores, e isso é feito de forma discreta. A discretização permitiu aos autores continuar usando as ferramentas de simulação de eventos discretos. O objetivo das simulações foi avaliar a eficiência de diferentes estratégias de empilhamento, e determinar a capacidade do sistema de atender alvos de performance de longo prazo, além de identificar e tratar os principais gargalos do sistema.

Spieckermann e Stobbe (2012) realizaram um apanhado sobre aplicações de simulação de eventos discretos em indústrias químicas. Os autores ressaltaram que os processos de indústrias químicas são em sua maioria contínuos, e por isso a simulação de eventos discretos não é tão difundida quanto nos processos de manufatura. Os autores expõem 3 exemplos de aplicação onde artifícios foram aplicados para fechar a lacuna entre a simulação de eventos discretos e as necessidades para modelagem de um processo químico de produção, utilizando o software PlantSimulation da Siemens nos 3 casos. Os exemplos compreendem a otimização de uma cadeia de suprimentos global de um produto, o processo de suporte ao design de uma nova

e grande planta de processo e a determinação de capacidade de produção de um processo selecionado dentro de uma planta de produção. Os autores concluem que, apesar de ser uma área com desafios específicos para implementação, existem abordagens que permitem a aplicação com sucesso de simulação de eventos discretos a processos naturalmente contínuos.

Scrivano et al (2023) apresentaram uma proposta de metodologia computacionalmente eficiente para simular o fluxo contínuo de partes individuais através de sistemas de manufatura genéricos, considerando a possibilidade de múltiplos “*loops*”, ou fluxos de retorno, no processo, máquinas de montagem e desmontagem (unindo vários fluxos em um, ou separando um em vários), layout genérico múltiplas possibilidades de distribuição de tempo entre eventos. Os autores utilizaram o artifício de avançar o relógio de simulação para o próximo momento de evento, podendo este ser uma mudança de estado de cada máquina (disponível / indisponível) componente do layout, ou o enchimento ou esvaziamento de cada um dos estoques intermediários. Essa metodologia, quando comparada com a simulação de eventos discretos com fluxo discreto das partes, foi em média 15 vezes mais rápida, e ainda 110 vezes mais rápida do que a análise de sistemas de fluxo contínuo, em função da redução do número de eventos discretos que precisam ser simulados. A abordagem pareceu similar à metodologia de análise dos eventos aplicada pelo FloWorks, já que considera a possibilidade contínua de eventos ao longo do tempo, porém “salta” para momentos no tempo em que é conhecida a ocorrência de eventos. Complementarmente, foi utilizada teoria dos grafos para auxiliar na identificação de máquinas causando atrasos ou gargalos, ou falta de suprimento em algum dos pontos do sistema. Os autores utilizaram a metodologia para avaliar diferentes layouts com um número variável M de máquinas sujeitas a falha, e B de “*buffers*” (estoques intermediários) com capacidade limitada. O ganho de velocidade computacional reportado permitiu a realização de testes de avaliação de performance de várias alternativas de realocação de capacidades de estoques intermediários, chegando a uma indicação de solução ótima. Foi usado como exemplo de aplicação um sistema de manufatura de peças de gaveta.

Wang et al (2017) modelaram processos contínuos de manufatura de produtos farmacêuticos através de fluxogramas, visando obter melhor análise e otimização dos processos. A metodologia proposta se dividia em 3 etapas: análise de sensibilidade, buscando identificar quais variáveis de entrada do processo tinham maior impacto nas variáveis de saída; análise de viabilidade, buscando limitar o espaço de análise a uma região de soluções viáveis, e reduzir a complexidade do modelo; e, por fim, otimização das variáveis operacionais de processo, tendo como função objetivo o custo mínimo. Os autores lembram os diversos

benefícios de se utilizar processos contínuos na indústria farmacêutica, tais como os ganhos de escala ao utilizar o mesmo equipamento para grandes quantidades produzidas, a redução do custo unitário de capital, o ganho de controle sobre o processo, a redução de estoques intermediários e minimização de erros humanos.

Taccine et al (2023) utilizaram simulação de eventos discretos em Salabim, um software “*open-source*” baseado em *Python*, para identificar a melhor estratégia de armazenamento de produtos em um galpão, para uma indústria de telhas de cerâmica na Itália. A Itália é o maior exportador mundial desse material em termos econômicos, respondendo por cerca de 28% do total de exportações mundiais. Os autores descrevem entre as vantagens do Salabim, além do fato de ser “*open-source*” e da flexibilidade associada à linguagem *Python*, o fato de possuir extensa documentação, arquitetura orientada a objetos, e apresentar animações. As áreas de armazenamento na indústria de cerâmica são normalmente padronizadas e com formato regular, podendo ser representadas como uma matriz, onde cada célula é capaz de armazenar um determinado número de *pallets* empilhados. A política de armazenamento, portanto, consiste em designar *pallets* para células, dividir *pallets* em diferentes classes e facilitar as atividades de coleta posterior por empilhadeiras. A classificação do estoque se faz particularmente fundamental em função da ocorrência de baixa homogeneidade no produto, que no caso da cerâmica pode refletir variações na matéria prima utilizada ou no processo produtivo. O estudo comparou estratégias de classificação do estoque baseadas na destinação final do produto e nas características técnicas de produção, concluindo pela maior eficiência da primeira, tanto pelo menor uso de espaço do armazém, quanto pela redução do tempo de enchimento e probabilidades de paradas de produção, e redução do tempo de coleta pelas empilhadeiras.

Montevechi et al (2023) propuseram um método de metamodelagem adaptativa como ferramenta de otimização de simulação, buscando atingir melhores resultados com uma quantidade menor de experimentos. O método combina técnicas de *machine learning* com metaheurística, permitindo a identificação das regiões mais importantes do espaço de busca e solução, e indicando uma exploração mais eficiente desse espaço. Os autores mais uma vez destacam a importância da simulação de eventos discretos em processos decisórios, ressaltando, porém o intenso uso computacional necessário, especialmente com o aumento da complexidade dos modelos. A metamodelagem entra como uma ferramenta para identificar a relação entre variáveis de entrada e de saída do modelo, gerando uma versão simplificada e com maior nível de abstração do modelo, e que pode ser otimizada a um menor custo computacional. A metodologia proposta foi aplicada em um estudo de caso de manufatura no setor de “fast-

fashion”, otimizando um modelo de simulação de eventos discretos com o objetivo de atingir a melhor alocação de recursos para atender uma curva semanal de previsão de demanda.

Mota, Kramer e Leite (2024) propuseram um modelo de Programação Não Linear Inteira Mista para buscar otimizar o problema de distribuição de lotes de petróleo recebidos por navios entre tanques de uma refinaria, formulação de misturas entre diferentes tipos de petróleo, e envio para processamento como matéria-prima na unidade de destilação, tendo como função objetivo a maximização na carga processada da refinaria em um dado período de tempo. O modelo tratou restrições como o teor de enxofre e de nafta da mistura de petróleo processada, as vazões limites de processamento por cada tanque, e o tempo necessário de preparação de um tanque após recebimento de navio, levando em conta as qualidades específicas de cada tipo de petróleo com previsão de recebimento em um horizonte de curto prazo.

Gomes, Leite e Moura (2024) apresentaram os resultados do modelo em desenvolvimento para simulação de eventos contínuos, utilizando FlexSim e FloWorks, para representar a tancagem de nafta petroquímica de uma refinaria real, considerando a mistura entre correntes tratadas e não tratadas, os limites de qualidade impostos por essa mistura, a capacidade de tancagem disponível e a logística de carregamento de navios. Os resultados do modelo foram melhorados, ampliados e aprofundados no trabalho aqui apresentado.

3 METODOLOGIA

3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A Refinaria Abreu e Lima, mais conhecida como RNEST (oriundo de Refinaria do Nordeste), é a primeira refinaria construída pela Petrobras após um período de mais de 30 anos sem obras desse tipo. Foi concebida com o objetivo principal de suprir o mercado nacional de diesel S10 (tipo de diesel que apresenta além de outras particularidades uma quantidade de 10 mg/kg de enxofre) do Brasil, produto de alto valor agregado e que tem demanda atual e futura com elevado crescimento em função da substituir outros tipos de diesel com maior teor de enxofre. Todo o trem produtivo foi pensado para maximizar o rendimento volumétrico de diesel S10.

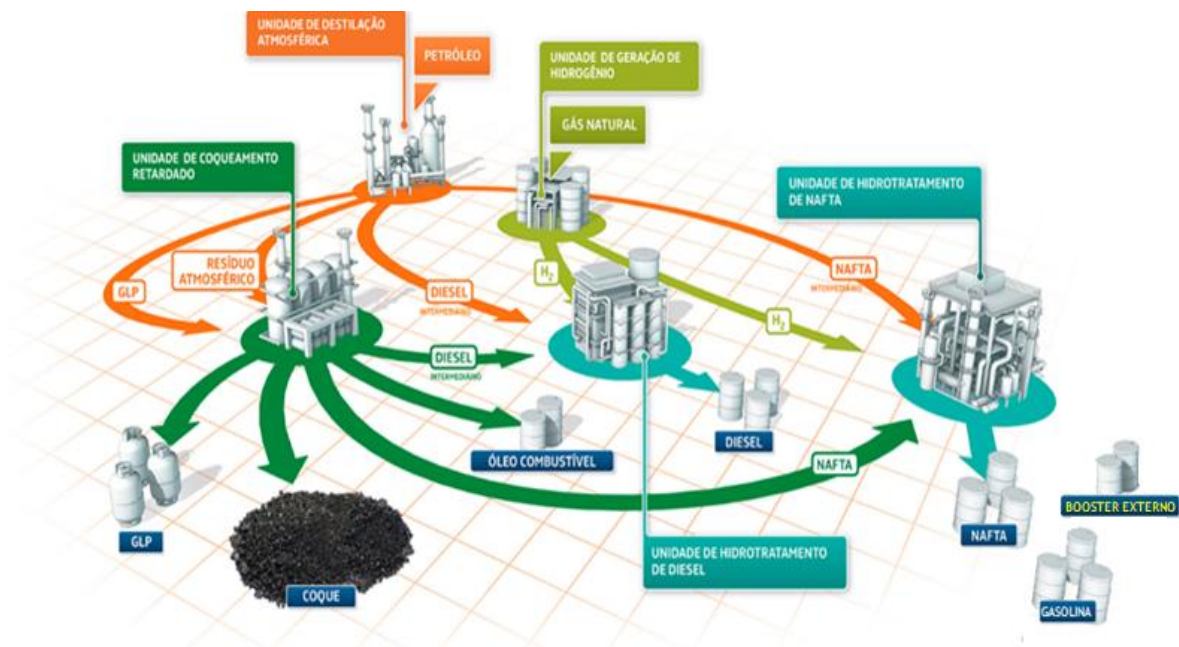
Devido a questões diversas que causaram atrasos nas obras, e ainda restrições ambientais, atualmente a refinaria opera com apenas um trem de produção, sendo que o projeto original previa 2 trens de igual capacidade e com as mesmas unidades de processo.

De forma bastante simplificada, cada trem conta com uma Unidade de Destilação Atmosférica (UDA), uma Unidade de Coqueamento Retardado (UCR), uma unidade de Hidrotratamento de Diesel (HDT-D) e uma de Hidrotratamento de Nafta (HDT-N). A UDA é o início de todo o processo da refinaria, recebendo o petróleo cru dos tanques e separando-o nas frações de gás combustível, GLP, nafta, diesel e resíduo atmosférico (RAT). A UCR recebe a corrente mais pesada da UDA (RAT), e converte em mais gás combustível, GLP, nafta e diesel via processos de craqueamento térmico, produzindo ainda gasóleo pesado e coque sólido. Os HDT's fazem o tratamento final da nafta e do diesel, substituindo principalmente os heteroátomos de enxofre e nitrogênio por hidrogênio, enquadrando assim a qualidade dos produtos finais. É devido à elevada capacidade dos HDT's da RNEST que é possível transformar todo o diesel produzido em S10, sem necessidade de gerar grades de diesel com maior teor de enxofre. A

Figura 7 mostra de forma simplificada o esquema de refino de um trem de produção da RNEST.

Todo o petróleo processado na RNEST é recebido por navios, via cabotagem. Os navios descarregam no porto de SUAPE no Pier de Granéis Líquidos 3A (PGL-3A), o qual é de uso exclusivo da RNEST. As operações de navios de petróleo, porém, concorrem com as de diesel S10 expedido para navios pela própria refinaria, não sendo possíveis operações simultâneas. O petróleo é transferido do navio para a tancagem da refinaria através de um duto de 46'' e aproximadamente 11 km de comprimento, que comporta uma vazão de até 7.600 m³/h.

Figura 7 – Esquema de refino da RNEST



Fonte: Arquivo pessoal do autor

O leque de derivados produzido na refinaria é relativamente pequeno em comparação às demais refinarias do sistema, dado que esta foi projetada especificamente tendo o diesel S10 como foco principal. Os produtos finais da RNEST são: GLP, nafta petroquímica, diesel S10, óleo combustível e coque. Haveria ainda um sexto produto, o ácido sulfúrico, decorrente da operação da unidade de abatimento de emissões atmosféricas (SNOX). Esta unidade, porém, ainda não entrou em operação devido a atrasos e interrupções de obra. Após a partida da refinaria foi ainda estudado e implementado um projeto para viabilizar formulação de gasolina,

utilizando parte da tancagem de nafta petroquímica e a mistura com uma corrente externa de alta octanagem (booster de octanagem), acrescentando à cesta de produtos finais da refinaria a gasolina. A seguir, descrevem-se em mais detalhes os sistemas de tancagem de nafta petroquímica e óleo combustível, os quais serão o escopo de modelagem deste trabalho.

A tancagem de nafta petroquímica é composta por 4 tanques, com volume total máximo de líquido de 25 mil m³ por tanque. Desse volume, uma parte é o lastro mínimo do tanque (5 mil m³). Esta é a quantidade mínima de produto que deve sempre permanecer no tanque por questões de segurança operacional. A Figura 8 mostra uma vista superior da tancagem de nafta petroquímica da refinaria.

Figura 8 - Vista superior da tancagem de nafta petroquímica



Fonte: Arquivo pessoal do autor

Há ainda um quinto tanque menor, de 10 mil m³ (sendo 2 mil m³ de lastro), que pode receber produção das unidades e transferir para os demais tanques, mas não pode expedir para navio. Este tanque tinha o objetivo inicial de enviar nafta petroquímica para a carga da unidade de geração de hidrogênio (UGH). Porém, como essa alternativa não vem sendo utilizada, o tanque foi aproveitado para trazer uma flexibilidade adicional ao sistema de nafta petroquímica.

Todos os tanques podem receber 2 correntes diferentes das unidades de produção: a nafta hidrotratada da U33 (HDT de nafta), cuja vazão varia normalmente entre 1.800 e 2.500 m³/d, e a nafta destilada não hidrotratada da U11 (destilação atmosférica), cuja vazão varia normalmente de 0 a 800 m³/d. Esta corrente não tratada é comumente chamada de nafta DD (em referência a Destilação Direta). A existência da nafta não hidrotratada é decorrência de a produção total de nafta da U11 e U21 por vezes ser maior do que a capacidade total de tratamento da U33, sendo necessário bypassar uma parte da corrente de nafta da U11 por fora do HDT de nafta. Quando isso ocorre, essa parcela de nafta da U11 é alinhada para o mesmo

tanque que recebe a produção de nafta hidrotratada da U33, pois não há possibilidade de alinhamento para segregar as correntes para tanques distintos.

A nafta não hidrotratada da U11 possui características de qualidade (especialmente teor de enxofre e dissulfeto de carbono) que fazem com que a sua incorporação na mistura final da nafta petroquímica seja limitada, de modo a não exceder os limites de especificação estabelecidos pela ANP ou fixados em contrato com o cliente final. Esse limite varia em função da variação do teor desses contaminantes na nafta da U11 (que é uma decorrência do petróleo processado), mas costuma ficar numa média de 15%.

Após o enchimento, cada tanque é amostrado para realizar um conjunto de análises em laboratório, conforme definido em manual da ANP e contrato com o cliente final, e emissão de um certificado de qualidade.

A nafta petroquímica é expedida em lotes, normalmente de 40 mil m³ (2 tanques) para navios, por um duto com vazão de 750 m³/h. O tempo entre ter um lote pronto e ter um navio atracado disponível para carregar pode variar de 1 a 10 dias. O duto de nafta petroquímica se interliga ao Pier de Granéis Líquidos 2 (PGL-2) do porto de Suape, onde os navios atracam para carregar o produto. A Figura 9 mostra uma vista superior da disposição dos píeres no porto de Suape.

Figura 9 - Vista superior dos terminais e porto de Suape



Fonte: Arquivo pessoal do autor

Conforme dito anteriormente, após a entrada em operação da RNEST, foram realizados estudos para viabilizar a formulação de gasolina, inicialmente não prevista, na refinaria. Para tanto, foi necessário implementar um projeto para tornar o duto de nafta petroquímica bidirecional, isto é, podendo também receber produtos de navio no sentido de Suape para a refinaria, além de expedir da refinaria para Suape.

A formulação de gasolina utiliza a mesma tancagem de nafta petroquímica da RNEST. Para enquadramento das propriedades da gasolina, especialmente a octanagem, é necessário o recebimento de uma corrente externa com octanagem elevada, chamada booster de octanagem, produzida em outras refinarias do sistema que possuem unidades de processo com essa capacidade. O booster é então recebido por navios que atracam no PGL-2 e descarregam para a refinaria pelo mesmo duto de nafta petroquímica, em lotes que variam normalmente entre 15 e 30 mil m³. Recebido na tancagem da RNEST, o booster é então misturado com a nafta hidrotratada da U33 (pode eventualmente receber um pouco de nafta não tratada da U11 junto) e amostrado para certificação considerando as especificações da gasolina.

As propriedades críticas da gasolina são diferentes das da nafta petroquímica. Dentre muitas outras, o teor de enxofre é mais restritivo, e há a restrição de octanagem mínima, que faz com que o limite máximo de nafta da RNEST na composição da gasolina varie entre 25 e 50%, a depender da qualidade do booster externo. Após certificada, a gasolina é também expedida pelo duto de nafta petroquímica para o PGL-2, onde é carregada por navios.

Percebe-se que há uma concorrência de uso da tancagem e do duto pelas campanhas de nafta petroquímica e gasolina. A diferença de qualidades entre as correntes faz com que seja difícil fazer a transição de um tanque de um produto para o outro, de modo que é ideal definir tanques específicos para cada campanha. Os cenários de demanda variam, de modo que ora é mais demandado maximizar a produção de gasolina, ora o contrário. As movimentações no duto de produtos com qualidades diferentes também exigem o uso de interfaces, de modo que não haja contaminação entre as campanhas.

O simulador de tancagem pode, então, ajudar a avaliar em diferentes cenários qual o melhor uso da tancagem disponível para maximizar a produção mais demandada, considerando as possibilidades de variação de qualidade, vazões, suprimento externo e disponibilidade de navios para carregamento dos lotes.

3.2 MODELO CONCEITUAL

O fluxograma mostrado na Figura 10 traz uma representação conceitual do problema real definido na seção anterior.

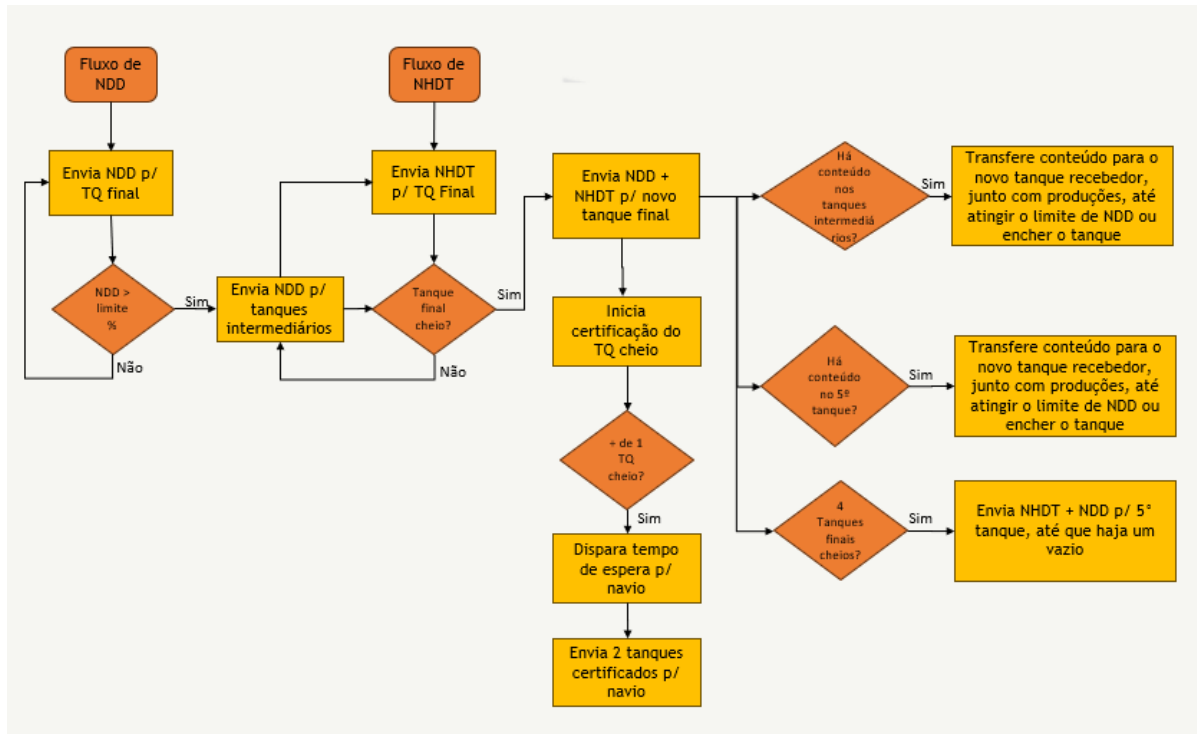
Inicialmente, as duas correntes são alinhadas em paralelo para um mesmo tanque final recebedor. Enquanto a quantidade de nafta DD no tanque não tiver atingido seu limite percentual definido, ela seguirá indo para o mesmo tanque. Ao atingir esse limite, a nafta DD precisa ser desviada para tanques intermediários.

A nafta hidrotratada (NHDT), por sua vez, segue alinhada para o tanque final até o seu enchimento.

Ao concluir o enchimento de um tanque, se inicia o sem processo de certificação (análises em laboratório), as produções de NDD e NHDT são alinhadas para um novo tanque recebedor, e neste momento são realizados 4 testes lógicos:

- Caso já haja mais de um tanque final cheio, um gatilho dispara o início do tempo de espera até um navio carregador do lote (2 tanques). Após esse tempo de espera, inicia-se a expedição destes 2 tanques para o navio carregador;
- Caso haja conteúdo (NDD) previamente acumulado nos tanques intermediários, este passa a ser transferido para o novo tanque recebedor em paralelo com o alinhamento das produções de NDD+NHDT, até que o limite de NDD do novo tanque seja atingido;
- Caso haja conteúdo (NDD + NHDT) previamente acumulado no 5º tanque (NDD+NHDT), este passa a ser transferido para o novo tanque recebedor em paralelo com o alinhamento das produções de NDD+NHDT, até que o limite de NDD do novo tanque seja atingido OU até que o tanque recebedor encha;
- Caso os 4 tanques finais recebedores estejam cheios, as produções de NDD e NHDT precisam ser alinhadas para o 5º tanque, até que haja espaço novamente em um dos 4 tanques finais (carregamento em navios).

Figura 10 - Fluxograma com modelo conceitual



Fonte: elaborada pelo autor.

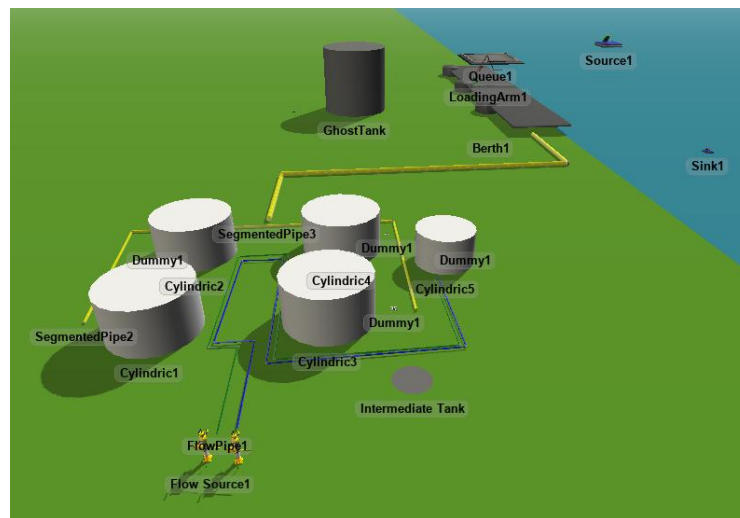
3.3 DESCRIÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo de simulação elaborado foi implementado em software FlexSim, utilizando ainda o módulo FloWorks, já descrito anteriormente nesse trabalho. A Figura 11 mostra uma visão geral do modelo.

Na figura, é possível observar que o modelo conta com:

- 4 tanques principais de volume maior (25.000 m³), para armazenamento da mistura de nafta hidrotratada com nafta DD;
- 1 tanque acessório com volume menor de 10.000 m³, que só é utilizado em caso de falta de espaço de armazenamento nos 4 tanques principais;
- 1 área de armazenamento intermediário, aqui sem volume definido, denominada “Intermediate Tank”. Esta área de armazenamento foi mantida com volume livre para funcionar como o grau de liberdade do modelo, evitando rodadas “travadas” em pouco tempo, e terá seu volume mais profundamente analisado no Capítulo 4, de descrição de resultados;
- 2 fontes de entrada de correntes (sources), sendo uma de nafta hidrotratada, e outra de nafta DD;

Figura 11 - Vista geral do modelo de simulação



Fonte: Elaborada pelo autor

- 1 “tanque fantasma” (denominado GhostTank), tanque virtual adicionado no modelo exclusivamente com o objetivo de monitorar a composição das misturas expedidas para navio;
- 1 sistema de braço de carregamento, berço de atracação e fila para viabilizar a operação de carregamento dos navios;
- 1 fonte de geração (source) para surgimento de navios e uma fonte de saída do modelo (sink) para destinação dos navios;
- Interligações por “*pipelines*” entre as sources, a tancagem, e o sistema de carregamento para navios.

O processo se inicia com a geração de valores de vazão aleatórios para as duas fontes de entrada, nafta DD e nafta hidrotratada. As curvas de distribuição de probabilidade geradas para cada corrente foram baseadas em dados históricos, o que será descrito em detalhes na Seção 3.3. As vazões são sorteadas no modelo e variam uma vez por dia.

As correntes são alinhadas simultaneamente para um mesmo tanque recebedor de produção, um dos 4 tanques principais. O sequenciamento entre os 4 tanques não tem relevância significativa, aqui obedecendo simplesmente a ordem numérica dos tanques (1, 2, 3, 4).

Conforme relatado na descrição do problema, com o objetivo de manter parâmetros específicos de qualidade negociados com o cliente final, aqui definimos que cada tanque só pode, no momento de seu enchimento para certificação, conter um percentual máximo de nafta DD. Este valor percentual pode variar em função de características intrínsecas da própria nafta DD, que por sua vez variam, por exemplo, com quais correntes de petróleo estão sendo

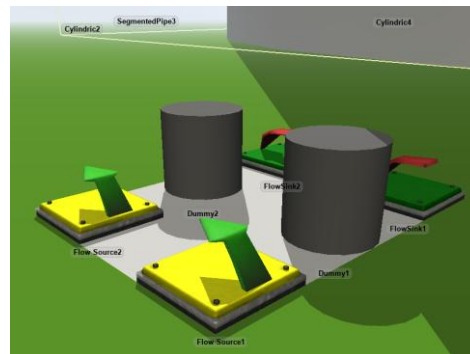
processadas na Unidade de Destilação Atmosférica. Neste modelo, estabelecemos inicialmente um limite de 15% de nafta DD por tanque. A variação deste limite percentual e seus impactos nos resultados serão analisados via análises de sensibilidade.

Para representar no modelo esta limitação da presença de nafta DD por tanque, a alternativa encontrada foi a criação de “*dummy tanks*”, tanques virtuais que representam especificamente a quantidade de nafta DD e de nafta HDT de cada um dos tanques reais. Ou seja, cada tanque real possui um “*dummy tank*” que representa sua quantidade armazenada de nafta DD, e outro que representa sua quantidade de nafta HDT. A limitação do percentual de nafta DD é então atribuída como um volume máximo no “*dummy tank*” de nafta DD, já que o volume total dos tanques reais é fixo, e este modelo não considerou a opção de certificar e expedir tanques parcialmente cheios, somente tanques totalmente cheios. Para o caso inicialmente proposto, por exemplo, o volume dos “*dummy tanks*” de nafta DD para os tanques maiores de nafta é de 3.750 m³ (15% de 25.000 m³).

A

Figura 12 mostra um exemplo de par de “*dummy tanks*” ao lado do tanque principal o qual representam.

Figura 12 - Par de "dummy tanks" para nafta DD e nafta HDT



Fonte: Elaborada pelo autor

Respeitando esta modelagem, quando um “*dummy tank*” de nafta DD é cheio, significa que aquele tanque principal não pode mais receber nafta DD até o seu enchimento, do contrário ele encherá e será certificado com um percentual de nafta DD superior ao definido como limite. O tanque principal bloqueia então seu recebimento de nafta DD, e passa a receber exclusivamente nafta HDT, diluindo a nafta DD já armazenada até o momento. Por outro lado, a “*source*” de nafta DD não para em nenhum momento de gerar produto, o que reflete a condição real de processo de uma planta que mantém operação contínua. Desse modo, é

necessário desviar a corrente de nafta DD para a área de armazenamento intermediário, ou tancagem intermediária, até que o tanque principal seja cheio, e a produção de nafta HDT seja alinhada para um novo tanque principal vazio, que ainda terá espaço em seu “*dummy tank*” de nafta DD.

Ao mesmo tempo, essa tancagem intermediária precisa ter uma saída para o produto lá acumulado, do contrário iria acumular produto indefinidamente, gerando uma necessidade de espaço infinito. Assim, quando a produção de nafta HDT é alinhada para um novo tanque vazio, o tanque intermediário também pode enviar o seu produto acumulado para o novo tanque receptor, numa vazão de 500 m³/d, junto com a “*source*” de nafta DD, até que o novo tanque receptor atinja o volume máximo de nafta DD em seu “*dummy tank*” específico.

O tanque de nafta de menor volume (que aparece denominado como *Cylindric 5*) funciona apenas como um backup em caso de enchimento simultâneo dos outros 4 tanques e falta de espaço de armazenamento na tancagem. Esse tanque não tem interligação para envio direto para navios. Ou seja, o volume eventualmente acumulado nele precisa ser posteriormente transferido para um dos 4 tanques principais, para em seguida ser expedido para navios. Como este não é um tanque de produto final, não foi modelado um limite específico para seu percentual de nafta DD. Porém, o mesmo possui os *dummy tanks* correspondentes, de modo a manter a rastreabilidade de sua composição, e representá-la adequadamente ao transferir seu produto para os demais tanques.

Conforme relatado na descrição do problema, considerou-se aqui o carregamento do produto final em navios de 40 mil m³. Ou seja, os navios carregam 2 tanques cheios por vez (o volume disponível por tanque é de 20 mil m³, descontado-se o lastro de 5 mil m³). Na modelagem, após um tanque atingir o enchimento, aguarda um período de 2 dias (tempo atribuído à amostragem e certificação do produto em laboratório), e então soma um contador de tanques certificados. Quando o contador atinge 2 tanques certificados, dispara uma lógica de chamada do navio para carregamento. O tempo entre a chamada do navio e sua chegada de fato para carregamento é aleatório, pois depende de disponibilidade de navios no sistema, condições de tempo, entre diversos outros fatores. Neste trabalho, este tempo foi modelado por uma distribuição uniforme (inicialmente variando entre 1 e 10 dias).

Após a chegada do navio, o produto dos 2 tanques é expedido, com vazão definida na etapa de descrição do problema (750 m³/h), limitada pela capacidade das bombas e sistema de dutos de expedição, inicialmente para o “tanque fantasma”. Este tanque virtual tem o objetivo apenas de armazenar a composição total do lote que foi expedido para navio para fins de análise dos resultados, já que não foi encontrada no FlexSim nenhuma alternativa de monitoramento

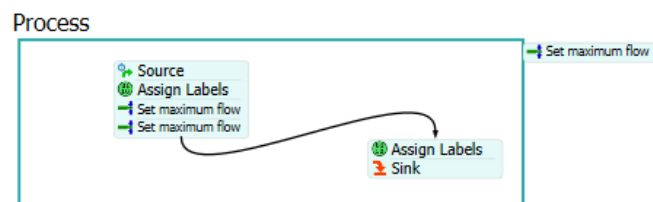
da composição no navio. Assim como todos os demais tanques, também foi necessário criar um par de *dummy tanks* para acompanhamento da composição do “tanque fantasma”. Após enchimento do “tanque fantasma”, o mesmo é então expedido para navio com vazão virtualmente infinita, já que a modelagem de restrição de vazão já foi feita no envio para este tanque, concluindo a retirada de produto e o ciclo do modelo.

3.3.1 Descrição do fluxo lógico do modelo

Em complemento à modelagem 3D, o FlexSim traz uma ferramenta adicional que permite acrescentar lógicas de programação ao modelo não englobadas nas funcionalidades disponíveis nos itens do modelo 3D. Essa modelagem, do fluxo lógico é realizada no módulo *ProcessFlow*. Aqui serão descritos os blocos de fluxo lógico elaborados para o modelo de simulação em estudo, que o fazem funcionar de acordo com o comportamento desejado para representar melhor o problema real.

O primeiro bloco lógico é responsável por gerar as variações diárias de vazão de nafta DD e nafta HDT seguindo as distribuições de probabilidade definidas para cada uma (cuja descrição está na Seção 3.3). A fonte, descrita como *Source*, gera um *token* diariamente que passa pelo controle do fluxo de vazões, alterando o valor diário da vazão. Em seguida, o token é eliminado numa sink, conforme mostrado na Figura 13.

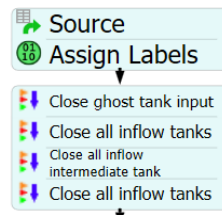
Figura 13 - Bloco do ProcessFlow para alteração das vazões diárias



Fonte: Elaborada pelo autor

O segundo bloco lógico é responsável pela inicialização da simulação, e gera no início da rodada um token único, que aciona uma lógica de fechamento das portas de entrada de todos os tanques do modelo. Esse trecho do bloco lógico principal é mostrado na Figura 14.

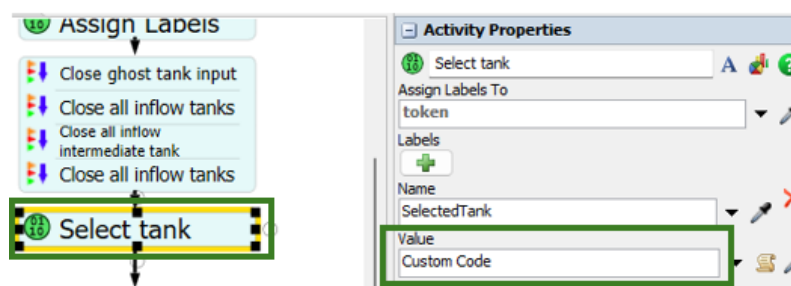
Figura 14 - Bloco lógico de inicialização da rodada de simulação



Fonte: Elaborada pelo autor

Em seguida, o token vai para uma etapa de seleção de qual tanque irá receber a produção das duas correntes. Nessa etapa, a lógica escolhe um tanque vazio para receber produção, aqui entendendo-se como tanque vazio aquele que tenha volume de produto igual ou menor que o seu lastro mínimo. Em caso de mais de um tanque vazio, a sequência de recebimento respeitará a ordem numérica dos tanques (1, 2, 3, 4 ou 5), de modo que o 5º tanque, o de menor volume, só receberá produção no caso de todos os outros 4 tanques estarem indisponíveis (não vazios). Para implementar essa lógica, fez-se necessário o uso de outra flexibilidade adicional do *FlexSim*, a escrita de código de programação (código customizado, ou *Custom Code*) em linguagem *FlexScript*. As Figura 15 mostra a etapa do bloco lógico que seleciona o tanque receptor, destacando a definição do seu valor por um código customizado de programação, e a Figura 16 mostra um trecho deste código.

Figura 15 - Bloco lógico de seleção do tanque receptor



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 16 - Trecho de código em FlexScript para seleção do tanque receptor

```

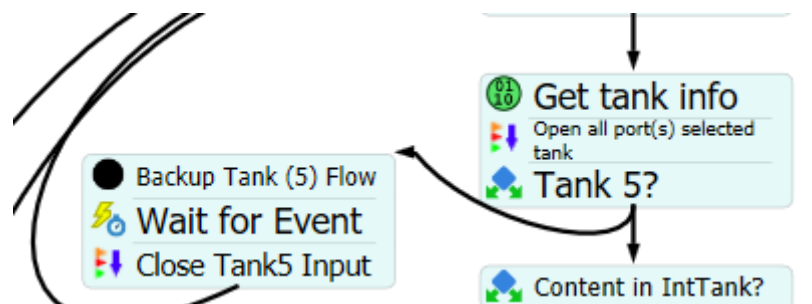
Select tank - Label Value
7 treenode processFlow = ownerobject(activity);
8
9
10 double epsilon = 1e-8;
11 //FOR TANK 1
12 if(token.Tank1.as(FlowTank).content <= 5000 + epsilon )
13 {
14     //Select tank 1
15     return token.Tank1;
16 }
17 if(token.Tank1.as(FlowTank).content == 5000)
18 {
19     //Select tank 1
20     return token.Tank1;
21 }
22 // FOR TANK 2
23 if(token.Tank2.as(FlowTank).content <= 5000 + epsilon)
24 {
25     //Select tank 2
26     return token.Tank2;
27 }
28
29 if(token.Tank2.as(FlowTank).content == 5000)
30 {
31     //Select tank 2
32     return token.Tank2;

```

Fonte: Elaborada pelo autor

A etapa a seguir da lógica abre todas as portas de entrada do tanque escolhido para recebimento, possibilitando que ele inicie seu enchimento. Já em seguida, o modelo passa por uma decisão condicional: caso o tanque escolhido seja o tanque 5 (o tanque acessório, de menor volume), a lógica vai para um caminho alternativo. Neste caminho, define-se que o tanque 5 só receberá produção até o momento que algum dos outros tanques esteja vazio novamente. Isso é modelado com o critério de que o tanque 5 receberá produção até que o *GhostTank* esteja cheio. Isso é viável porque o enchimento do GhostTank representa a conclusão de uma expedição de 2 tanques para navio, implicando em que nesse momento 2 tanques maiores estarão novamente vazios e disponíveis para receber produção. A Figura 17 mostra o trecho do bloco lógico que modela esta lógica.

Figura 17 - Lógica específica para enchimento do tanque 5 (acessório)



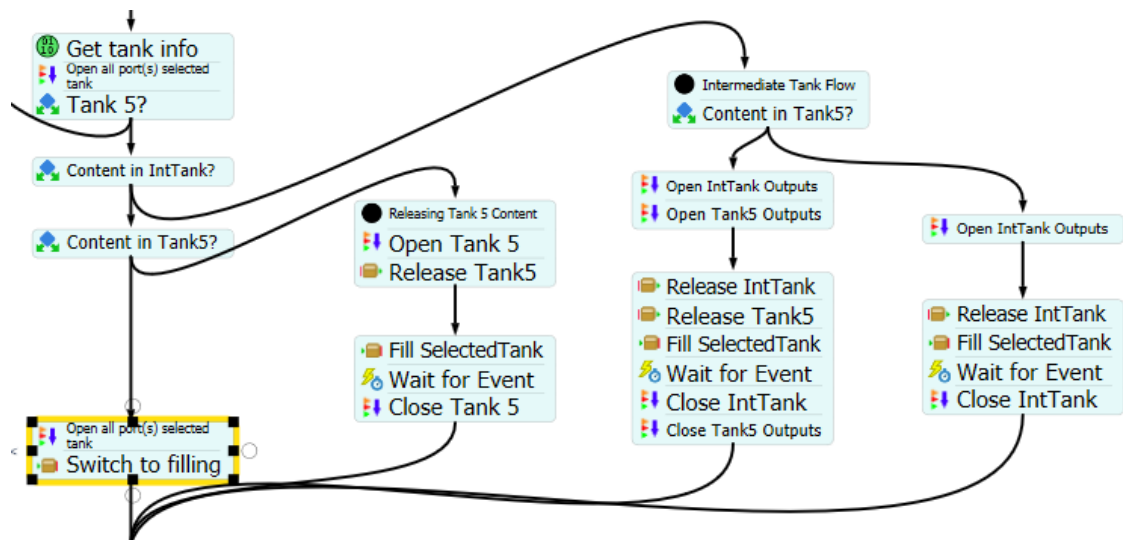
Fonte: Elaborada pelo autor

Na sequência, o fluxo lógico passa por uma série de decisões condicionais, cujo objetivo é destinar o produto eventualmente acumulado no tanque 5 e no tanque intermediário. Conforme a definição no problema, o produto temporariamente acumulado nesses 2 tanques deve voltar a ser destinado para um dos 4 tanques principais, junto com as correntes produzidas de nafta HDT e nafta DD assim que ele estiver vazio, e até o seu enchimento, ou enchimento do seu *dummy tank* de nafta DD, ou ainda o esvaziamento dos tanques 5 e intermediário.

Assim, a lógica primeiro avalia se há conteúdo no tanque intermediário, depois se há conteúdo no tanque 5, e por fim libera as portas de saída dos tanques que tenham conteúdo, até o momento em que um dos 3 eventos aconteça: o tanque receptor esteja cheio, seu dummy tank de nafta DD esteja cheio, ou os volumes dos tanques 5 e intermediário se esgotem. Caso não haja conteúdo em nenhum desses dois tanques, o tanque receptor passa a receber apenas as vazões das correntes de nafta HDT e nafta DD. A Figura 18 mostra o trecho de bloco lógico que modela esta regra.

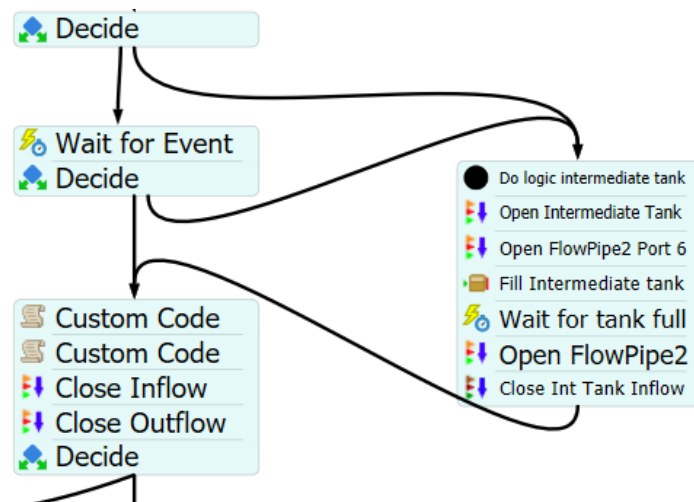
Em seguida, todo o trecho lógico se encaminha para uma decisão condicional comum, onde se avalia se o dummy tank de nafta DD do tanque receptor está cheio ou não. Caso esteja cheio, abre-se uma lógica alternativa de alinhamento da produção de nafta DD para o tanque intermediário, até que o tanque receptor em questão encha totalmente (passando a receber somente nafta HDT), e as produções possam ser alinhadas para um novo tanque receptor vazio. Quando a lógica de enchimento total do tanque receptor é ativada, o fluxo atualiza uma variável contadora de tanques cheios, e fecha as portas de entrada e saída do tanque receptor, retornando para o ponto de seleção de um novo tanque receptor. A Figura 19 mostra esse trecho do bloco lógico.

Figura 18 - Lógica de consumo do conteúdo acumulado no tanque 5 e tanque intermediário



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 19 - Lógica de decisão de alinhamento para tanque intermediário e enchimento do tanque receptor principal

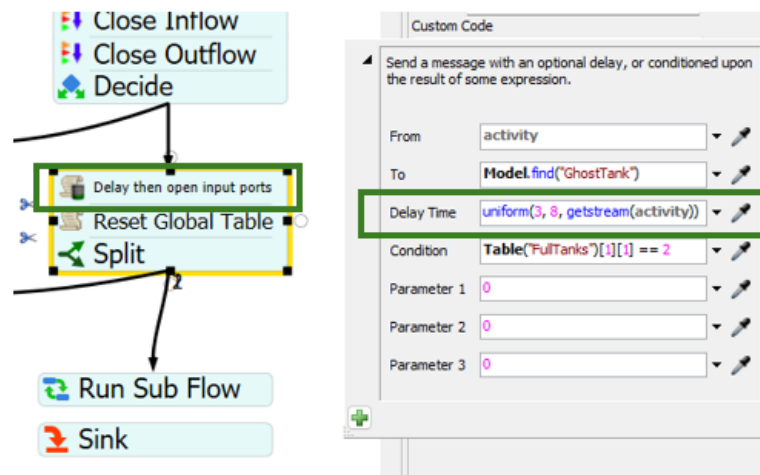


Fonte: Elaborada pelo autor

A decisão condicional mostrada com último item na sequência da Figura 19 avalia se o número de tanques cheios (representado pela variável contadora) é igual a 1 ou 2. Se igual a 1, o fluxo retorna para o ponto de seleção de um novo tanque receptor. Se o número for igual a 2, o modelo segue para um novo bloco lógico, que primeiro define um tempo de espera (delay) que representa o tempo definido entre a formação de um lote de 2 tanques cheios, e a chegada de um navio para carregamento do lote. Aqui, esse delay foi definido como uma distribuição

uniforme, variando entre 3 e 8 dias. A lógica manda uma mensagem com o delay definido que será utilizada como tempo de espera para abertura das portas do tanque fantasma. Em seguida, a lógica atualiza a variável contadora de tanques cheios para 0, e então vai para uma bifurcação (*split*), onde simultaneamente retorna ao ponto de seleção de um novo tanque receptor, e aciona a lógica de expedição dos tanques para navio. O trecho descrito é mostrado na Figura 20, bem como a definição da distribuição de probabilidade do tempo de espera até a chegada de um navio.

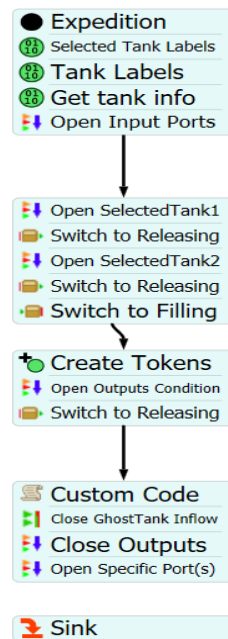
Figura 20 - Lógica de definição do tempo de espera até chegada de um navio



Fonte: Elaborada pelo autor

A lógica de expedição para navios foi definida como um subfluxo (*sub flow*), que consiste em identificar quais são os dois tanques cheios, abrir suas portas de saída e abrir as portas de entrada do tanque fantasma até seu enchimento. Como o tanque fantasma já representa um navio no problema real, no modelo, após seu enchimento, seu produto é encaminhado diretamente para um navio com vazão virtualmente infinita. Então após o enchimento, a lógica abre as portas de saída do tanque fantasma para navios, atualiza uma variável contadora de quantidade de navios, e fecha as portas de saída dos tanques expedidores. Ao esvaziamento do tanque fantasma, suas portas de saída também são fechadas. O subfluxo lógico que representa a expedição para navios é mostrado na Figura 21.

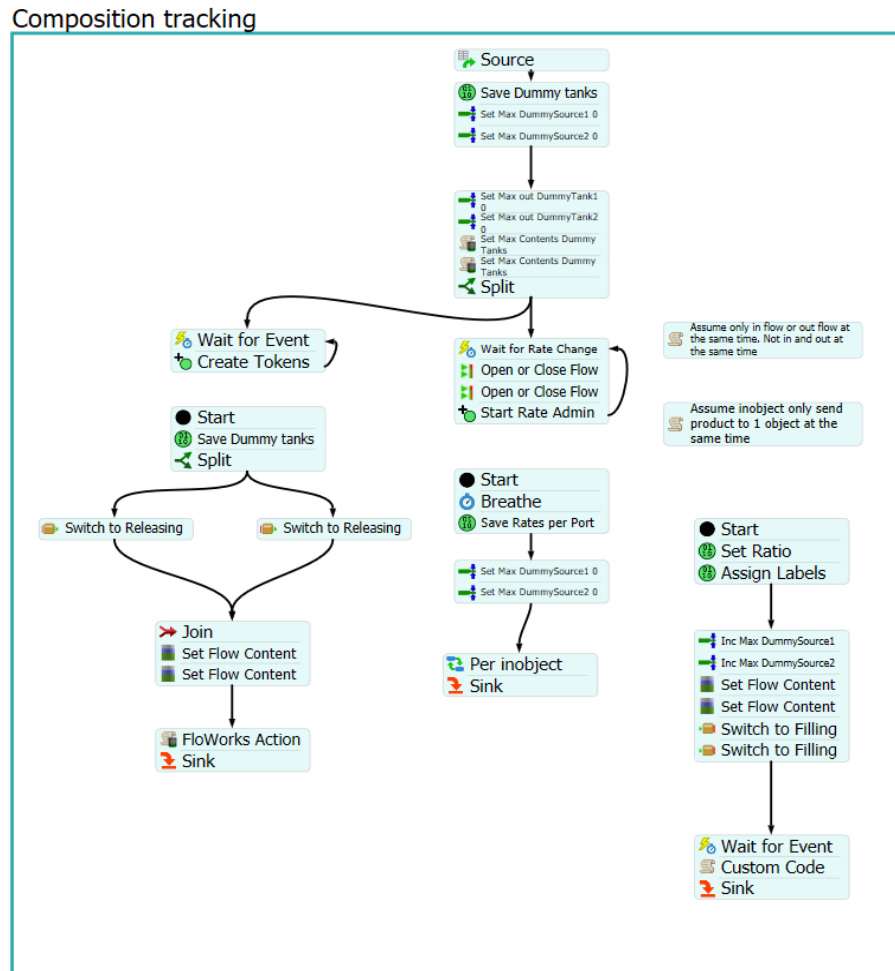
Figura 21 - Subfluxo lógico de expedição de lote para navios



Fonte: Elaborada pelo autor

Além dos fluxos lógicos mostrados até aqui, há um subfluxo importante para manter o rastreamento da composição dos tanques, garantindo que a quantidade de nafta DD e nafta HDT que entra nos respectivos dummy tanks de cada tanque principal se reflita também em vazão total de produto neste mesmo tanque. Esse subfluxo é o responsável pela representação das quantidades de nafta DD e nafta HDT em cada tanque em todo o processo, e é mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Subfluxo lógico para rastreamento das composições (nafta DD e HDT) dos tanques



Fonte: Elaborada pelo autor

3.4 ANÁLISE DE DADOS HISTÓRICOS E AJUSTE DE PARÂMETROS

Como descrito na seção anterior, o modelo possui duas fontes principais de correntes de entrada, uma de nafta HDT e uma de nafta DD. Estas vazões sofrem variações aleatórias, uma vez por dia no modelo. Para definir uma curva de distribuição probabilidade mais aderente possível ao cenário real, para cada uma das correntes, foi feito um levantamento de histórico de produções diárias de aproximadamente 5 anos de operação (1780 dias), entre 2019 e 2024.

A Tabela 4 mostra um excerto da base de dados diários de vazão, em m³/d, de nafta DD e nafta HDT recebidas na tancagem final de nafta.

Tabela 4 - Excerto da base de dados de vazões de nafta por corrente para a tancagem final

Data	NDD (m ³ /d)	NHDT (m ³ /d)	Total	%NDD	%NHDT
01/01/2019	0	3.349	3.349	0%	100%
02/01/2019	985	1.705	2.691	37%	63%
03/01/2019	452	1.751	2.203	21%	79%
04/01/2019	262	1.793	2.055	13%	87%
05/01/2019	318	1.846	2.164	15%	85%
06/01/2019	287	1.932	2.219	13%	87%
07/01/2019	210	1.985	2.195	10%	90%
08/01/2019	0	2.033	2.033	0%	100%
09/01/2019	0	2.094	2.094	0%	100%
10/01/2019	0	2.107	2.107	0%	100%
11/01/2019	0	2.169	2.169	0%	100%
12/01/2019	0	2.107	2.107	0%	100%
13/01/2019	0	2.237	2.237	0%	100%
14/01/2019	282	2.167	2.449	11%	89%
15/01/2019	793	2.091	2.883	27%	73%
16/01/2019	180	1.986	2.165	8%	92%
17/01/2019	216	1.891	2.107	10%	90%
18/01/2019	466	1.888	2.354	20%	80%
19/01/2019	463	1.900	2.363	20%	80%
20/01/2019	468	2.056	2.523	19%	81%
21/01/2019	498	2.083	2.581	19%	81%
22/01/2019	526	2.100	2.625	20%	80%
23/01/2019	593	2.092	2.685	22%	78%
24/01/2019	587	2.107	2.694	22%	78%
25/01/2019	629	2.008	2.637	24%	76%
26/01/2019	640	2.040	2.680	24%	76%
27/01/2019	542	2.047	2.589	21%	79%
28/01/2019	177	1.893	2.070	9%	91%
29/01/2019	117	1.749	1.866	6%	94%
30/01/2019	372	1.894	2.266	16%	84%
31/01/2019	0	1.781	1.781	0%	100%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados foram importados e analisados via ExpertFit, módulo estatístico do FlexSim que realiza testes de aderência para ranquear as distribuições de probabilidade que melhor se ajustam aos dados fornecidos. A ferramenta fornece como resultado um ranking de aderência por maior Score Relativo, indicando as 3 distribuições com melhor classificação, juntamente com seus parâmetros de ajuste.

No caso da nafta HDT, a melhor indicação foi uma distribuição do tipo Johnson SU, seguida por uma Logística e uma distribuição de Laplace. O ranking fornecido pela ferramenta está mostrado na Figura 23, que ainda mostra que foram avaliados 24 possíveis modelos de distribuição:

Figura 23 - Ranking de aderência de distribuições para a nafta HDT

Relative Evaluation of Candidate Models

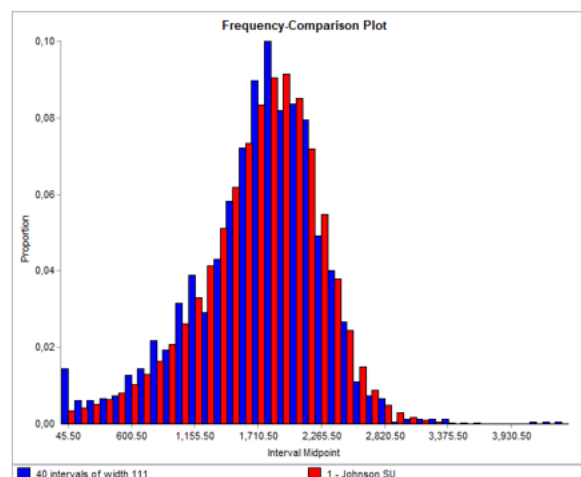
Model	Relative Score	Parameters
1 - Johnson SU	100.00	Location 2.207.36697 Scale 671.47917 Shape #1 0.99476 Shape #2 1.65086
2 - Logistic	94.57	Location 1.736.73555 Scale 313.21427
3 - Laplace	88.04	Location 1.776.00000 Scale 430.14456

24 models are defined with scores between 1.09 and 100.00

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 24 mostra o comparativo entre o histograma dos dados reais de vazão de nafta HDT (em azul) e o teórico gerado pela distribuição Johnson SU sugerida (em vermelho), indicando visualmente uma aderência muito boa entre os dados reais e a distribuição.

Figura 24 - Histograma de vazões reais de nafta HDT x distribuição Johnson SU



Fonte: Elaborada pelo autor

No caso da nafta DD, a melhor indicação foi uma distribuição do tipo Weibull, seguida por uma Random Walk e uma Johnson SB. O ranking fornecido pela ferramenta está mostrado na Figura 25, que ainda mostra que foram avaliados 11 possíveis modelos de distribuição:

Figura 25 - Ranking de aderência de distribuições para a nafta DD

Relative Evaluation of Candidate Models

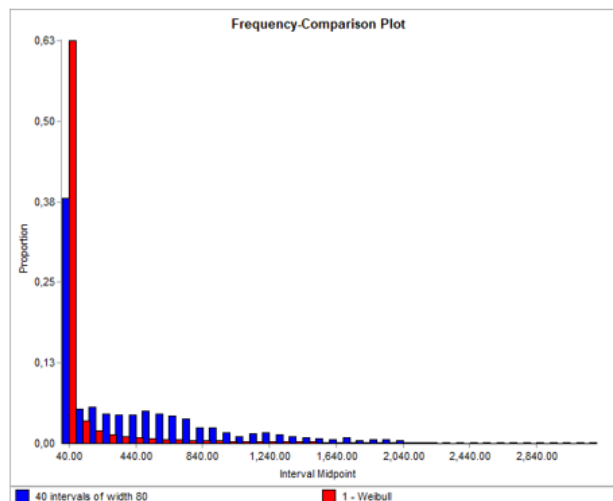
Model	Relative Score	Parameters
1 - Weibull	85.00	Location 0.00000 Scale 36.29161 Shape 0.14073
2 - Random Walk	77.50	Location 0.00000 Scale 2.97024 e 7 Shape 0.00232
3 - Johnson SB	72.50	Lower endpoint 0.00000 Upper endpoint 3.196.21203 Shape #1 0.81773 Shape #2 0.08857

11 models are defined with scores between 7.50 and 85.00

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 26 mostra o comparativo entre o histograma dos dados reais de vazão de nafta DD (em azul) e o teórico gerado pela distribuição Weibull sugerida (em vermelho), indicando visualmente uma aderência não muito boa entre os dados reais e a distribuição, especialmente pelo fato de os dados reais terem uma concentração de frequência muito alta no primeiro intervalo de valores (0 a 80 m³/d).

Figura 26 - Histograma de vazões reais de nafta DD x distribuição Weibull



Fonte: Elaborada pelo autor

Considerando a baixa aderência encontrada para a distribuição de vazão de nafta DD, optou-se por usar no modelo uma distribuição discretizada com intervalos definidos manualmente (distribuição não paramétrica), aproximando melhor os intervalos de distribuição identificados nos dados reais.

3.5 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

Uma etapa importante na avaliação de problemas reais através de modelos de simulação é a validação destes modelos, que consiste na constatação de que o modelo está representando adequadamente o modelo real.

Para este trabalho foi feita tanto uma avaliação qualitativa quanto quantitativa.

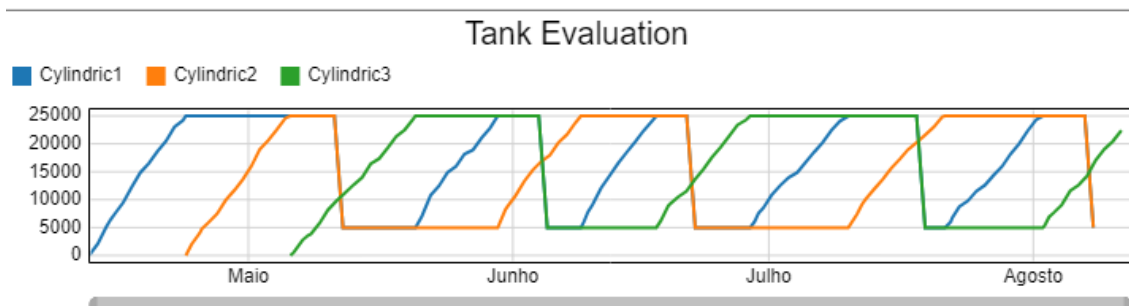
De forma qualitativa, foi observado o comportamento do modelo ao longo de várias rodadas, buscando avaliar se o alinhamento das correntes estava de fato seguindo a lógica desejada definida no modelo conceitual da seção 3.2, avaliando por exemplo:

- se após atingir o limite estabelecido de nafta DD por tanque, esta corrente está sendo devidamente alinhada para a área intermediária;
- se após enchimento de um tanque, as produções são devidamente alinhadas para um novo tanque, junto com o produto previamente acumulado na área intermediária;
- se após a formação de um lote de 2 tanques cheios, está ocorrendo adequadamente a expedição para navio após o tempo de espera.

O gráfico da Figura 27 mostra o conteúdo acumulado nos tanques principais ao longo de uma rodada, evidenciando que:

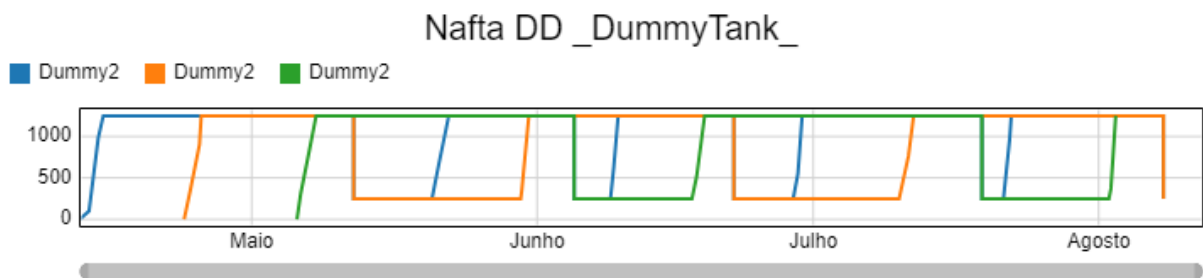
- Os tanques estão enchendo até o volume determinado, e em seguida esvaziando mantendo o lastro mínimo determinado;
- Após o enchimento de 2 tanques, e um tempo de espera, há o esvaziamento em paralelo dos 2 tanques. Na rodada analisada, os lotes se alternam, ora sendo formados pelos tanques 1 e 2, ora pelos tanques 1 e 3. Não houve necessidade de usar os tanques 4 e 5 nesta rodada;
- Em todos os processos de enchimento, observa-se que há uma tendência de enchimento mais rápido no início (quando o tanque recebe NDD + NHDT), que depois diminui, já que o tanque passa a receber somente NHDT.

Figura 27 - Sequência de enchimento dos tanques principais ao longo de uma rodada



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 28 - Sequência de enchimento dos dummy tanks de NDD ao longo de uma rodada



Fonte: Elaborada pelo autor.

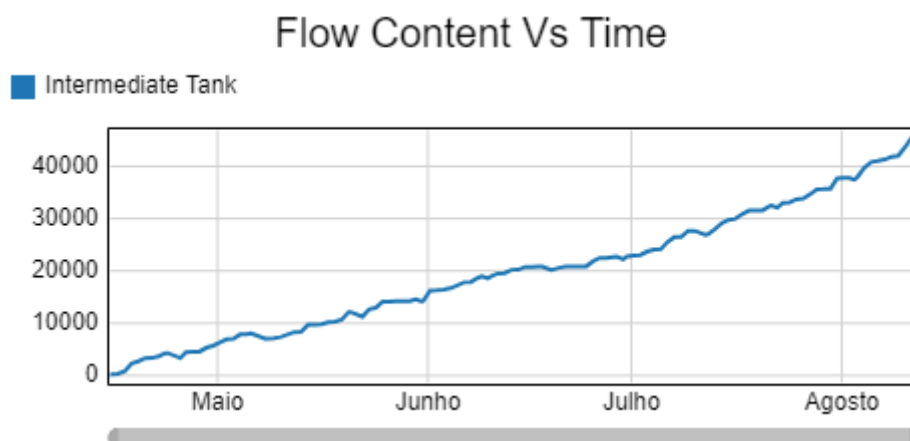
O gráfico da Figura 28 mostra o conteúdo acumulado nos dummy tanks de nafta DD ao longo de uma rodada, evidenciando que:

- A quantidade de nafta DD por tanque está respeitando o limite de 1.250 m³ (neste caso, foi definido para 5% do volume total);
- Os tanques enchem bem antes do enchimento do tanque principal correspondente, gerando necessidade de envio da NDD para a área intermediária;
- Os tanques esvaziam junto com o tanque principal correspondente, mantendo o lastro mínimo correspondente ao limite % de NDD do lastro mínimo do tanque principal.

O gráfico da Figura 29 mostra o acúmulo de conteúdo na tancagem intermediária ao longo da mesma rodada, evidenciando que:

- o tanque só começa a acumular produto quando se esgota a capacidade de recebimento de NDD no tanque final receptor;
- há períodos em que ocorre redução de estoque nesta tancagem, que correspondem aos momentos em que um novo tanque receptor passa a ter capacidade de recebimento de NDD. Porém, estes períodos estão sendo bastante curtos, em função do baixo limite de NDD por tanque definido para este caso. Com isso, a tancagem intermediária fica com uma tendência de acúmulo quase contínuo.

Figura 29 - Uso da tancagem intermediária ao longo de uma rodada



Fonte: Elaborada pelo autor.

Além da análise de comportamento do modelo, indicando que o mesmo estava performando comportamentos esperados para o problema definido, foi realizado um comparativo das quantidades de nafta total produzidas pelo modelo com os valores reais do período analisado.

Os resultados detalhados na seção 4 mostrarão que foi observada uma produção total de nafta ao longo dos cenários analisados oscilando entre 251 mil m³ e 263 mil m³ no período definido de 4 meses (122 dias), o que indica uma produção média total variando entre 2.060 m³/d e 2.160 m³/d, aproximadamente.

A média das vazões diárias somadas para o período analisado na seção 3.4, expurgando-se períodos de operação muito atípica (ex.: paradas prolongadas das unidades de processo), ficou em 2.145 m³/d, bem dentro do intervalo observado na seção de resultados.

Ainda, na seção 4 será mostrado um número médio de navios carregados, nesse período de 4 meses, variando entre 4,6 e 5,5 navios (aumentando junto com o aumento da capacidade de recebimento de NDD nos tanques finais).

Observando-se os valores reais, entre os anos de 2019 e 2024 (expurgando o ano de 2021, onde houve muita interferência de concorrência com formulação de gasolina, e parada geral das unidades para manutenção), e considerando lotes padrão de carregamento de 40 mil m³ por navio, chega-se a uma média de 1,4 navio carregado por mês, ou 5,6 navios em um período de 4 meses, valor muito próximo do estimado pelo modelo para o caso com 25% de limite de incorporação para NDD.

Ficou evidenciado que o modelo representou adequadamente tanto os comportamentos definidos pelo modelo conceitual do problema quanto guardou bastante similaridade com os dados de histórico do problema real.

4 RESULTADOS

Nesta seção serão exibidos os resultados das rodadas de simulação realizadas com o modelo anteriormente descrito.

Para fins de avaliação, foram realizados conjuntos de rodadas variando-se o limite máximo de % de NDD possível de se incorporar a cada tanque final de nafta. Também foram feitas análises de sensibilidade variando-se o tempo de espera até a chegada de navios após a formação de um lote de dois tanques certificados.

Foi definido um período de rodada de 4 meses para cada corrida, e demandado um número de 5.000 corridas para cada cenário no Experimenter. Mostraremos a seguir que, durante a realização das rodadas, o Experimenter consegue realizar simultaneamente 20 rodadas. Porém, algumas destas rodadas vão encontrando inviabilidades antes de atingir o final da corrida, e então consomem uma das 20 rodadas de capacidade do Experimenter. Quando a ferramenta atinge 20 rodadas inviáveis, ela não consegue mais avançar, podendo interromper o ciclo de corridas antes de atingir as 5.000 demandadas.

A Figura 30 mostra um exemplo de relatório de rodadas do Experimenter. Cada retângulo verde representa uma corrida concluída com sucesso. Os retângulos parcialmente vermelhos (aqui números 1275, 1331, 1401, 1403 e 1430) indicam que essas rodadas estão interrompidas num dado ponto por encontrarem alguma inviabilidade. Como dito acima, sempre que o Experimenter atinge 20 rodadas nesta condição, ele para, não conseguindo mais avançar.

Ao longo do desenvolvimento do modelo foram realizados diversos contatos com as equipes técnicas da FlexSim e FloWorks, visando entender e eliminar essas inviabilidades, e várias delas foram corrigidas, permitindo se atingir um número cada vez maior de rodadas viáveis. Porém, algumas ainda permanecem, e parecem associadas ao comportamento de variáveis aleatórias do modelo, por vezes encontrando incompatibilidades infinitesimais por exemplo entre o volume disponível nos tanques finais e o espaço disponível no tanque fantasma, gerando uma inconsistência e travando a rodada. Segue em desenvolvimento o trabalho de melhorias no modelo para eliminar estas inviabilidades.

Apesar disso, foi possível gerar para todos os cenários uma quantidade muito maior de rodadas viáveis do que inviáveis, o que será resumido a seguir.

Figura 30 - Relatório de rodadas do Experimenter

Job: Experiment1 Run Stop

Experiment1 Status

☐ Proposed
 ☐ Submitted
 ☒ Running
 ☐ Recording
 ☒ Complete

1251	1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258	1259	1260
1261	1262	1263	1264	1265	1266	1267	1268	1269	1270
1271	1272	1273	1274	1275	1276	1277	1278	1279	1280
1281	1282	1283	1284	1285	1286	1287	1288	1289	1290
1291	1292	1293	1294	1295	1296	1297	1298	1299	1300
1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307	1308	1309	1310
1311	1312	1313	1314	1315	1316	1317	1318	1319	1320
1321	1322	1323	1324	1325	1326	1327	1328	1329	1330
1331	1332	1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340
1341	1342	1343	1344	1345	1346	1347	1348	1349	1350
1351	1352	1353	1354	1355	1356	1357	1358	1359	1360
1361	1362	1363	1364	1365	1366	1367	1368	1369	1370
1371	1372	1373	1374	1375	1376	1377	1378	1379	1380
1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390
1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400
1401	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408	1409	1410
1411	1412	1413	1414	1415	1416	1417	1418	1419	1420
1421	1422	1423	1424	1425	1426	1427	1428	1429	1430
1431	1432	1433	1434	1435	1436	1437	1438	1439	1440

Fonte: Elaborada pelo autor

4.1 CONJUNTO DE RODADAS 1 – 3 A 8 DIAS PARA NAVIOS

Neste primeiro conjunto de rodadas, foi considerado para o tempo de espera por navios após a conclusão de um lote (2 tanques certificados de nafta petroquímica), uma variável aleatória com distribuição uniforme de 3 a 8 dias. Ou seja, quando o modelo enxerga um total de 2 tanques certificados, ele dispara um gatilho, e após um tempo uniformemente distribuído de 3 a 8 dias, chegará um navio para carregar este lote e esvaziar os tanques.

A Tabela 5 mostra o resultado resumo de algumas variáveis de interesse criadas para o acompanhamento das rodadas.

Observa-se que foram rodados 3 cenários, como limite variável de incorporação de nafta DD por tanque final de nafta, em 5%, 15% e 25%. O tempo de espera por navios foi mantido com a distribuição uniforme constante já citada.

Tabela 5 - Resumo das rodadas - tempo para navios de 3 a 8 dias

Cenário	1	2	3
Máximo % de NDD por Tanque	5%	15%	25%
Tempo de espera por navios (dias)	3 to 8	3 to 8	3 to 8
Número total de rodadas	1724	5000	1312
Número de rodadas inviáveis	20	1	20
% de rodadas inviáveis	1,16%	0,02%	1,52%
Tempo total de simulação (segundos)	220	220	135
Espaço médio em tanque intermediário utilizado (m³)	22.636	9.415	410
Espaço máximo em tanque intermediário utilizado (m³)	45.943	20.314	2.697
Produção total de nafta DD (m³)	57.232	56.476	54.348
Produção total de nafta (m³)	263.334	260.311	251.291
Número de navios carregados	4,65	4,98	5,5
Total de nafta DD carregada em navios (m³)	8.247	28.875	41.303
Total de nafta carregada em navios (m³)	164.932	193.094	193.319
% de NDD por navio	5,00%	14,95%	21,37%

Fonte: Elaborada pelo autor

Observa-se que para o cenário 2, foi possível atingir as 5.000 rodadas demandadas, ficando apenas 1 inviável. Já para os cenários 1 e 3 foi atingido respectivamente um número de rodadas de 1724 e 1312, pois ao chegar nesse ponto o experimenter já tinha encontrado 20 rodadas inviáveis, e portanto parou de gerar novas rodadas. Apesar disso, percebe-se que o percentual de rodadas inviáveis foi baixo, atingindo 1,52% no pior caso.

Estão reportados também os tempos totais de rodadas, que oscilaram entre 135 e 220 segundos, o que pode ser considerado um tempo baixo, dada a quantidade de rodadas realizadas.

Em seguida, são mostradas as variáveis associadas ao processo encontradas. Cabe destacar que os valores mostrados refletem a média dessas variáveis considerando todas as rodadas viáveis para cada cenário.

O espaço médio em tanque intermediário utilizado reflete o volume médio ao longo dos 4 meses de corrida que foi necessário desviar para esta tancagem por falta de espaço para NDD nos tanques finais em dado momento. Observa-se que o comportamento ao longo dos cenários é coerente com o esperado: quanto maior o % de NDD possível de se incorporar nos tanques finais, menor é a necessidade que o modelo enxerga de utilizar o espaço intermediário. Isso se reflete na queda do valor desta variável do cenário 1 até o cenário 3.

Na linha logo abaixo é mostrado o espaço máximo utilizado em tanque intermediário. Esta variável reflete a média dos maiores valores de acúmulo em intermediários atingidos em cada corrida de 4 meses. Isso dá uma visão para o planejador de que, apesar de não ser um valor médio, em algum momento o estoque intermediário atingiu aquele pico, sendo necessário

espaço suficiente em tancagem para acomodá-lo. O valor também mostra comportamento coerente ao longo dos cenários, com redução significativa do cenário 1 até o cenário 3.

Nas linhas seguintes temos a produção total de nafta DD e de nafta total. Esses valores mostram o total de produto que “entrou” no modelo pelas 2 fontes de entrada ao longo dos 4 meses de corrida. Não é esperada grande variação nos valores médios ao longo dos cenários, pois as vazões de entrada seguiram sempre as mesmas distribuições de probabilidade, já descritas na Seção 3.3. Alguma variabilidade, porém, é aceitável, apesar do número grande de rodadas, já que são 2 variáveis aleatórias. Isso fica mais evidente na produção de nafta total do cenário 3, que apresentou uma queda maior em relação aos outros dois, porém variação essa inferior a 5%. Cabe comentar também que o valor total de nafta produzido, em torno de 260 mil m³, ou 65 mil m³/mês, é bem compatível com um histórico de produção típica da refinaria, mostrando aderência entre a modelagem e a realidade.

A variável seguinte é o número médio de navios carregados, mais uma vez demonstrando comportamento coerente. O número de navios aumenta do cenário 1 ao 3, já que, a possibilidade de colocar mais nafta DD diretamente na tancagem final gera um volume maior de nafta disponível para navios, e um volume menor acumulado na área intermediária.

As 3 últimas variáveis refletem a quantidade total de nafta DD que foi carregada em navios, buscando mostrar se os lotes de 2 tanques carregados em navios saíram também sempre com o % limite de NDD estabelecido ou não. Aqui observa-se um comportamento interessante: para o limite de 5%, o modelo indica que todos os navios saíram no limite da especificação, ou seja, com o limite percentual de incorporação atingido. Para o limite de 15%, o % médio dos navios já fica levemente abaixo do valor máximo, e para 25% já se observa uma folga maior (média de NDD nos navios ficou em 21,37%). Isso significa que, para limites mais altos, nem sempre foi possível atingir o limite de especificação de todos os tanques, já que alguns navios saíram com “folga” na especificação. Isso pode acontecer porque o comportamento aleatório das vazões de NDD e NHDT pode ter gerado momentos em que não havia NDD suficiente para atingir o limite % do tanque, mesmo havendo produto disponível em tancagem intermediária (há uma vazão limite de transferência da área intermediária para a área final).

Somente com os valores médios das variáveis de performance das rodadas já é possível obter insights interessantes para avaliação dos programadores. Porém a informação ainda mais valiosa que os relatórios resumo das rodadas trazem é uma análise mais estatística de todas as variáveis.

É possível avaliar, por exemplo, os histogramas mostrando a distribuição dos valores de uso de espaço em tancagem intermediária e tirar conclusões valiosas. A Figura 31 mostra os

histogramas com distribuição dos valores de espaço médio utilizado na tancagem intermediária para os 3 cenários.

Figura 31 - Histograma do espaço médio intermediário por cenário



Fonte: Elaborada pelo autor

Com a avaliação dos histogramas, é possível enxergar qual a probabilidade de a tancagem intermediária não ter espaço suficiente para o acúmulo necessário de nafta DD em cada cenário. No caso real, por exemplo, considerando que a refinaria tem um espaço total de 10.700 m³ nesta tancagem, é possível concluir que:

- para uma qualidade de nafta DD que permita incorporação de 25% na tancagem final, a probabilidade de falta de espaço na tancagem intermediária é de 0%, ou seja, não há previsão de problemas para este cenário;

- para uma qualidade de nafta DD que permita incorporação de 15%, já começa a haver uma probabilidade de exceder o espaço total disponível, estimada em 34%, já que em 66% das rodadas o valor ficou abaixo da capacidade. Já há indicativo de um cenário com potencial ameaça, quantificado considerando o comportamento das variáveis aleatórias que foram definidas;

- para uma qualidade de nafta DD que permita incorporação de somente 5% na tancagem final, 100% das rodadas excederam a capacidade existente da tancagem intermediária. Ou seja, este cenário mostra uma inviabilidade prática para a programação da refinaria, indicando que

alguma ação é necessária para que ele não vire realidade, como por exemplo aumento da capacidade em tancagem intermediária (conversão de tanques de outros produtos, ou investimento em novos tanques, o que é normalmente muito custoso e leva bastante tempo) ou alteração do elenco de petróleo processado na refinaria, ajustando a qualidade da nafta DD para que seja viável um maior % de incorporação na nafta final.

Além dos histogramas, o relatório resumo das rodadas traz outras informações estatísticas que podem ser relevantes para uma análise, como por exemplo:

- Intervalo de confiança para a média, desvio padrão, e valores extremos, conforme Figura 32;

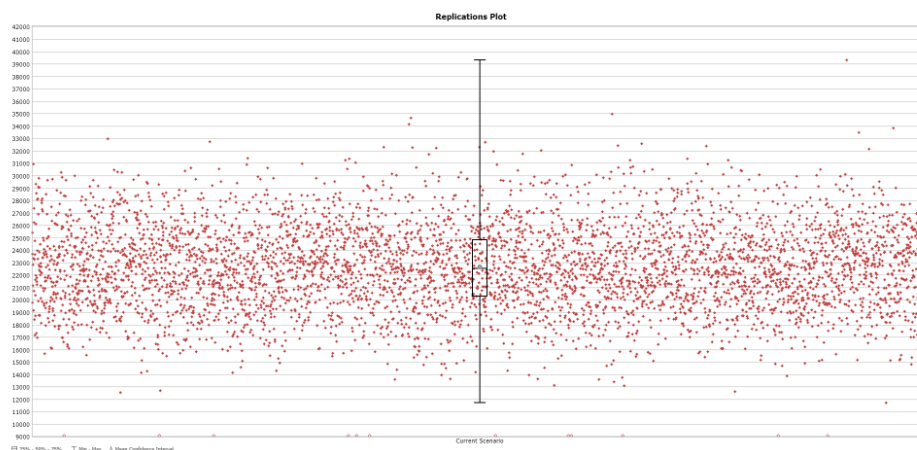
Figura 32 - Algumas estatísticas disponíveis sobre cada variável de performance

Summary				
	Mean (95% Confidence Interval)	Sample Std Dev	Min	Max
Current Scenario	22622.3 ± 91.7	3302.1	11738.5	39336.5

Fonte: Elaborada pelo autor

- Nuvem de valores por cada rodada, e gráfico boxplot dos valores, conforme Figura 33;

Figura 33 - Nuvem de valores e boxplot



Fonte: Elaborada pelo autor

Os relatórios mostrados na Figura 32 e Figura 33 trazem mais informação para o programador sobre a variabilidade identificada nas variáveis de interesse definidas, inferindo a maior ou menor confiança que o mesmo pode ter ao tomar decisões baseadas nos valores médios, ou estudar em mais detalhes as curvas de distribuição de probabilidade, buscando quantificar melhor as incertezas.

4.2 CONJUNTO DE RODADAS 2 – 2 A 5 DIAS PARA NAVIOS

Com o objetivo de testar a sensibilidade do modelo à redução do tempo de espera por navios, foi realizado um novo conjunto de rodadas, reduzindo esta variável para uma distribuição uniforme com limites de 2 a 5 dias, ao invés dos 3 a 8 dias do conjunto de rodadas anteriores.

Além de avaliar possíveis alterações nos resultados causados por, por exemplo, uma alteração de política e infraestrutura de logística (mais navios disponíveis no sistema, ou navios circulando em destinações mais próximas ao local de carregamento, que poderiam levar a respostas mais rápidas de carregamento após formação de lote), este conjunto de rodadas também objetivava avaliar uma possível redução do percentual de rodadas inviáveis. A suspeita faria sentido uma vez que, dado que navios estariam disponíveis em um tempo mais baixo, a probabilidade de o espaço na tancagem se esgotar antes de uma nova expedição para navios seria mais baixo.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra os valores resumo das principais variáveis de acompanhamento para o novo conjunto de rodadas.

Cenário	1	2	3
Máximo % de NDD por Tanque	5%	15%	25%
Tempo de espera por navios (dias)	3 to 8	3 to 8	3 to 8
Número total de rodadas	1724	5000	1312
Número de rodadas inviáveis	20	1	20
% de rodadas inviáveis	1,16%	0,02%	1,52%
Tempo total de simulação (segundos)	220	220	135
Espaço médio em tanque intermediário utilizado (m³)	22.636	9.415	410
Espaço máximo em tanque intermediário utilizado (m³)	45.943	20.314	2.697
Produção total de nafta DD (m³)	57.232	56.476	54.348
Produção total de nafta (m³)	263.334	260.311	251.291
Número de navios carregados	4,65	4,98	5,5
Total de nafta DD carregada em navios (m³)	8.247	28.875	41.303
Total de nafta carregada em navios (m³)	164.932	193.094	193.319
% de NDD por navio	5,00%	14,95%	21,37%

Fonte: Elaborada pelo autor

A primeira observação refere-se ao percentual de rodadas inviáveis. Conforme esperado houve uma redução drástica no cenário de 5% de limite de nafta DD, permitindo ao modelo atingir as 5.000 corridas demandadas, enquanto no cenário com tempo de espera de 3 a 8 dias

só foi possível concluir 1.724 rodadas. Para o cenário com 15% houve um aumento muito discreto, e uma alteração percentual praticamente desprezível, o que parece totalmente compreensível dada a aleatoriedade das variáveis.

Ao se observar, porém o cenário de 25% de limite de nafta DD, constata-se uma elevação mais significativa do percentual de rodadas inviáveis, ao contrário do inicialmente esperado. Este fato trouxe indício de que a inviabilidade das rodadas não estava associada à falta de espaço em tancagem ou ao tempo de espera por navios.

Em discussões técnicas com a equipe de desenvolvimento da ferramenta de simulação, foi constatado que a ocorrência de inviabilidades estava associada à aleatoriedade das variáveis, que por vezes gerava inconsistências devido a valores muito reduzidos, por vezes na sexta ou sétima casa decimal, que poderiam travar o modelo. Por exemplo, o volume disponível em um dos tanques atingir 19.999,999999 m³ ao invés dos 20.000 m³, e essa pequena diferença inviabilizar a expedição do tanque por uma trava lógica do modelo. Algumas dessas inviabilidades foram corrigidas aplicando-se pequenos deltas de tolerância em alguns portões lógicos do modelo, porém não foi possível sanar todas.

Apesar disto, observa-se que em todos os conjuntos de rodadas, o percentual de rodadas inviáveis foi muito reduzido (atingindo 2,57% no pior caso), e foi possível atingir um número de corridas suficiente para representar bem o comportamento probabilístico das variáveis de interesse. Novas melhorias e ajustes de modelagem que reduzam ainda mais, ou eliminem, as rodadas inviáveis, estarão citados na seção de sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros.

Afora este fato, comparando-se os números das Tabelas 5 e 6, observa-se pouquíssima alteração nos valores médios de todas as variáveis de interesse: uso de espaço em tancagem intermediária, número de navios carregados e percentual médio de nafta DD nos lotes de navios.

Isto indica que investimentos em infraestrutura e disponibilidade logística (aumento da frota de navios, por exemplo) que viabilizassem uma redução do tempo de espera por navios de 3 a 8 dias, para 2 a 5 dias, teria pouquíssimo ou nenhum impacto no sistema de tancagem e na produção total. Indica ainda que, para este cenário de vazões, limites de mistura e tancagem disponível, o tempo de espera por navios não está sendo um gargalo nas movimentações.

Observa-se ainda que a flexibilidade para testar no modelo diferentes tempos de espera traz a possibilidade de avaliar limites logísticos. Para um dado aumento de tempo de espera por navios deve começar a haver uma frequência cada vez maior de rodadas incompletas por de fato esgotar o espaço disponível nos tanques antes que um navio chegue para aliviá-los.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho atingiu o objetivo geral de desenvolver uma modelagem simulação de eventos contínuos para um sistema de recebimento, mistura, armazenamento e expedição de um derivado (nafta petroquímica) utilizando dados reais de uma refinaria de petróleo.

O modelo desenvolvido tem grande potencial para agregar informação quantitativa, junto com uma avaliação probabilística, para avaliações de incertezas em cenários de produção do derivado, como por exemplo a probabilidade de falta de espaço em tancagem intermediária ou final em diferentes cenários de produção e de qualidade das correntes utilizadas na mistura. Os resultados do modelo são bastante úteis para auxiliar as equipes de planejamento da produção com uma visão quantificada de incertezas, ajudando a responder perguntas como:

- Em que cenários haveria necessidade de investimentos adicionais em tancagem para correntes intermediárias e/ou produto final?
- Em que cenários haveria necessidade de investimentos adicionais em estrutura logística, como aumento da frota de navios e redução do tempo de espera até o carregamento de um lote certificado?
- Considerando a estrutura e tancagem atualmente disponíveis, que limites precisam ser considerados para os modelos de planejamento, como por exemplo limites máximos de incorporação de nafta não tratada no produto final, ou restrições de processamento a correntes de petróleo específicas que impactem na qualidade da nafta não tratada, de modo a não atender estes limites?
- Como a capacidade de tancagem intermediária necessária varia com a alteração da qualidade da corrente de nafta não tratada?
- Há gargalos no sistema, a exemplo de limites de vazão de recebimento nos tanques, ou de expedição para navios, que impactam significativamente na viabilidade dos cenários de produção previstos?

Nos cenários avaliados, observou-se que a tancagem intermediária para nafta não tratada tende a ser um forte limitante da capacidade de escoamento contínuo, trazendo uma probabilidade muito elevada de falta de espaço para armazenamento em casos em que a qualidade da nafta não tratada só permita uma incorporação de 5% na mistura de nafta final. Para

os cenários com 15%, ainda haveria uma probabilidade de falta de espaço estimada em torno de 33%, e para o cenário com 25% de incorporação na mistura, a chance de falta de capacidade na tancagem mostrou-se praticamente desprezível.

Observou-se ainda, por testes de variação no tempo de espera por navios, que os patamares de alteração foram praticamente irrelevantes para os resultados do modelo, indicando que, nos patamares testados, a espera por navios não estaria sendo um gargalo ao escoamento do sistema.

O modelo utilizou dados de vazão reais, com ajuste a uma curva de distribuição de probabilidade para as correntes que refletiu um período de histórico de 5 anos. O modelo mostrou-se flexível e adequado para testar variações de pontos críticos para o processo, como alterações no limite de nafta não tratada na mistura final, alterações nas vazões de entrada das correntes e na distribuição aleatória do tempo de espera por um carregamento em navios.

Este trabalho tem grande potencial de trazer ganhos econômicos para refinarias e terminais na indústria de óleo e gás, por permitir uma melhor avaliação e quantificação de incertezas em diferentes cenários, permitindo a melhores tomadas de decisão sobre investimentos, seja em tancagem, estrutura de escoamento, ou frota de navios.

Também apresenta um grande potencial de ganho social, pois ao quantificar incertezas de cenários, ajuda a reduzir a possibilidade de falhas de suprimento de derivados importantes para o mercado de consumo. No caso tratado, a nafta petroquímica abastece a indústria petroquímica, que por sua vez produz uma série de produtos largamente utilizados pela sociedade (a exemplo de plásticos, produtos farmacêuticos, fertilizantes, entre outros). Ainda, o trabalho pode ser estendido por exemplo para cenários de diesel, gasolina, querosene de aviação, GLP, que são produtos que não podem ter falhas em suprimento sem gerar impactos significativos a sociedade.

Do ponto de vista ambiental, é possível citar que uma maior eficiência nas movimentações de produtos pode reduzir o consumo de energia tanto por processos de produção ineficientes em refinarias (perdas ou paradas de produção, produção de produtos desnecessários) quanto por movimentações de navios ineficientes, energia essa que vem principalmente da queima de combustíveis fósseis.

5.2 LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Apesar de ter atingido um nível de complexidade adequado para trazer informação valiosa para o entendimento e análise de um problema real de armazenamento, mistura e expedição de um derivado de petróleo, há ainda muitas oportunidades de inclusão de complexidades ao modelo de modo a representar cada vez mais fidedignamente os problemas complexos e reais da programação de derivados.

Dito isto, listamos a seguir alguns avanços de modelagem que seriam valiosos ao modelo e às possíveis conclusões práticas que poderiam ser obtidas do seu uso:

1. Representação das qualidades físico-químicas críticas (a exemplo de teor de enxofre, dissulfeto de carbono, e olefinas) de cada uma das correntes dentro do modelo, de modo a não utilizar apenas limites fixos de incorporação, mas limites dependentes das qualidades modeladas das correntes. As qualidades também poderiam apresentar um comportamento probabilístico, com ajuste de valores históricos a curvas de distribuição de probabilidade;
2. Representação da possibilidade de recebimento por navio de uma corrente externa à refinaria, chamada de booster de octanagem. Esta corrente, misturada às correntes de nafta representadas neste trabalho, viabiliza a formulação por mistura e especificação de gasolina. Esta movimentação, entretanto, traz concorrências de movimentação no sistema, pois utiliza o mesmo píer de atracação de navios, duto de interligação dos navios à refinaria, e a mesma tancagem que foi modelada neste trabalho. Sendo assim, tem forte potencial de atingir novos gargalos de movimentação e de armazenamento, de modo que estas concorrências precisam ser sempre bem avaliadas ao se tentar viabilizar a formulação de gasolina nesta tancagem;
3. Testar o modelo com incrementos significativos de vazão das duas correntes de entrada. No problema real, há previsão de entrada em operação de novas unidades de produção na refinaria estudada nos próximos anos. É esperado que apareçam, neste cenário, novos gargalos de movimentação e armazenamento neste sistema, de modo que sua avaliação quantitativa de incertezas poderia embasar, por exemplo, novos investimentos em tancagem, ou o conhecimento antecipado de limites máximos de escoamento que precisariam ser alimentados nos modelos de planejamento;

4. Modelar sistemas de movimentação e armazenamento de outros derivados que utilizem recursos concorrentes com este, a exemplo do sistema de bunker / óleo combustível, que utiliza o mesmo píer para carregamento de navios, de modo que não pode haver carregamentos simultâneos de nafta / gasolina e óleo combustível, trazendo potenciais gargalos e restrições adicionais;
5. Utilizar a ferramenta para outros sistemas independentes da mesma refinaria, a exemplo dos sistemas de GLP e diesel, ou expandir seu uso para o tratamento de problemas reais de escoamento em outras refinarias e terminais aquaviários ou terrestre.
6. Avaliar e implementar melhorias no modelo e fluxo lógico que reduzam ou eliminem a ocorrência de rodadas inviáveis, trazendo maior segurança na interpretação dos resultados gerados e permitindo a realização de conjuntos de corridas maiores.
7. Estudar a modelagem do tempo de espera por navios com outras distribuições de probabilidade, que não a uniforme. Buscar ajustar uma distribuição a dados reais de histórico, e avaliar o impacto de tempos de espera maiores (por restrições logísticas, por exemplo).

REFERÊNCIAS

AFONSO, M.W.; OLIVEIRA, F.L.C; BORGES, F.J.L. Simulação do processo de formação de carga de um derivado de petróleo para embarque marítimo. In: LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2020, João Pessoa.

AVERILL M. LAW & ASSOCIATES. Expert Fit Website. Disponível em: <https://www.averill-law.com/distribution-fitting/data-analysis-in-general/>. Acesso em: 16 jun. 2024.

BARLAS, Y.; OZGUN, O. Queuing systems in a feedback environment: Continuous versus discrete-event simulation. *Journal of Simulation*, vol.12, nº2, 2018. p. 144-161.

BEAVERSTOCK, M.; GREENWOOD, A.; NORDGREEN, W. *Applied Simulation Modeling and Analysis Using FlexSim*. 3ª ed. Utah: FlexSim Software Products, 2017.

DOANE, P. D.; SEWARD, E.L. *Estatística aplicada à administração e economia*. 4ª ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill Educational, 2014.

FLEXSIM. *FlexSim User Manual*. Disponível em: <https://docs.FlexSim.com/en/23.2/Introduction/Welcome/Welcome.html>. Acesso em: 07 ago. 2023.

GIL, A. C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOMES, G. F.; LEITE, B. F.; MOURA, M. J. C. Desenvolvimento de modelos de simulação de eventos contínuos para otimização da capacidade de tanques em refinaria. XXI Rio Oil & Gas, 2024, Rio de Janeiro.

GRIEVES, M.; Vickers, John. *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*. Springer, Switzerland, 2017. P. 85- 113.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G.J. *Introduction to operations research*. 7ª ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS – IBP. Setor de óleo e gás vai além dos combustíveis. Disponível em: <https://g1.globo.com/especial-publicitario/ipb/noticia/2022/10/31/setor-de-oleo-e-gas-vai-alem-dos-combustiveis.ghtml>. Acesso em: 07 ago. 2023.

HONG, S.; BAL, A.; BADURDEEN, F.; AGIOUTANTIS, Z; HICKS, S. Evaluation of bunker size for continuous/discrete flow systems by applying discrete event simulation: A case study in mining. *Simulation Modelling Practice and Theory* 105, 2020.

ISAKSEN, S.L.; LILLEHEIER, T.; EDWIN, N. Optimizing terminal logistics and dimensioning. . In: *Anais do European Safety and Reliability Conference*, 2018, Trondheim, Noruega. p. 2001 – 2006.

KIM, S.; OFEKEZE, E.; KINIRY, J. R.; KIM, S. Simulation-Based Capacity Planning of a Biofuel Refinery. *MDPI Agronomy Journal*, 2020.

MONTEVECHI, J.A.B.; AMARAL, J.V.S.; MIRANDA, R.C.; SANTOS, C.H.; BRITO, F.O.D.; MACHADO, M.E.F.H.S. Ensemble-based infill search simulation optimization framework. *Proceedings of the 2023 Winter Simulation Conference*, 2023. p. 3059-3070.

MONTEVECHI, J.A.B.; PEREIRA, T.F.; SILVA, C.E.S.; MIRANDA, R.C.; SCHEIDEGGER, A.P.G. Identification of the main methods used in simulation projects. *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference*, 2015. p. 3469-3480.

MONTEVECHI, J.A.B.; LEAL, F.; PINHO, A.F.; COSTA, F.S.; OLIVEIRA, M.L.M.; SILVA, A.L.F. Conceptual modeling in simulation projects by Mean Adapted IDEF: an application in a brazilian tech company. *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, 2010. p. 1624-1635.

MOTA, M. R. R.; KRAMER, R.; LEITE, B.F. Proposição de um modelo de programação matemática para otimização da produção em uma refinaria brasileira. *XXI Rio Oil & Gas*, 2024, Rio de Janeiro.

NUNES, P.M; BLAJBERG, R; HAMACHER, S. Otimização estocástica da programação de movimentação de petróleo: aplicação real ao sistema terminal – duto – refinaria. In: Congresso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2012, Rio de Janeiro. p. 2092 – 2100.

OLIVEIRA, M. M. F.; ARRUDA, E.F. Planejamento de acúmulo de petróleo para parada de suprimento sob incerteza de consumo: estudo de caso do duto OSVAT I e refinarias do estado de São Paulo. In: XLV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2013, Natal. p. 1689 – 1700.

PAOLUCCI, M.; SACILE, R.; BOCCALATTE, A. Allocating crude oil supply to port and refinery tanks: a simulation-based decision support system. *Decision Support Systems* 33, 2002. p. 39-54.

ROJKO, A. Industry 4.0 Concept: Background and Overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies, (iJIM)*, [S. l.], v. 11, n. 5, p. pp. 77–90, 2017. DOI: 10.3991/ijim.v11i5.7072. Disponível em: <https://online-journals.org/index.php/ijim/article/view/7072>. Acesso em: 30 ago. 2023.

ROSS, S.M. *Simulation*. 5ª ed. San Diego: Academic Press, 2012.

RUBINSTEIN, R.Y. *Simulation and the Monte Carlo Method*. 3ª ed. New York: Wiley, 2016.

SCRIVANO, S.; TAN, B.; TOLIO, T. Continuous-flow simulation of manufacturing systems with assembly/disassembly machines, multiple loops and general layout. *Journal of Manufacturing Systems* 69, 2023. p. 103-118.

SPIECKERMANN, S.; STOBBE, M. Applications of Discrete-Event Simulation in the Chemical Industry. In: *Use Cases of Discrete Event Simulation*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. P. 309-319.

TACCINI, M.; IORI, M.; DOTTI, G.; SUBRAMANIAN, A. Improving buffer storage performance in ceramic tile industry via simulation. *Proceedings of the 2023 Winter Simulation Conference*, 2023. p. 1676-1687.

TALUMIS. FloWorks bulk fluids & gas supply chain simulator. Disponível em: <https://www.talumis.com/FloWorks-bulk-fluids-gas-supply-chain-simulator/>. Acesso em: 01 nov. 2024.

WANG, Z.M.; ESCOTET-ESPINOZA, S.; IERAPETRITOU, M. Process analysis and optimization of continuous pharmaceutical manufacturing using flowsheet models. Computers and Chemical Engineering 107, 2017.p. 77-91.