



**Marina Weil Afonso**

**Simulação aplicada na logística de formação de  
carga de derivado de petróleo para embarque  
marítimo**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Fernando Luiz Cyrino Oliveira

Rio de Janeiro

Junho de 2020



**Marina Weil Afonso**

**Simulação aplicada na logística de formação de  
carga de derivado de petróleo para embarque  
marítimo**

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

**Prof. Fernando Luiz Cyrino Oliveira**

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Marcelo Maciel Monteiro**

Universidade Federal Fluminense

**Silvio Hamacher**

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 22 de junho de 2020

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

## Marina Weil Afonso

Graduou-se em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) em 2011. Atualmente trabalha com logística de derivados de petróleo e está cursando o Programa GCLOG (*Graduate Certificate in Logistics and Supply Chain Management*) no Massachusetts Institute of Technology (MIT).

### Ficha Catalográfica

Weil Afonso, Marina

Simulação aplicada na logística de formação de carga de derivado de petróleo para embarque marítimo / Marina Weil Afonso; orientador: Fernando Luiz Cyrino Oliveira. – 2020.

57 f.: il. color.; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2020.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Simulação de eventos discretos. 3. Cadeia de suprimentos. 4. Derivado de petróleo. I. Oliveira, Fernando Luiz Cyrino. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço a Deus por todas as portas abertas. No início parecia um caminho difícil a ser trilhado, mas Deus esteve comigo em todos os momentos e me deu força e sabedoria para realizar meu sonho. Agora que estou na reta final, vejo que sem Ele nada disso seria possível.

Ao Gabriel por acreditar em mim e, por não só sonhar meus sonhos, mas colocar meus sonhos em um outro patamar.

Aos meus pais, Henrique e vó Vera, pelo exemplo, pelos conselhos e pela amizade.

Ao meu orientador, Professor Fernando Cyrino, agrago a confiança no meu trabalho e a impecável orientação.

Ao meu mentor, Eng. Fernando Borges, pela paciência e dedicação ao me passar seus conhecimentos.

À minha gerente Eng. Larissa Pelizaro, pelo incentivo para realizar o mestrado e pela compreensão de minha dedicação ao curso.

Aos amigos do trabalho agradeço pelo companheirismo e pelas risadas, que tornaram tudo mais leve.

E a todos aqueles que me ajudaram a chegar até aqui, eu agradeço!

## Resumo

Afonso, Marina Weil; Oliveira, Fernando Luiz Cyrino (Orientador). **Simulação aplicada na logística de formação de carga de derivado de petróleo para embarque marítimo**. Rio de Janeiro, 2020. 57p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente estudo tem como objetivo o uso de simulação de eventos discretos para avaliar cenários e propor melhorias no processo de formação de carga para embarque marítimo de um derivado de petróleo. Foram simulados cenários com alterações em três variáveis, de modo a observar o impacto na produção anual: capacidade de armazenamento da refinaria, vazão de produção e tamanho do lote de embarque. A criticidade do processo está relacionada à produção ser interrompida por falta de espaço para armazenamento do produto, ao transporte intermodal nos elos da cadeia, à janela de carregamento rodoviário e à existência de incertezas e restrições inerentes às operações de produção, manuseio, armazenamento e transporte. Uma importante conclusão do estudo é que trabalhar com menor lote para embarque marítimo resulta em maior produção anual do derivado, ou seja, tem-se uma estratégia que não envolve nenhuma alteração nos processos ou na infraestrutura. Outros fatores que contribuíram para o aumento da produção anual foram a adição de um tanque na refinaria e o aumento da vazão de produção. As análises conduzidas no estudo são importantes insumos para a tomada de decisão referente ao gerenciamento dos estoques da refinaria e da cadeia de suprimentos. A técnica da simulação permitiu analisar diversos cenários sem a necessidade de implementá-los, mostrando-se, portanto, uma ferramenta eficaz com grande adição de valor ao estudo e à prática da organização.

## Palavras-chave

Simulação de eventos discretos; Cadeia de suprimentos; Derivado de petróleo.

## Abstract

Afonso, Marina Weil; Oliveira, Fernando Luiz Cyrino (Advisor). **Simulation applied to the batch formation logistics for marine shipment of an oil product.** Rio de Janeiro, 2020. 57p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present study aims to use discrete event simulation to evaluate scenarios and propose improvements in the batch formation process for the marine shipment of an oil product. Scenarios with changes in three variables will be simulated in order to observe the impact on annual production: storage capacity of the refinery, production flow rate and size of the shipment batch. The process is critical because of the fact that production is interrupted due to the lack of space for product storage, the intermodal transportation through the echelons in the chain, the loading window for the road modal and the existence of uncertainties and restrictions inherent to production, handling, storage and transportation operations. The study led to the conclusion that shipping a smaller batch results in a higher annual production, which is a strategy that does not involve any changes in processes or infrastructure. Other factors that contributed to the increase in annual production were the addition of a tank at the refinery and the increase in production flow rate. The analyzes conducted in the study are important inputs for decision making regarding the management of refinery and supply chain inventory. The simulation technique allowed the analysis of several scenarios without the need to implement them and is, therefore, an effective tool with great added value to the study and practice of the organization.

## Keywords

Discret event simulation; Supply chain; Oil product.

# Sumário

|   |    |
|---|----|
| 1 Introdução  | 9  |
| 2 Revisão da Literatura   | 12 |
| 2.1. Simulação  | 12 |
| 2.2. Simulação na indústria de petróleo                             | 14 |
| 2.3. Componentes da simulação de sistemas de refinarias de petróleo | 18 |
| 2.4. Outras técnicas para abordagem do problema                     | 20 |
| 3 Contexto de aplicação   | 22 |
| 3.1. Modelagem conceitual   | 22 |
| 3.1.1. Subprocesso produzir derivado                                | 23 |
| 3.1.2. Subprocesso bombear derivado para o PCR                      | 25 |
| 3.1.3. Subprocesso carregar transferência rodoviária                | 25 |
| 3.1.4. Subprocesso descarregar transferência rodoviária             | 26 |
| 3.1.5. Subprocesso carregar derivado no navio                       | 27 |
| 3.2. Análise e tratamento dos dados de entrada                      | 27 |
| 3.2.1. Dados de entrada da refinaria                                | 28 |
| 3.2.2. Dados de entrada do ponto de carregamento rodoviário         | 28 |
| 3.2.3. Dados de entrada do terminal                                 | 29 |
| 3.2.4. Resumo dos dados de entrada                                  | 30 |
| 4 Método  | 32 |
| 4.1. Modelo de Simulação  | 32 |
| 4.2. Restrições do modelo   | 36 |
| 4.3. Premissas básicas  | 37 |
| 4.4. Tempo de aquecimento   | 37 |
| 4.5. Número de Replicações  | 38 |
| 4.6. Validação e verificação do modelo                              | 39 |
| 4.7. Geração e comparação de cenários                               | 41 |
| 5 Resultados e discussões   | 43 |
| 5.1. Cenário base: dois tanques, produção base e lote base          | 43 |
| 5.2. Cenário 1: dois tanques, produção base e lote 25% maior        | 44 |
| 5.3. Cenário 2: dois tanques, produção 10% maior e lote base        | 45 |
| 5.4. Cenário 3: dois tanques, produção 10% maior e lote 25% maior   | 46 |

|   |    |
|---|----|
| 5.5. Cenário 4: três tanques, produção base e lote base           | 47 |
| 5.6. Cenário 5: três tanques, produção base e lote 25% maior      | 48 |
| 5.7. Cenário 6: três tanques, produção 10% maior e lote base      | 49 |
| 5.8. Cenário 7: três tanques, produção 10% maior e lote 25% maior | 50 |
| 5.9. Discussões   | 51 |
| <br>  |    |
| 6 Conclusão   | 54 |
| <br>  |    |
| 7 Referências bibliográficas                                      | 56 |



## Introdução

O Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos, ora vista dentro das empresas de petróleo como atividade de suporte, tem se tornado uma área de relevância estratégica, tratada com o mesmo porte de processos tradicionais tais como exploração e produção e refino, inclusive em termos de hierarquia organizacional.

A indústria de petróleo é caracterizada pelas grandes distâncias entre as maiores reservas, as unidades de refino, os centros de distribuição e os pontos de venda, existindo, portanto, inúmeras camadas separando o cliente final da matéria prima. Somado a isso, tem-se o fato de a indústria de petróleo atuar em um ambiente altamente competitivo e globalizado, e seus produtos serem *comodities*, ou seja, a diferenciação entre eles é mínima. Desta forma, a vantagem competitiva muitas vezes não pode ser obtida através da qualidade dos produtos, mas sim principalmente por meio de aumento da eficiência dos processos logísticos, o que envolve melhoria da performance da cadeia de suprimentos.

De acordo com Chima (2007), o objetivo do gerenciamento da cadeia de suprimentos é fornecer o maior nível de serviço ao consumidor ao menor custo possível, e este gerenciamento deveria ser feito de maneira global, ao invés de buscar maximizar o ganho de cada elo separadamente. No caso da indústria de petróleo, a disponibilidade de matéria prima não é o principal desafio, mas sim colocar as reservas em produção e distribuir os produtos finais aos consumidores ao menor custo. De maneira geral, as empresas de petróleo deveriam sempre prezar pela melhoria da configuração e coordenação de sua cadeia de suprimentos, o que envolve contínua avaliação e mudanças quando necessário.

Para atingir este objetivo, é frequente a utilização de modelos de otimização buscando minimizar custos ou maximizar receitas. Porém, para situações complexas, os modelos analíticos não se mostram adequados. De acordo com Ciglioni *et al.* (2014), modelos de programação linear inteira mista e planilhas eletrônicas são frequentemente utilizadas no apoio à tomada de decisão de projetos de cadeia de suprimentos de petróleo e gás, embora estas técnicas não levem em consideração importantes fatores dinâmicos.

Neste cenário, a simulação se tornou uma área de grande relevância na indústria de petróleo e gás, sendo encontradas aplicações em toda cadeia logística, desde a produção e exploração de petróleo até a distribuição de derivados. A técnica de simulação permite analisar distintos cenários sem a necessidade de implementá-los na prática, o que fornece ao tomador de decisão o desempenho do sistema quando submetido a diferentes configurações.

A logística de derivados de petróleo está inserida em um ambiente complexo onde a produção geralmente é contínua, os volumes produzidos são grandes e o capital empregado, muito alto. Além disso, em uma refinaria de petróleo trabalha-se com uma ampla gama de produtos finais com especificidades de manuseio e armazenamento, e cujo suprimento do mercado é crítico para a economia mundial.

O presente estudo abordou a aplicação da técnica de simulação de eventos discretos na logística de formação de carga para embarque marítimo de um derivado de petróleo. A utilização da simulação se faz necessária em função da complexidade do sistema, caracterizado por envolver três elos da cadeia de suprimentos (refinaria produtora, tancagem intermediária chamada de ponto de carregamento rodoviário e terminal marítimo), transporte intermodal do produto, janela de carregamento para o modal rodoviário e existência de incertezas e restrições inerentes às operações de produção, manuseio, armazenamento e transporte.

A principal motivação do estudo reside em criar um modelo de simulação que represente fielmente este processo de formação de carga do derivado de modo a viabilizar a análise do escoamento da produção da refinaria em direção ao terminal de embarque da carga em diferentes cenários.

A logística do produto requer acompanhamento constante uma vez que a produção pode ser interrompida pela falta de espaço para armazenamento na refinaria. Deste fato surge *trade-off* crítico para a análise da capacidade de armazenamento: a decisão a ser tomada está entre manter maior capacidade de armazenamento para trazer maior garantia de continuidade operacional, o que pode apresentar custos de estoques mais altos, ou manter uma menor capacidade e conseqüentemente maior risco de interrupção da produção, situação em que se tem menores custos de manutenção de estoque porém pode acarretar em vendas perdidas.

O objetivo do estudo é, portanto, o uso de simulação de eventos discretos para avaliar cenários e propor melhorias no processo de formação de carga para embarque marítimo de um derivado de petróleo. Visando reduzir interrupções da produção por falta de espaço para armazenamento, foram simulados cenários com alterações em três variáveis, de modo a observar o impacto na produção anual: capacidade de armazenamento da refinaria, vazão de produção e tamanho do lote de embarque.

Além disso, propõe-se analisar o comportamento dos estoques nos três elos da cadeia em cada um dos cenários simulados, de forma a obter um contexto mais amplo para a tomada de decisão.

O trabalho está dividido em seis seções, sendo a primeira a introdução para contextualizar a pesquisa e justificar sua relevância. O segundo capítulo discorre sobre o conceito e a importância da simulação, assim como sua aplicação na indústria de petróleo e derivados.

A partir do terceiro capítulo é apresentada a aplicação do estudo, começando pelo capítulo 3 com a modelagem conceitual e a análise dos dados de entrada. No capítulo 4 o modelo de simulação é amplamente abordado e os cenários são apresentados. O capítulo 5 se dedica a mostrar e discutir sobre os cenários simulados, e por fim o capítulo 6 traz as conclusões do estudo e sugere oportunidades para pesquisas futuras.

## 2

### Revisão da Literatura

Esta seção apresenta o contexto científico no qual este trabalho está inserido, abordando o conceito de simulação e sua aplicação na indústria de petróleo e gás.

#### 2.1

##### Simulação

Segundo Gavira (2003), à medida em que a complexidade dos estudos realizados na área de pesquisa operacional foi crescendo, surgiu a necessidade de desenvolvimento de técnicas mais sofisticadas de análise. Desta forma, a simulação foi criada em decorrência da escassez de métodos de solução de problemas de natureza estatística ou estocástica. Em Winston (1991), o autor acrescenta que as tentativas para utilizar modelos analíticos para resolver problemas complexos em geral envolvem tantas simplificações da realidade que os resultados provavelmente se tornam inferiores ou inadequados para implementação.

De acordo com Winston (1991), simulação pode ser definida como uma técnica que imita a operação de um sistema real ao longo do tempo, o que é feito normalmente pelo desenvolvimento de um modelo de simulação. O processo de simulação envolve executar o modelo inúmeras vezes de forma a obter amostras representativas dos indicadores de desempenho. Em Hillier e Lieberman (1986), os autores adicionam que a simulação se tornou um braço experimental da pesquisa operacional.

Segundo Hillier e Lieberman (1986), o processo de simulação pode ser aplicado para diferentes alterações na configuração do sistema e, por meio da comparação dos resultados obtidos, pode-se identificar as configurações mais promissoras. Desta forma, a simulação pode ser vista como uma técnica de experimentos de amostragem no modelo de um sistema. Porém, os experimentos

são feitos no modelo e não no sistema real, porque a segunda opção seria mais cara, demandaria mais tempo e poderia causar um inconveniente nas operações.

Cabe ressaltar que simulação não é uma técnica de otimização, mas sim mais utilizada para análise do tipo “*what if*”. Em Hillier e Lieberman (1986), os autores explicam que, em função do erro estatístico, não é possível garantir que a configuração que resulte na melhor performance simulada seja a ótima, mas deveria ao menos ser próxima da solução ótima caso o modelo tiver sido propriamente desenhado.

Em Chwif e Medina (2015) é feita a diferenciação entre simulação contínua e simulação de eventos discretos, sendo que ambas levam em consideração as mudanças de estado do sistema ao longo do tempo. No caso da simulação contínua, o estado do sistema muda continuamente no tempo e, por outro lado, a simulação de eventos discretos é utilizada para modelar sistemas cujo estado muda em momentos discretos no tempo, a partir da ocorrência de eventos. O presente estudo utiliza a simulação de eventos discretos para modelagem do sistema.

Segundo Chwif e Medina (2015), a metodologia da simulação é composta de três grandes etapas, ilustradas na figura 1. Na primeira, concepção ou formulação do modelo, o analista de simulação deve entender o sistema a ser simulado e seus objetivos, definir o escopo e coletar os dados de entrada. O modelo abstrato compreendido pelo analista deve ser transformado em um modelo conceitual por meio da utilização de técnicas de representação de modelos de simulação, de forma a transmitir o entendimento do sistema a todos os envolvidos no projeto. Na segunda etapa, implementação do modelo, utiliza-se algum simulador comercial ou linguagem de simulação para converter o modelo conceitual em modelo computacional. Nesta etapa, também é realizada a verificação e a validação do modelo de forma a certificar de que o modelo representa fielmente a realidade. Por último, tem-se a etapa de análise dos resultados do modelo, momento em que o modelo computacional está apto para a realização de experimentos, passando a ser chamado de modelo operacional. A partir dos resultados desta etapa, conclusões e recomendações podem ser geradas. As três etapas não devem ser vistas como uma sequência linear, dado que na prática podem ocorrer iterações e realimentações do processo à medida em que o entendimento do problema muda.

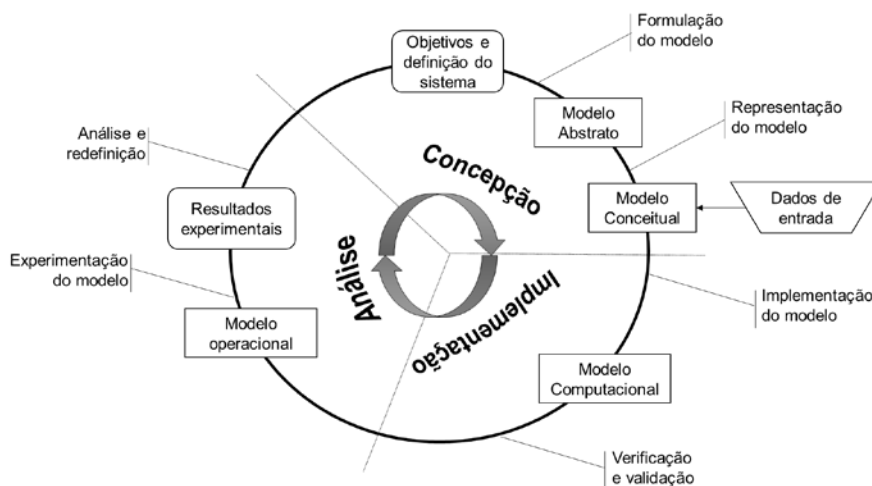


Figura 1 – Metodologia de simulação. Fonte: Adaptado de Chwif e Medina (2015).

## 2.2

### Simulação na indústria de petróleo

A técnica de simulação tem ampla utilização na indústria de petróleo, sendo encontradas aplicações em toda cadeia de suprimentos, desde a operação no segmento *upstream* até em distribuição de derivados. Além disso, por meio desta revisão bibliográfica, constatou-se que a simulação é utilizada tanto na fase de projeto, ou seja, antes do início da operação, como em Limoeiro, Fuller e Araujo Filho (2010) e Isaksen, Lilleheier e Edwin (2018), quanto em sistemas em funcionamento. Neste último caso, Fuller *et al.* (2015) chamam a atenção para duas situações existentes: estudos com modificação nos sistemas existentes, que são por exemplo os casos de revisão da capacidade de armazenagem ou de dimensionamento de frota de veículos observados respectivamente em Chan e Ferreira Filho (2005) e Maisiuk e Gribkovskaia (2014); ou aprimoramento ou controle de processos, como em Csonotos, Halász e Heckl (2018).

Segundo Fuller, Ferreira Filho e Arruda (2018), estudos de dimensionamento de capacidade de sistemas são especialmente importantes em cadeias integradas de petróleo, uma vez que a produção é contínua e geralmente inelástica em relação às flutuações da demanda, ou seja, o fluxo de produto não é somente puxado pela demanda como também empurrado pela produção.

Em Limoeiro, Fuller e Araujo Filho (2010), os autores estudam os impactos logísticos da construção de uma nova refinaria de petróleo no sistema atual de

movimentação de produtos que consiste em duas refinarias já em operação que compartilham o uso de um terminal marítimo para embarque dos produtos de cabotagem. Com isso, tem-se o desafio de definir se há necessidade de expansão da infraestrutura existente e, em caso positivo, analisar em qual configuração de recursos logísticos se deve investir, o que inclui tanques, dutos, bombas ou píeres, de forma a promover um adequado escoamento da produção das três refinarias. Outro desafio encontrado no desenvolvimento do estudo foi a conciliação da característica contínua da produção de derivados nas refinarias com os embarques marítimos no terminal que ocorrem sob demanda, o que impacta no uso da tancagem, dado que esta é responsável por absorver as oscilações nas movimentações de produtos.

No trabalho apresentado em Isaksen, Lilleheier e Edwin (2018), a simulação é utilizada na fase de projeto de dimensionamento de um terminal logístico para exportação de petróleo, estudo que enfrenta desafios devido à variedade de incertezas operacionais e à volatilidade na demanda e no suprimento, o que é acentuado devido ao fato de alguns poços ainda não estarem em operação. A simulação de eventos discretos é utilizada para resolver parte da função objetivo de um modelo de otimização, e vários fatores devem ser levados em consideração na decisão da quantidade e do tamanho dos tanques, tais como condições climáticas, perfil de produção dos poços, disponibilidade de navios tanques e qualidade do petróleo a ser exportado. Observa-se um *trade-off* na medida em que a construção e manutenção de tanques apresenta alto custo, enquanto por outro lado o subdimensionamento pode levar a maiores perdas financeiras devido a atrasos na produção.

Para resolver este *trade off*, em Isaksen, Lilleheier e Edwin (2018) utiliza-se otimização cuja função objetivo é maximizar a diferença entre a receita da exportação de petróleo menos o CAPEX (despesas de capital) e o OPEX (despesas operacionais), onde a receita perdida devido a problemas ocasionados por falta de espaço para armazenamento de petróleo é interpretada como um custo. Porém, mensurar a receita das operações de exportação de petróleo, tal como a perda de receita citada anteriormente, envolve muitas incertezas advindas de diversas variáveis difíceis de serem representadas em equações, o que motivou a utilização da simulação de eventos discretos. Este tipo de simulação é indicado para resolução de problemas desta natureza, dado que são caracterizados pela

ocorrência de eventos em pontos discretos no tempo. Exemplos de eventos são, por exemplo, a chegada de navio, o enchimento ou o esvaziamento de um tanque devido a operação de carga ou descarga.

O problema apresentado em Isaksen, Lilleheier e Edwin (2018) contém elementos de sistemas contínuos e de eventos discretos. Por exemplo, quando um navio descarrega no terminal, tem-se uma vazão constante e o aumento do nível do tanque do terminal é contínuo no tempo. Porém, não há necessidade de monitorar continuamente o nível do tanque, mas sim pode-se criar um evento quando o tanque do terminal estiver cheio ou o tanque do navio estiver vazio. Nestes casos onde há elementos contínuos e discretos, geralmente é mais eficiente criar um modelo de simulação de eventos discretos e acrescentar os elementos de fluxos contínuos do que o contrário. Este artifício de modelagem foi fundamental para a construção do modelo apresentado na presente dissertação.

Em Chan e Ferreira Filho (2005) também é abordado um problema de dimensionamento de capacidade de armazenagem, porém neste caso trata-se de uma refinaria de petróleo em operação. A simulação de eventos discretos foi a técnica utilizada devido à natureza estocástica da demanda do mercado, da vazão de produção e dos tempos de análises dos produtos no laboratório, e devido à complexidade do sistema envolvendo sazonalidade dos dados de mercado, logística complexa com diversas interfaces e grande número de variáveis e restrições. Os cenários foram gerados variando a quantidade de tanques utilizados para armazenamento de gasolina e comparou-se os resultados no que diz respeito à probabilidade de ocorrência de falta produto para entrega para o mercado. Como conclusão, constatou-se que seria possível reduzir o parque de armazenagem em operação.

A simulação de eventos discretos também é utilizada para endereçar problemas de dimensionamento da frota de veículos, como o caso apresentando em Maisiuk e Gribkovskaia (2014), em um contexto em que há a necessidade de determinar quantos navios devem ser contratados para fazer o suprimento das instalações *offshore* de petróleo e gás. A programação de suprimentos das instalações pelos navios está submetida a incertezas advindas das condições climáticas, que afetam o tempo de viagem do navio da base de ressuprimento até a instalação e o tempo da execução do serviço. Quando não há navio para cumprimento da programação em função destes atrasos, contrata-se um navio no



mercado *spot*. O modelo de simulação objetiva, portanto, avaliar alternativas de tamanho de frotas de navios levando em consideração a incerteza climática e os futuros fretes no mercado *spot*.

Outro caso de análise de investimento de infraestrutura para um sistema já em operação é abordado em Feng *et al.* (2015). Um modelo de simulação é desenvolvido para estimar os custos logísticos associados com a descarga de navios petroleiros em um terminal marítimo. Estes custos são compostos de custos de amortização do investimento na construção do terminal, custos operacionais, custos de estadia dos navios e custo de manutenção de estoque de petróleo. O modelo tem dois objetivos, sendo o primeiro avaliar a taxa de transferência de petróleo que minimiza os custos totais e o segundo avaliar várias combinações de investimento na infraestrutura existente, o que envolve adição de um berço, melhoria nos equipamentos e dragagem do canal de navegação. Desta forma, os resultados do modelo poderão auxiliar no planejamento das operações do porto e dos investimentos futuros.

A simulação também é utilizada para aprimorar os processos de programação de operações, como é o caso descrito em Csontos, Halász e Heckl (2018). Neste estudo, o problema reside na elaboração de cronogramas de bombeios de derivados de petróleo produzidos em uma refinaria até os pontos de venda dos produtos, cujo detalhamento deve incluir o tipo de produto a ser transportado, a quantidade, o caminho, e os horários de início e término da operação. Devido à complexidade da rede de dutos e das diversas variáveis, tal como as operações da refinaria, as vendas em cada ponto e a determinação da sequência de bombeio, manualmente é possível verificar a viabilidade da programação do transporte dutoviário somente para um horizonte de três ou quatro dias. Com o auxílio da simulação foi possível atender a necessidade de ter um cronograma validado com horizonte de trinta dias, reduzindo os erros e permitindo que a operação tenha foco na antecipação de possíveis problemas de balanceamento e no aumento da velocidade de reação. Um benefício adicional da utilização da simulação neste contexto foi a redução do impacto ambiental causado pelo uso de transporte rodoviário e ferroviário quando a programação de bombeio se tornava inviável.

O trabalho apresentado em Carotenuto, Giordani e Zaccaro (2014) tem como objeto de estudo uma empresa de produção e distribuição de derivados de

petróleo que atua no transporte de petróleo oriundo de diversos países para a refinaria, processos de refino, transporte marítimo dos derivados para terminais costeiros e distribuição dos produtos via modal rodoviário para postos de gasolina. O foco do artigo é o suprimento dos terminais marítimos, que pode ser feito utilizando a produção da refinaria transferida por navio já contratado (*time charter*) ou por contrato específico para uma operação (*spot*) para os terminais. No caso em que a produção é insuficiente, tem-se a opção de compras de derivados no mercado.

Em Carotenuto, Giordani e Zaccaro (2014) explica-se que foram previamente estabelecidos valores de referência de estoque que servem como um alvo a ser perseguido nas operações nos terminais. A simulação deste sistema de suprimento objetiva a análise da interferência do tráfego de navios na variação do nível de estoques nos três terminais, em comparação com a meta de estoque definida, assim como permite o estudo do impacto de diferentes ações para reduzir esta variabilidade. A redução da variação do nível de estoques significa maior controle do processo de suprimento da demanda dos terminais, o que subsidia a decisão de redução da meta de estoque e, como consequência, obtém-se redução do custo total de manutenção de estoques. Em um cenário simulado envolvendo alargamento da janela de atracação e desatracação de navios para carregamento de produtos da refinaria obteve-se o resultado não somente de redução do desvio padrão em 2.000 toneladas como também de menores custos com estadia de navios.

## 2.3

### **Componentes da simulação de sistemas de refinarias de petróleo**

O modelo de simulação desenvolvido em Csontos, Halász e Heckl (2018) envolve quatro elementos: tanques, dutos, pontos de conexão de dutos e locais de operação. Os tanques contêm parâmetros importantes: é composto de uma parte imóvel (volume de lastro), que não pode ser bombeada, e de uma parte móvel, que corresponde à capacidade que de fato pode ser utilizada. Produtos diferentes são direcionados a tanques diferentes, e esta configuração pode ser modificada em certas circunstâncias.

O estudo apresentado em Fuller *et al.* (2015) propõe um modelo de simulação de refinarias e complementa que, devido à natureza da produção contínua destas unidades operacionais, sem os tanques não seria possível regular a produção, e a ocorrência de problemas ou variações em qualquer parte da refinaria afetaria todos os processos. As principais características de um tanque para um modelo de simulação são sua capacidade e quais produtos podem armazenar e, durante a execução da simulação, eles podem assumir diferentes estados. A depender do nível e da qualidade de produto que armazenam em determinado momento, os estados podem ser: vazio, pronto para encher, enchendo, cheio, certificado, pronto para esvaziar, esvaziando, ou ainda desenquadrado. Estes estados básicos formam um ciclo, ilustrado na figura 2.

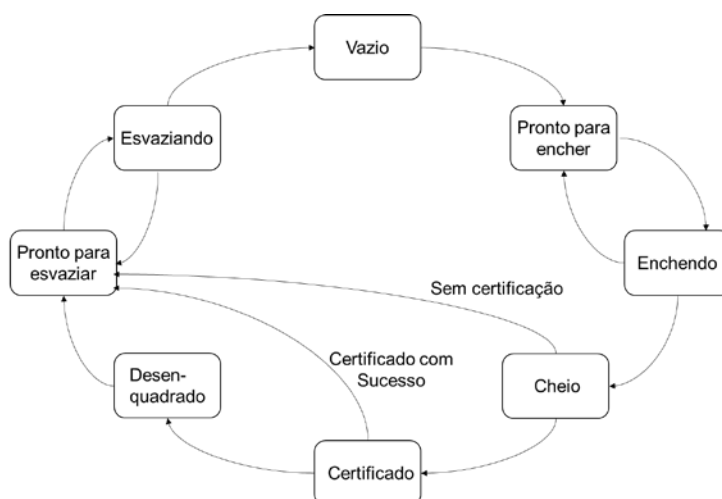


Figura 2 – Ciclo de estados de tanques. Fonte: Adaptado de Fuller *et al.* (2015).

De acordo com Csontos, Halász e Heckl (2018) os elementos dutos variam de acordo com sua origem e destino, diâmetro, comprimento e volume. Em Fuller *et al.* (2015) os dutos são enquadrados como parte do elemento recursos, que por sua vez também engloba as bombas e as válvulas e pode assumir os estados de “disponível” e “indisponível” ao longo do curso da simulação, assim como podem seguir janela de horário para operação. Os recursos limitam as operações quando indisponíveis e impõem limites de capacidades em operações.

Em Fuller *et al.* (2015) são acrescentados outros elementos de simulação: produtos e operações. No caso da simulação de uma refinaria, operações se referem basicamente à movimentação de produtos entre tanques. A operação é

executada até que ocorra algum evento que determine sua interrupção ou que o estado dos elementos dos quais a operação depende mude e isso implique em impossibilidade de se prosseguir, por exemplo, quando um tanque fica vazio ou cheio.

Ainda de acordo com Fuller *et al.* (2015), eventos podem ser definidos como conjuntos de estados de recursos, tanques ou operações, e podem ser acompanhados para gerar resultados na simulação ou podem provocar alterações de estados nos elementos.

Segundo Fuller *et al.* (2015), regras de priorização de operações são definidas para determinar qual operação deve ser executada e, portanto, utilizará os recursos disponíveis. Estas regras devem ser definidas, por exemplo, para decisão de qual tanque a produção deve ser direcionada, ou para a decisão de executar a operação parcialmente ou liberar os recursos para outras operações.

## 2.4

### Outras técnicas para abordagem do problema

A técnica da simulação foi selecionada para utilização no presente estudo em função da complexidade do sistema, mas cabe ressaltar que na literatura encontram-se outras abordagens para problemas de mesma natureza, como, por exemplo, o uso de otimização, heurística e metaheurística. É frequente também o uso integrado de simulação e otimização, como apresentado em Isaksen, Lilleheier e Edwin (2018).

Em Oliveira *et al.* (2016) é abordado o problema de programação operacional de suprimento de petróleo em refinaria atendida por terminal marítimo, o que envolve o cronograma de atracação e descarga de navios no terminal, a definição do nível de estoque no terminal e na refinaria e a determinação do cronograma de bombeio de petróleo do terminal para a refinaria. Para resolver o problema, foi utilizada a combinação da otimização estocástica baseada em programação linear inteira mista dois estágios e de um *framework* para considerar a incerteza da chegada dos navios no terminal, que consiste na geração de cenários para o modelo estocástico. O objetivo era obter uma representação da incerteza da chegada dos navios de forma que os cronogramas das atividades possam ser implementados na prática. Os resultados

computacionais mostraram que a viabilidade é a principal questão do planejamento de curto prazo, sendo a representação da incerteza de extrema importância para o modelo de otimização.

Em Wang, Rong e Feng (2009) é apresentado outro problema de suprimento de petróleo em refinarias e objetiva-se aumentar a robustez dos cronogramas elaborados adicionando restrições probabilísticas para tratar as variáveis estocásticas de demanda e chegada de navios no terminal a um modelo determinístico existente de programação linear inteira mista.

### 3

## Contexto de aplicação

Esta seção apresenta as etapas desenvolvidas para conhecimento do contexto do estudo antes do início da modelagem computacional. O primeiro passo foi o entendimento do processo por meio da estruturação da modelagem conceitual, seguida da coleta de dados que serão as entradas para o modelo.

### 3.1

#### Modelagem conceitual

O objeto de estudo é um processo que envolve desde a produção do derivado de petróleo na refinaria até o carregamento de navios no terminal aquaviário. Após a produção, o produto é bombeado para um tanque intermediário localizado no ponto de carregamento rodoviário (PCR), de onde o derivado é transferido para o terminal aquaviário via caminhão. Posteriormente, o produto é bombeado para um navio até a conclusão do embarque do lote e desatracação, sendo este momento considerado o final do processo. Percebe-se aqui a complexidade do sistema uma vez que envolve transporte intermodal do produto por dutos, caminhões e navios em três elos da cadeia: refinaria, PCR e terminal aquaviário, conforme figura 3.

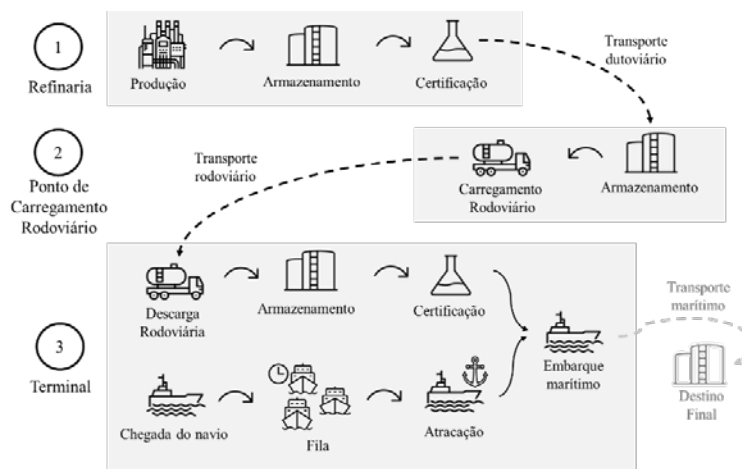


Figura 3 – Modelo conceitual do processo de formação de lote.  
Fonte: Elaboração própria.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Os ícones utilizados na figura 3 foram obtidos em <https://thenounproject.com/>. Acesso: 05/05/2020

O macroprocesso está representado no fluxograma com metodologia BPMN da figura 4. Observa-se que ele apresenta cinco subprocessos: produzir derivado, bombear derivado para o PCR, carregar transferência rodoviária, descarregar transferência rodoviária e carregar derivado no navio.

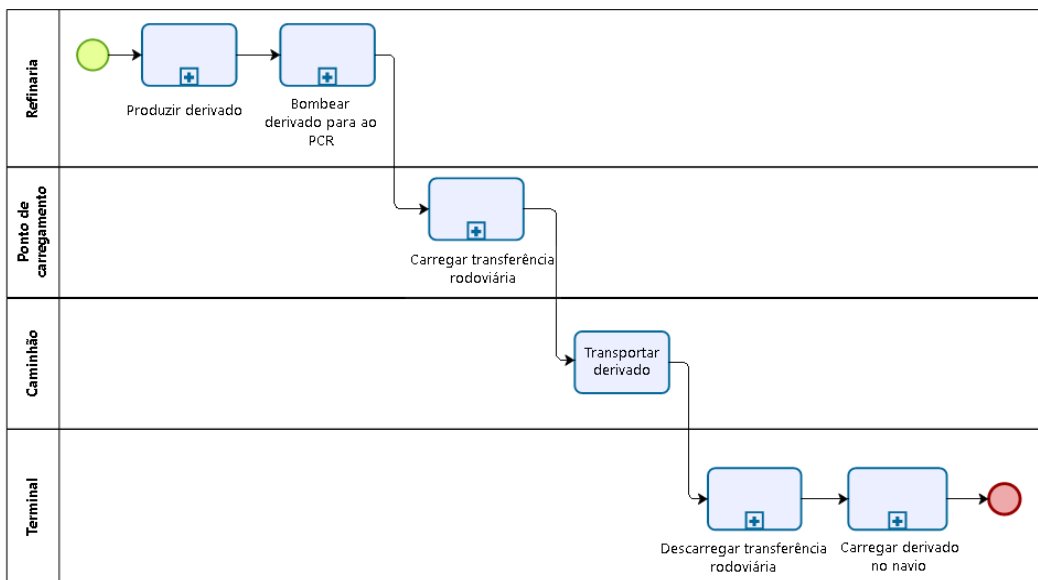


Figura 4 – Macroprocesso do processo de formação de lote. Fonte: Elaboração própria.

### 3.1.1

#### Subprocesso produzir derivado

O subprocesso produzir derivado envolve as atividades que ocorrem na refinaria. A produção ocorre de forma contínua e são utilizados dois tanques para armazenamento do produto. Desta forma, para que a refinaria esteja em plena operação, sempre deve haver um tanque recebendo produto e outro tanque com produto certificado bombeando para o PCR, o que pode ser observado no gráfico da figura 5. Cabe ressaltar que antes de ser bombeado para o PCR, o produto deve ser certificado. Em função da confidencialidade dos dados, os valores nos eixos foram omitidos.

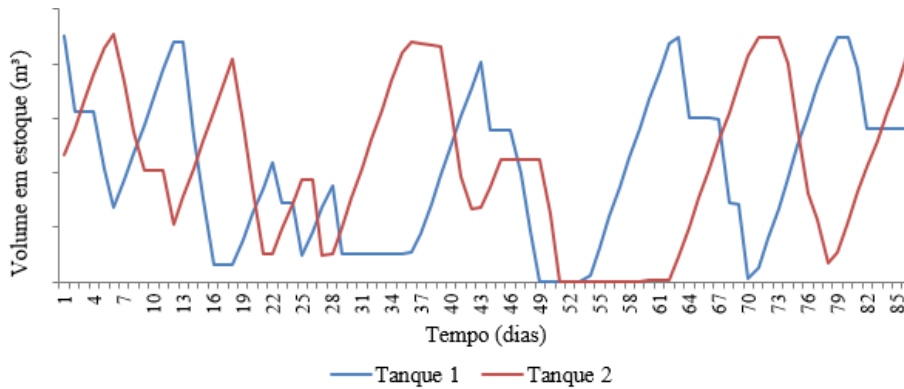


Figura 5 – Esquema de tancagem da refinaria. Fonte: Elaboração própria.

O derivado produzido é então armazenado em um tanque. Quando se atinge a capacidade máxima para armazenamento do produto neste tanque ou quando há necessidade de bombeio do produto armazenado para o PCR, há um *gateway* inclusivo onde duas atividades paralelas são realizadas.

De um lado ocorre a certificação do tanque, processo que vai desde a coleta de amostra até a emissão do certificado de análise, quando o tanque está apto para movimentação. O produto é então bombeado para o PCR assim que houver espaço para recebimento.

Do outro lado é verificado se há outro tanque disponível para receber a produção. Em caso negativo, a produção é interrompida por falta de espaço para armazenamento. Caso haja algum tanque com espaço para recebimento de produto, este então passa a armazenar a produção.

Este subprocesso ilustra a maior criticidade da operação: deve-se trabalhar no intuito de sempre haver um tanque com espaço para recebimento de produto de forma a garantir a continuidade da produção.

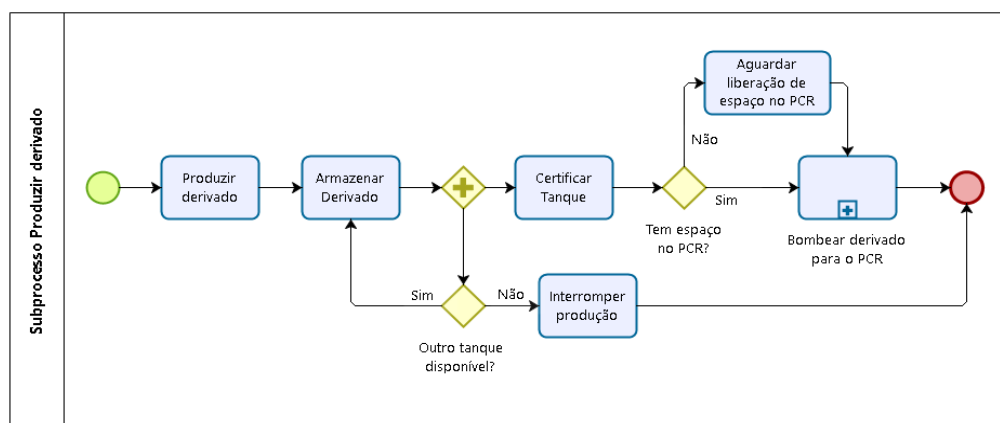


Figura 6 – Modelo conceitual do subprocesso produzir derivado. Fonte: Elaboração própria.



### 3.1.2

#### Subprocesso bombear derivado para o PCR

O ponto de carregamento rodoviário se refere a uma tancagem intermediária para armazenamento do produto. Possui um tanque, sendo que existe a restrição de que o carregamento rodoviário não pode ocorrer simultaneamente ao recebimento dutoviário, ou seja, este tanque não atua como um pulmão.

A operação de bombeio de produto para o PCR ocorre sempre que há necessidade de recebimento de produto neste ponto ou quando algum tanque da refinaria está cheio e precisa abrir espaço. O envio dutoviário cessa quando algum dos dois eventos ocorre: o tanque da refinaria fica sem produto ou o tanque do PCR fica sem espaço para recebimento.

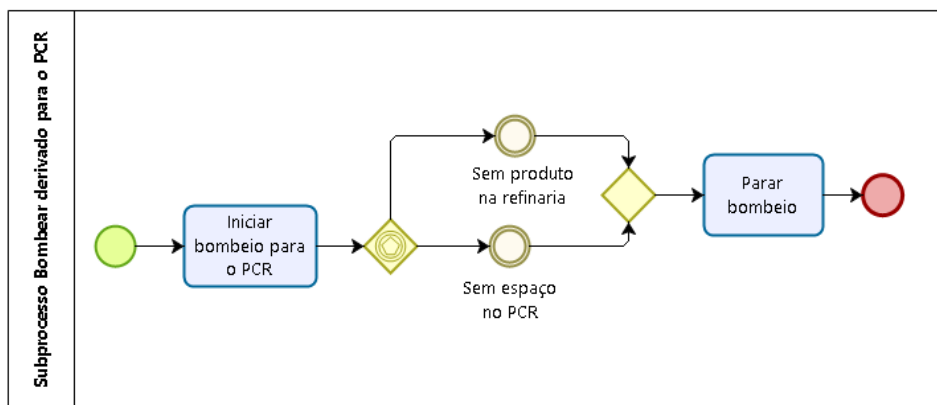


Figura 7 – Modelo conceitual do subprocesso bombear derivado para o PCR.

Fonte: Elaboração própria.

### 3.1.3

#### Subprocesso carregar transferência rodoviária

Ao chegar no PCR, o caminhão deve passar por inspeção e pesagem, quando então é autorizado a iniciar o carregamento. Existe somente uma baia para carregamento, o que implica em fila caso haja mais de um caminhão no PCR ao mesmo tempo. Após a carga, novo procedimento de pesagem é realizado.

Neste subprocesso encontramos outra importante restrição do sistema: o carregamento dos caminhões no PCR ocorre somente em determinada janela de carga pré-estabelecida.

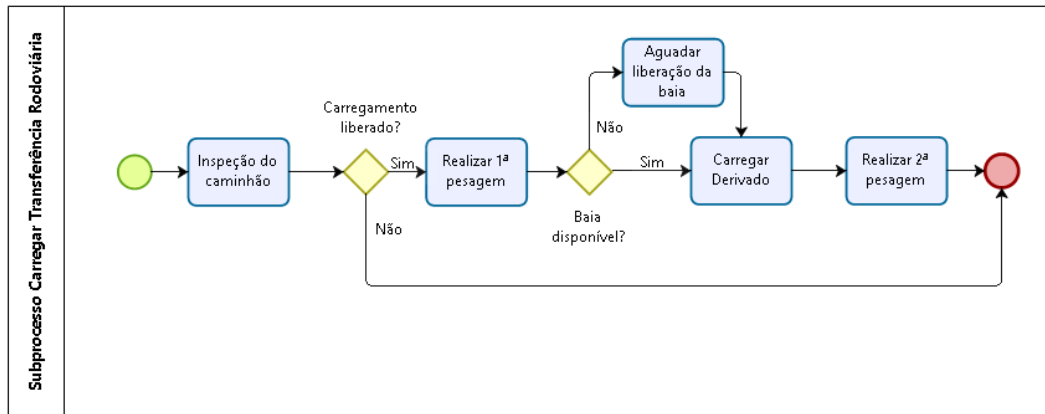


Figura 8 – Modelo conceitual do subprocesso carregar transferência rodoviária.

Fonte: Elaboração própria.

### 3.1.4

#### Subprocesso descarregar transferência rodoviária

Após o carregamento no PCR, os caminhões se deslocam até o terminal aquaviário onde são descarregados em dois tanques. O caminhão é novamente inspecionado e pesado, e então dirigido à baia de descarga. Existe somente uma baia, portanto ocorre fila caso haja mais de um caminhão no terminal. A operação de descarga é semelhante à de carga, com exceção de que após a descarga é verificado se o tanque deve ser amostrado e certificado. A certificação do tanque pode ser solicitada em duas ocasiões: quando o tanque estiver cheio ou quando o lote estiver formado e o a data de atracação do navio estiver próxima.

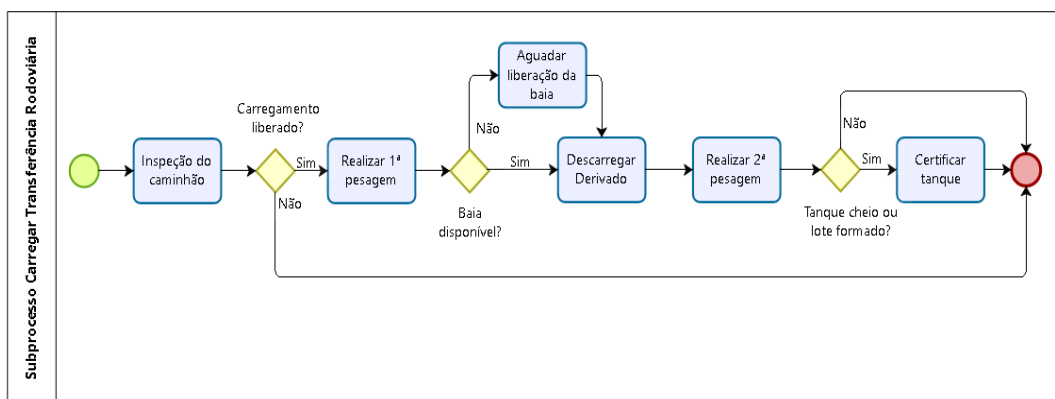


Figura 9 – Modelo conceitual do subprocesso descarregar transferência rodoviária.

Fonte: Elaboração própria.

### 3.1.5

#### Subprocesso carregar derivado no navio

Este subprocesso ocorre no terminal aquaviário e se inicia quando o navio chega no porto. Neste momento verifica-se se há berço disponível e, em caso negativo, o navio deve esperar em fila. Quando houver berço disponível, o navio inicia a operação de atracação que é seguida de uma etapa de inspeção do navio. Caso o navio esteja apto para recebimento do produto, inicia-se o carregamento seguido da desatracação do navio, momento este que caracteriza o término do processo em estudo.

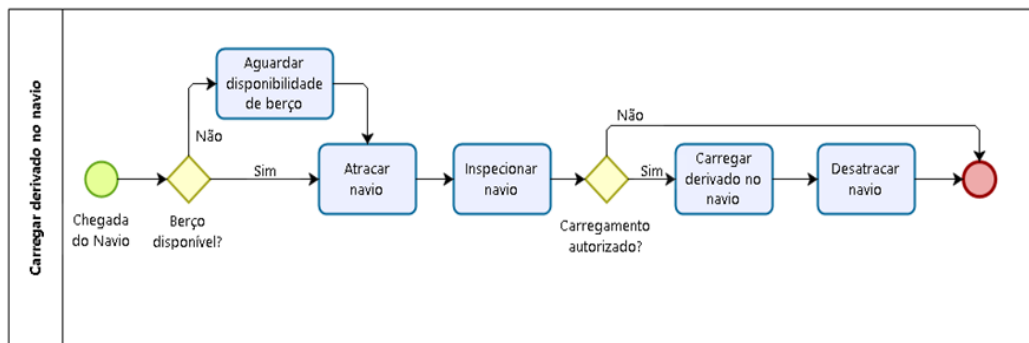


Figura 10 – Modelo conceitual do subprocesso carregar derivado no navio.

Fonte: Elaboração própria.

### 3.2

#### Análise e tratamento dos dados de entrada

Os dados de entrada referem-se às operações que ocorrem nos três elos da cadeia e foram coletados nos bancos de dados ou por meio de planilhas de controle. Adicionalmente, foram feitas consultas a operadores que atuam nos processos de forma a obter a triangulação dos dados. Os dados foram multiplicados por uma constante de forma a preservar confidencialidade dos mesmos.

Após a coleta de dados de entrada foi realizada análise e tratamento de *outliers* antes dos testes para ajustar a distribuição de probabilidade que melhor representa os dados históricos com o uso do software *Input Analyzer*.

### 3.2.1

#### Dados de entrada da refinaria

A vazão de produção foi representada por uma distribuição triangular com valores de mínimo, moda e máximo indicados por especialista responsável pela programação da produção da refinaria. Os dados históricos não foram utilizados pois não representavam a perspectiva da produção para o próximo ano devido a uma alteração recente no perfil de produção da unidade.

O tempo de certificação foi considerado como sendo o tempo decorrido desde a amostragem do tanque até a emissão do certificado de análise, quando o tanque se encontra pronto para movimentação. Foram utilizados dados históricos de janeiro a outubro de 2019 e, após a análise e tratamento de *outliers*, a melhor distribuição obtida foi uma distribuição de probabilidade Erlang.

A vazão de bombeio do produto da refinaria para o ponto de carregamento rodoviário foi considerada constante uma vez que não é observada variação significativa e o dado não tem grande relevância para o sistema simulado.

### 3.2.2

#### Dados de entrada do ponto de carregamento rodoviário

Os dados de entrada provenientes de operações que ocorrem no ponto de carregamento referem-se ao período de agosto a novembro de 2019, com exceção do tempo da segunda pesagem para o qual foi utilizada uma constante.

Estas informações são essenciais na construção do modelo pois determinam se os caminhões conseguirão ou não retornar ao PCR para fazer o segundo carregamento do dia, o que influencia no tempo de formação do lote para embarque marítimo.

Abaixo nas figuras 11 e 12 estão representados os histogramas de tempo de carregamento e tempo de deslocamento entre o PCR e o terminal.

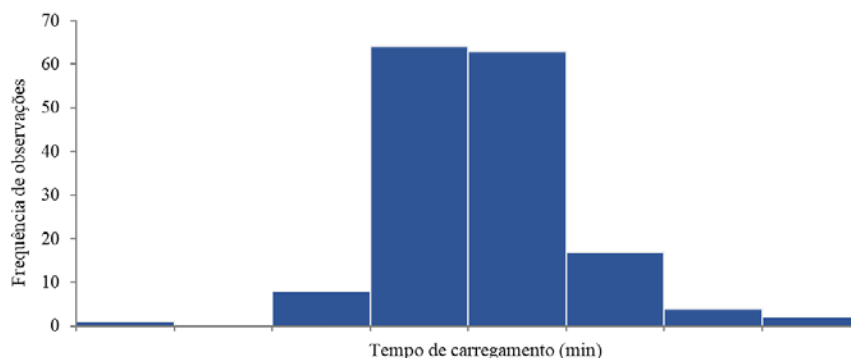


Figura 11 – Histograma do tempo de carregamento no PCR. Fonte: Elaboração própria.

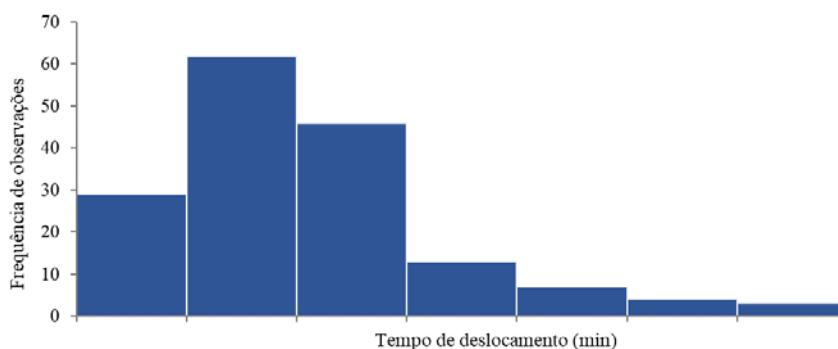


Figura 12 – Histograma do tempo de deslocamento entre o PCR e o terminal.

Fonte: Elaboração própria.

### 3.2.3

#### Dados de entrada do terminal

Da mesma forma que para o PCR, os dados de descarga rodoviária no terminal referem-se ao período de agosto a novembro de 2019, com exceção do tempo da segunda pesagem para o qual foi utilizada uma constante. O tempo de certificação dos tanques do PCR, por não apresentar grande variabilidade e não ser muito relevante no processo, foi considerado como uma distribuição triangular.

Os dados referentes à operação de navios foram coletados para o período de 2015 a 2019. A defasagem do tempo na chegada do navio refere-se à diferença entre a data de chegada do navio e o primeiro dia da faixa de carregamento programada, e o tempo de espera na fila para atracação refere-se ao intervalo de tempo entre a chegada do navio e o início da manobra de atracação. As distribuições obtidas com o *Input Analyzer* foram, respectivamente Exponencial e Lognormal, e como consequência a modelagem ficou descaracterizada em função

de valores de fila e defasagem de chegada do navio acima do observado historicamente, gerando distorções nos resultados. Evitando-se obter dados discrepantes fora da faixa dos dados observados, optou-se por utilizar distribuição triangular com base nos dados coletados. Estes dois dados de entrada são fundamentais na elaboração do modelo pois representam a variabilidade da operação de navios, e estão representados graficamente nas figuras 13 e 14.

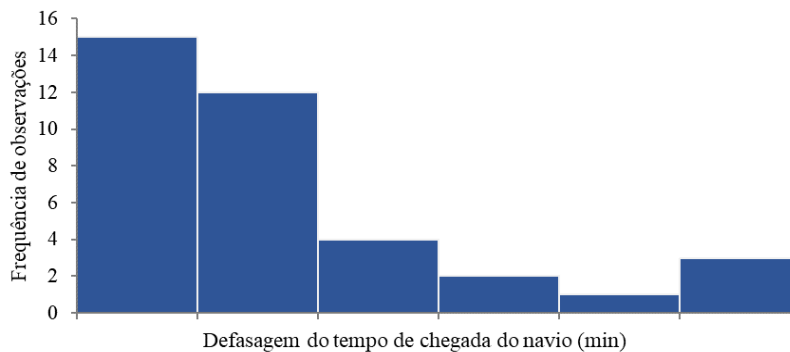


Figura 13 – Histograma da defasagem do tempo na chegada do navio.

Fonte: Elaboração própria.

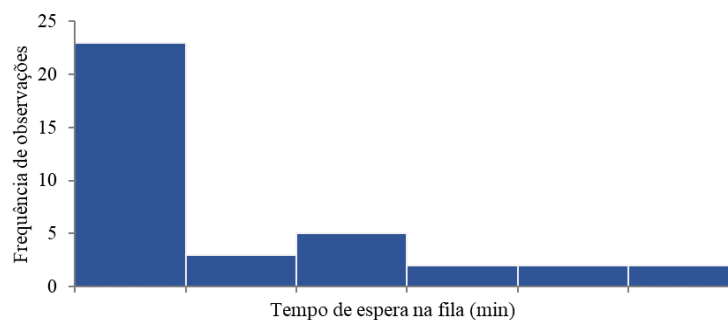


Figura 14 – Histograma do tempo de espera na fila. Fonte: Elaboração própria.

### 3.2.4

#### Resumo dos dados de entrada

A tabela 1 apresenta o resumo das variáveis de entrada utilizadas no modelo detalhando qual a distribuição de probabilidade utilizada para modelagem de cada uma delas.

Tabela 1 – Dados de entrada.

| Elo da Cadeia                    | Dado de entrada                                 | Distribuição de Probabilidade      |                                   |
|----------------------------------|---|------------------------------------|-----------------------------------|
| Refinaria                        | Vazão de produção (m <sup>3</sup> /min)         | Triangular                         | TRIA (0.1604, 0.206, 0.245)       |
|                                  | Tempo de certificação (min)                     | Erlang                             | 224.4 + ERLA (339.9, 6.6)         |
|                                  | Vazão do bombeio (m <sup>3</sup> /min)          | Constante                          | 1.9239                            |
| Ponto de carregamento rodoviário | Defasagem de tempo na chegada do caminhão (min) | Beta                               | -1.65 + 92.4 * BETA(0.7821, 4.62) |
|                                  | Tempo de <i>check list</i> e pesagem (min)      | Lognormal                          | 24.75 + LOGN (53.79, 73.92)       |
|                                  | Tempo de carregamento (min)                     | Erlang                             | 130.35 + ERLA (0.8085, 56.1)      |
|                                  | Tempo da segunda pesagem (min)                  | Constante                          | 49.5                              |
|                                  | Tempo de deslocamento até o terminal (min)      | Erlang                             | 133,65 + ERLA (15.609 + 9.9)      |
| Terminal                         | Tempo de deslocamento interno (min)             | Lognormal                          | 19.8 + LOGN (38.61, 25.179)       |
|                                  | Tempo de descarga rodoviária (min)              | Lognormal                          | 135.3 + LOGN (152.13, 137.94)     |
|                                  | Tempo da segunda pesagem (min)                  | Constante                          | 49.5                              |
|                                  | Tempo de certificação (min)                     | Triangular                         | TRIA (4554, 6072.66, 7589.34)     |
|                                  | Defasagem de tempo na chegada do navio (min)    | Triangular                         | TRIA (0, 22770, 98307)            |
|                                  | Tempo de espera na fila para atracação (min)    | Triangular                         | TRIA (59.4, 6781.5, 53262)        |
|                                  | Tempo de atracação (min)                        | Triangular                         | TRIA (211.2, 329.01, 379.5)       |
|                                  | Tempo de inspeção (min)                         | Weibull                            | 693 + WEIB(1158.3, 2.8347)        |
|                                  | Vazão de carregamento (m <sup>3</sup> /min)     | Triangular                         | TRIA(3.762, 11.088, 16.032)       |
| Tempo de desatracação (min)      | Beta  | 181.5 + 709.5 * BETA (3.96, 7.161) |                                   |

Fonte: Elaboração própria.

## 4

### Método

O método utilizado para modelar o sistema descrito no capítulo 3 foi a Simulação de Eventos Discretos, com a implementação no software Arena 16. Nas seções a seguir serão apresentados o modelo de simulação desenvolvido, as premissas do sistema e as restrições inseridas no modelo. Em seguida é apresentada a verificação e validação do modelo computacional. Após esta etapa serão apresentados os cenários simulados e os indicadores de desempenho utilizados para avaliação e comparação dos cenários.

#### 4.1

##### Modelo de Simulação

O início do processo de simulação está na produção da refinaria, que é representada por uma variável aleatória sorteada diariamente. Em seguida, a produção é armazenada nos tanques da refinaria. O volume total considerado do tanque é sua capacidade operacional, ou seja, a capacidade que o tanque tem de operar em segurança e bombear para o PCR, sendo desconsiderados os volumes de lastro e espaço de segurança. Para cada tanque da refinaria foram definidos quatro níveis de estoque:

a) Ponto R0: Corresponde ao nível do tanque vazio.

b) Ponto R1: Corresponde ao volume mínimo necessário no tanque para se iniciar o bombeio para o PCR. Caso o bombeio já esteja ocorrendo, este volume pode ser retirado do tanque.

c) Ponto R2: Volume máximo que o tanque deve conter para retornar a produção caso ela esteja interrompida por falta de espaço para armazenamento. Isto foi definido para evitar que a produção retorne e novamente pare por falta de espaço.

d) Ponto R3: Corresponde ao volume operacional do tanque, ou seja, tanque cheio.



A figura 15 mostra, a caráter ilustrativo, os níveis de estoque dos tanques da refinaria utilizados no modelo de simulação e descritos acima.

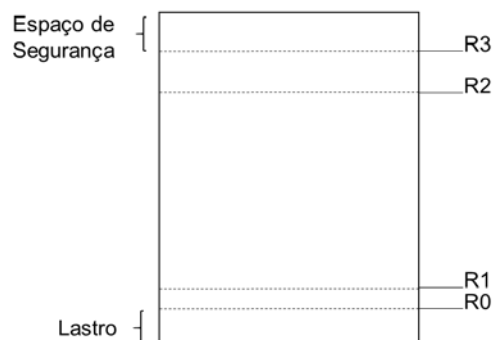


Figura 15 – Níveis de estoque dos tanques da refinaria. Fonte: Elaboração própria.

Os pontos R0 e R3 da refinaria, quando atingidos, disparam eventos na simulação:

a) Quando o tanque da refinaria estiver vazio (ponto R0), imediatamente o bombeio para o PCR é interrompido e verifica-se se há necessidade de recebimento de mais produto neste ponto. Em caso afirmativo, procura-se outro tanque na refinaria com produto disponível, certifica-se o tanque (se ainda não estiver certificado) e prossegue-se com a operação de bombeio. No caso em que o tanque que irá bombear estiver recebendo produção, a mesma deve ser destinada a outro tanque. Isto frequentemente ocorrerá quando se opera com dois tanques.

b) Quando o tanque da refinaria estiver cheio (ponto R3), é necessário buscar o tanque com menor nível de estoque para armazenar a produção. Caso não haja outro tanque com espaço para recebimento de produto, a produção é interrompida por falta de espaço para armazenamento. Em paralelo, certifica-se o tanque cheio e verifica-se se há espaço para recebimento de produto no PCR. Em caso afirmativo, o bombeio é iniciado.

O mesmo raciocínio foi utilizado para o tanque do PCR. Foi considerado somente o volume operacional e foram definidos níveis de volume em tanque para auxiliar na simulação, sendo estes níveis ilustrados na figura 16:

a) Ponto P0: Corresponde ao nível de tanque vazio.

b) Ponto P1: Volume mínimo necessário para envio de produto para caminhão, ou seja, este ponto é equivalente à capacidade do caminhão para que se

evite iniciar o carregamento e não terminar por falta de disponibilidade de produto.

c) Ponto P2: Corresponde ao volume necessário para o carregamento de 80% do volume programado para um dia.

d) Ponto P3: Volume máximo contido no tanque para início do recebimento de bombeio.

e) Ponto P4: Máximo da capacidade operacional do tanque do PCR.

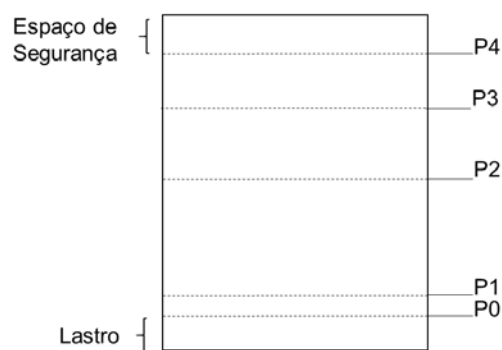


Figura 16 – Níveis de estoque dos tanques do PCR. Fonte: Elaboração própria.

Assim como no caso na refinaria, alguns níveis de estoque do PCR disparam eventos na simulação, o que é o caso dos pontos P2 e P4:

a) Quando o tanque do PCR atinge o volume mínimo necessário para que ocorra transferência rodoviária naquele dia (ponto P2), aguarda-se o fechamento da janela de carregamento rodoviário e verifica-se se há algum tanque na refinaria com volume suficiente para enviar produto por bombeio (volume acima do ponto R1). Em caso afirmativo, prossegue-se com a certificação do tanque (se não estiver certificado) e posterior bombeio para o PCR. Caso este tanque da refinaria estiver recebendo produção, a mesma deve ser direcionada a outro tanque com espaço disponível.

Caso não seja localizado nenhum tanque com volume suficiente para bombear para o PCR, gera-se uma espera correspondente a 24 horas, e então a entidade verifica novamente se há produto disponível na refinaria. Este procedimento foi adotado para evitar descontinuidade do processo caso haja baixo estoque na refinaria em um dado momento.

b) Quando o tanque do PCR atinge o volume da capacidade máxima (ponto P4), o bombeio deve ser finalizado e é verificado o nível de estoque do tanque da

refinaria que estava enviando produto. Caso esteja acima do ponto R1, o tanque segue com status de tanque certificado, dado que o envio de produto por bombeio não invalida o certificado de análise. Caso contrário, o status muda para disponível, ou seja, considera-se que há disponibilidade para recebimento de produção, mas não há produto para envio para o PCR.

Os carregamentos no PCR devem seguir janela de horário previamente estabelecida e os caminhões se dirigem ao PCR somente quando há volume mínimo necessário para realização de 80% da programação (nível de estoque do PCR corresponde ao ponto P2). Isto foi definido na simulação para evitar que os caminhões se dirijam para o carregamento quando não há volume disponível para cumprimento da programação.

Os caminhões efetuam a operação de carregamento e se dirigem ao terminal onde ocorre a descarga. Durante a janela de carregamento os caminhões podem fazer uma ou duas viagens de carga e descarga entre estes dois elos da cadeia, a depender da fila nas baias de carregamento, do horário de chegada dos caminhões para o primeiro carregamento no PCR, e dos tempos transcorridos no deslocamento, nas operações de pesagem, carga e descarga. Este processo é simulado no modelo, e interfere diretamente na velocidade de formação do lote de carregamento marítimo.

O tamanho do lote final considerado a ser embarcado é fixo e equivale a 75% da capacidade de armazenamento de produto no terminal. As transferências rodoviárias para o terminal prosseguem até que um dos eventos ocorram: o lote está formado e a data da operação do navio está próxima; ou os tanques do terminal estão cheios e não podem mais receber produto.

Paralelamente ao processo de transferência rodoviária, quando se estima que faltam quinze dias para formação do lote e certificação dos tanques do terminal, o navio é acionado e programado para chegar no porto no décimo sexto dia. Porém, em função da natureza estocástica da operação de navios, submetida a inúmeras incertezas que estão fora do escopo deste trabalho, pode haver uma defasagem entre a data programada para chegada do navio no porto e a data de sua efetiva chegada. Além disso, quando o navio chega no porto, pode enfrentar fila para atracação. Estes dois fatores somados podem resultar em atraso na operação do navio em relação à data previamente prevista, o que pode levar ao esgotamento da

capacidade de armazenamento de produto na cadeia e conseqüente interrupção da produção na refinaria.

Por outro lado, se o processo de transferência rodoviária enfrentar imprevistos e transcorrer em um tempo maior que o programado, o lote não estará pronto na data prevista. Se este caso se somar à situação em que o navio atraca na data prevista, tem-se custos de estadia pelo fato de o navio precisar esperar a formação do lote para início da operação de carga.

## 4.2

### Restrições do modelo

A complexidade da modelagem foi acentuada devido às restrições do sistema que devem ser levadas em consideração, caso contrário o modelo não seria representativo. Dentre as principais restrições estão:

- a) A produção na refinaria é contínua.
- b) Os tanques da refinaria não podem realizar as operações de armazenamento de produção advinda da unidade e bombeio para o PCR ao mesmo tempo.
- c) Se um tanque da refinaria ou do terminal estiver certificado e voltar a receber mais produto, deve ser novamente amostrado e certificado.
- d) Todo produto que sai da refinaria e do terminal deve estar com certificado de análise emitido.
- e) O carregamento rodoviário somente pode ocorrer em janela de horário previamente estabelecida. Se o caminhão se apresentar no PCR antes da abertura da janela ou após seu fechamento, não é permitida sua entrada.
- f) Sempre antes de iniciar o bombeio da refinaria para o PCR é necessário verificar se a janela de carregamento rodoviário está fechada.
- g) Não podem ocorrer operações simultâneas de bombeio da refinaria para o PCR e carregamento rodoviário no PCR.
- h) Não podem ocorrer operações simultâneas de descarga rodoviária no terminal e carga de navios.

### 4.3

#### **Premissas básicas**

A modelagem partiu das premissas básicas de que não haverá problemas operacionais tanto na produção da refinaria quanto nas demais etapas do processo, tais como na carga e descarga de caminhões e navios. Além disso, foi considerado que todas as certificações de qualidade indicarão que o produto está certificado e todo carregamento por navio será autorizado na fase de inspeção. No caso do carregamento rodoviário no PCR, considerou-se somente um fator de utilização de 95% para representar possíveis decorrências que afetam o carregamento tais como mau tempo, indisponibilidade temporária de sistema, entre outros.

### 4.4

#### **Tempo de aquecimento**

O estudo é um modelo de simulação não terminal, uma vez que possui início e fim indefinidos. Em função disso, foi necessário definir um tempo de aquecimento, período em que ocorre a execução normal da simulação, mas não são coletadas estatísticas. Após o aquecimento, a simulação prossegue e o sistema entra em regime permanente, quando as estatísticas começam a ser coletadas.

O parâmetro de análise definido para cálculo do tempo de aquecimento foi o tempo de permanência dos caminhões no PCR. Foram rodadas várias simulações com 20 replicações variando o tempo de simulação. A média do tempo de permanência dos caminhões no PCR foi calculada, e os valores obtidos para cada tempo de aquecimento foram analisados graficamente (figura 17).

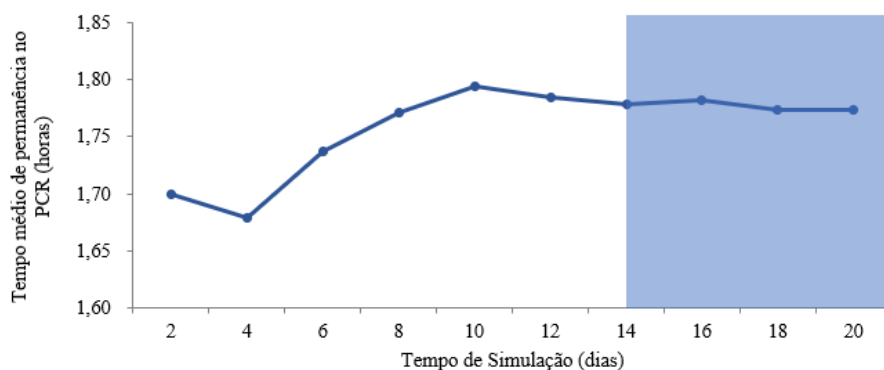


Figura 17 – Definição do tempo de aquecimento. Fonte: Elaboração própria.

A análise do gráfico permitiu a conclusão de que, após o tempo de simulação de 14 dias, o tempo médio de permanência dos caminhões no PCR apresenta variação inferior a um minuto, valor considerado irrelevante no contexto do estudo. Desta forma, utilizou-se o período de 14 dias como tempo de aquecimento.

## 4.5

### Número de Replicações

Com o objetivo de atribuir maior confiabilidade ao modelo, cada simulação foi replicada 50 vezes, sendo cada replicação equivalente a um ano de funcionamento do sistema. A quantidade de replicações necessária foi definida por meio da análise de indicadores variando o número de replicações de 1 a 200. Os indicadores utilizados foram tempo médio de formação do lote, número de bombeios para o PCR, número de certificações na refinaria e volume total embarcado, sendo que os três últimos valores foram multiplicados por uma constante para apresentação neste estudo. Concluiu-se que a partir do cenário com 50 replicações o resultado de cada indicador se encontrava próximo ao obtido com 200 replicações, quando o esforço computacional é significativamente mais elevado.

Tabela 2 – Definição do número de replicações.

| Replicações | Volume Embarcado (m <sup>3</sup> ) | Tempo Médio de Formação do Lote (dias) | Número de bombeios para o PCR | Número de certificações na refinaria |
|-------------|------------------------------------|--|-------------------------------|--------------------------------------|
| 1           | 80.850,00                          | 31,23                                  | 376,20                        | 184,80                               |

|     |           |       |        |        |
|-----|-----------|-------|--------|--------|
| 5   | 92.400,00 | 29,83 | 415,80 | 209,22 |
| 10  | 93.555,00 | 29,9  | 418,77 | 204,93 |
| 20  | 92.400,00 | 29,9  | 414,48 | 200,81 |
| 30  | 92.400,00 | 30,05 | 414,71 | 201,07 |
| 40  | 91.533,75 | 30,07 | 413,66 | 198,92 |
| 50  | 91.476,00 | 30,08 | 412,70 | 197,27 |
| 100 | 90.898,50 | 30,12 | 416,53 | 198,17 |
| 150 | 91.938,00 | 30,19 | 419,69 | 200,28 |
| 200 | 91.880,25 | 30,29 | 418,80 | 200,74 |

Fonte: Elaboração própria.

## 4.6

### Validação e verificação do modelo

Para validação do modelo foram utilizadas algumas técnicas propostas em Sargent (2013), tais como: observação do comportamento operacional do sistema por meio da animação; comparação da ocorrência de eventos na simulação com a realidade; gráficos operacionais; e teste do modelo em condições extremas.

O cenário base com as características descritas na seção 4.1 foi simulado e seus resultados comparados com os dados empíricos, conforme na tabela 3. Os indicadores utilizados para validação foram os mesmos descritos na seção anterior, sendo que novamente o volume embarcado, o número de bombesios para o PCR e o número de certificações na refinaria foram multiplicados por uma constante de forma a preservar a confidencialidade dos dados. Percebe-se que os resultados da simulação estão coerentes com os indicadores empíricos.

Tabela 3 – Validação do modelo.

|          | <b>Volume Embarcado (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Tempo Médio de Formação do Lote (dias)</b> | <b>Número de bombesios para o PCR</b> | <b>Número de certificações na refinaria</b> |
|----------|---|---|---------------------------------------|---|
| Empírico | 85.463,40                               | 31,83   | 445,50                                | 191,40                                      |
| Simulado | 91.476,00                               | 30,08   | 412,70                                | 197,27                                      |

Fonte: Elaboração própria.

Cabe ressaltar que a diferença de 6,6% encontrada na comparação entre os valores empírico e simulado do volume embarcado é justificada pelo fato dos embarques ocorrerem em lotes e a comparação ter sido feita com base anual.

Desta forma, o estoque pode estar no terminal, quando o lote está em formação, ou embarcado no navio, mas o indicador mede o lote embarcado sem considerar o estoque no terminal que, no caso empírico apresentado na tabela, correspondia a aproximadamente 9.900 m<sup>3</sup>.

Outra forma de validação do modelo foi por meio da observação dos gráficos de evolução dos estoques, visando verificar se a lógica do funcionamento do sistema está devidamente respeitada na simulação. Os valores de estoque de produto no terminal e na refinaria ao final de cada dia da simulação da primeira replicação foram plotados em um gráfico (figura 18) e o comportamento da evolução dos estoques evidencia que o modelo obteve o desempenho esperado. Enquanto as transferências rodoviárias ocorrem e o estoque da refinaria reduz, o estoque do terminal aumenta e o lote para embarque marítimo vai sendo formado. Quando as transferências cessam, o estoque na refinaria aumenta e o estoque no terminal permanece constante até que o navio carregue o produto.

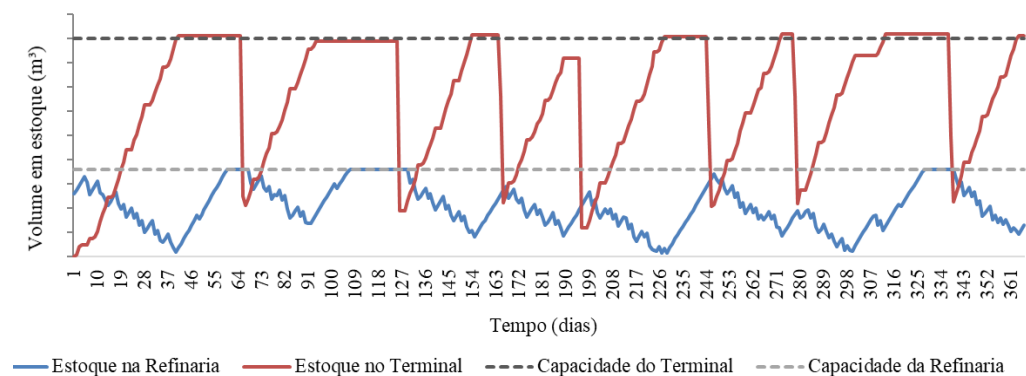


Figura 18 – Evolução dos estoques na refinaria e no terminal na simulação do cenário base.  
Fonte: Elaboração própria.

De maneira similar, os estoques ao final do dia da primeira replicação da simulação nos tanques da refinaria foram plotados em um gráfico de forma a observar o comportamento da evolução dos estoques. Foram observados 100 dias, e concluiu-se que o estoque se comportou de maneira similar ao descrito na seção 3.1.1: enquanto um tanque recebe produto, o outro tanque certifica e envia produto para o PCR. Portanto, tem-se aqui outra evidência de que o modelo está representando a realidade.



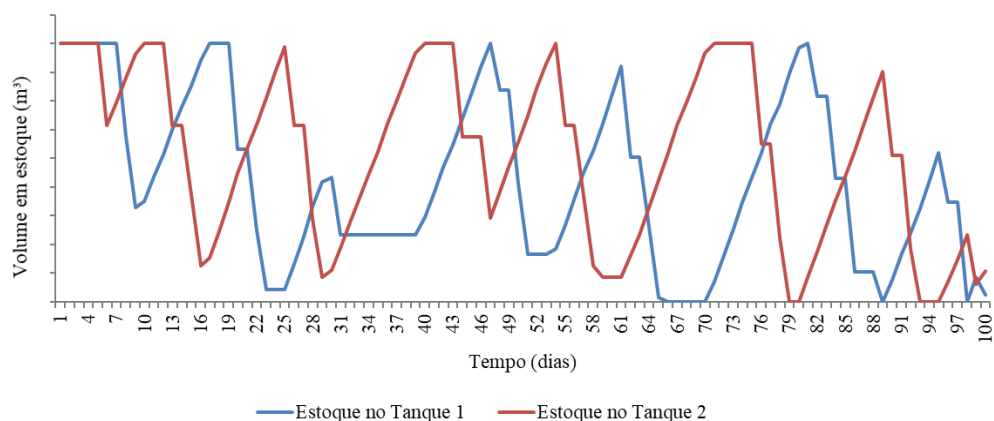


Figura 19 – Evolução dos estoques na refinaria na simulação do cenário base.

Fonte: Elaboração própria.

#### 4.7

#### Geração e comparação de cenários

O modelo validado foi utilizado para simulação de cenários de forma a subsidiar a tomada de decisão a respeito de possíveis mudanças no sistema atual. O cenário base refere-se à utilização de dois tanques na refinaria para armazenamento de produto e o lote de embarque corresponde a cerca de 75% da capacidade de armazenamento do terminal. A vazão de produção e o tamanho do lote deste cenário foram chamados de base na tabela abaixo.

Tabela 4 – Geração de cenários.

|              | Número de Tanques na refinaria |           | Vazão de produção |                | Tamanho do lote de embarque |                |
|--------------|--------------------------------|-----------|-------------------|----------------|-----------------------------|----------------|
|              | 2 Tanques                      | 3 Tanques | Base              | Aumento de 10% | Base                        | Aumento de 25% |
| Cenário Base | x                              |           | x                 |                | x                           |                |
| Cenário 1    | x                              |           | x                 |                |                             | x              |
| Cenário 2    | x                              |           |                   | x              | x                           |                |
| Cenário 3    | x                              |           |                   | x              |                             | x              |
| Cenário 4    |                                | x         | x                 |                | x                           |                |
| Cenário 5    |                                | x         | x                 |                |                             | x              |
| Cenário 6    |                                | x         |                   | x              | x                           |                |
| Cenário 7    |                                | x         |                   | x              |                             | x              |

Fonte: Elaboração própria.

Os cenários elaborados trazem variação do número de tanques da refinaria, da vazão da produção e do tamanho do lote de embarque marítimo de forma a

avaliar qual cenário apresenta maior produção anual. A escolha dos cenários foi feita em função de sua viabilidade de implantação: o aumento da tancagem para armazenamento deste produto é uma manobra possível de ser realizada; a vazão de produção pode ser alterada em função de mudança no elenco de petróleo ou de rendimentos da unidade; e, por último, a decisão do tamanho do lote de embarque cabe ao gestor de estoques.

O Cenário 1 mantém o número de tanques na refinaria e a vazão de produção, aumentando o tamanho do lote em 25%. O cenário 2 mantém o número de tanques e o tamanho do lote, mas aumenta a vazão de produção em 10%. O cenário 3 mantém uso de dois tanques, mas aumenta a vazão de produção e o tamanho do lote.

Os cenários de 4 a 7 propõem a utilização de três tanques na refinaria. No caso dos Cenários 4 e 5 a vazão de produção é mantida, enquanto o Cenário 4 mantém o tamanho do lote e o Cenário 5 aumenta o lote em 25%. Os cenários 6 e 7 aumentam a vazão de produção em 10%, sendo que o Cenário 6 mantém o tamanho do lote e o Cenário 7 traz aumento de 25% do tamanho da quantidade a ser embarcada.

Os resultados obtidos com a simulação de cada cenário foram exportados para planilha eletrônica de forma a obter dados mais específicos para a comparação do desempenho do sistema submetido às diferentes parametrizações.

O indicador de desempenho escolhido para comparação entre os cenários é o volume de produção anual da refinaria, uma vez que o objetivo do estudo é avaliar alterações do sistema de forma a aumentar a eficiência da logística do produto e evitar interrupções na produção decorrentes de falta de espaço para armazenamento de produto.

## 5

### Resultados e discussões

Nesta seção os resultados das simulações realizadas com os cenários expostos na tabela 4 serão apresentados. Os dados expostos abaixo receberam tratamento de forma a preservar sua confidencialidade.

#### 5.1

##### Cenário base: dois tanques, produção base e lote base

O Cenário Base apresentou uma produção de 97.415 m<sup>3</sup> no período simulado de um ano e embarque marítimo médio de 91.476 m<sup>3</sup>. A tabela 5 apresenta a utilização média dos dois tanques da refinaria ao longo da simulação das 50 replicações, ou seja, quanto tempo os tanques estiveram em cada um dos possíveis estados: vazio, recebendo produção, armazenando produto que está em análise no laboratório, armazenando produto certificado ou enviando produto para o PCR via bombeio. Em média, no cenário base os tanques ficaram 46% do tempo da simulação recebendo produção advinda da unidade e 36% do tempo armazenando produto certificado.

Tabela 5 – Média de utilização dos tanques da refinaria no Cenário Base.

| Estado do Tanque                  | Utilização Média |
|-----------------------------------|------------------|
| Vazio                             | 11%              |
| Recebendo produção                | 46%              |
| Aguardando análise de laboratório | 2%               |
| Armazenando produto certificado   | 36%              |
| Enviando produto para PCR         | 5%               |

Fonte: Elaboração própria.

Para cada uma das 50 replicações calculou-se os estoques mínimos, médios e máximos nos tanques dos três elos da cadeia e ao final da simulação foi possível obter a média destes parâmetros. A tabela 6 mostra os resultados obtidos com a simulação do Cenário Base, e observa-se que em determinados momentos da

simulação foi preciso utilizar a capacidade total dos tanques. Além disso, o estoque médio da refinaria corresponde a cerca de 53% de sua capacidade, enquanto o estoque médio do terminal corresponde a cerca de 73% da capacidade de armazenamento. Isto se justifica pelo fato de que o objetivo é sempre estocar o produto mais a jusante na cadeia de forma a garantir a continuidade da produção da refinaria.

Tabela 6 – Estatística dos estoques dos tanques dos três elos da cadeia no Cenário Base.

|                      | <b>Estoque Mínimo (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Estoque Médio (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Estoque Máximo (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Capacidade (m<sup>3</sup>)</b> |
|----------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Tanques da Refinaria | 0                                     | 3.149                                | 5.940                                 | 5.940                             |
| Tanque PCR           | 244                                   | 1.018                                | 1.420                                 | 1.420                             |
| Tanques do Terminal  | 0                                     | 10.917                               | 15.000                                | 15.000                            |

Fonte: Elaboração própria.

## 5.2

### Cenário 1: dois tanques, produção base e lote 25% maior

O Cenário 1, que se diferencia do Cenário Base apenas pelo aumento do tamanho do lote do embarque marítimo em 25%, apresentou produção anual de 93.672 m<sup>3</sup>. O embarque marítimo médio foi de 87.780 m<sup>3</sup>.

Apesar da produção anual ter sido inferior à do Cenário Base, as demais estatísticas coletadas não se mostraram muito diferentes. Em média, os tanques da refinaria ficaram 44% do tempo recebendo produção da unidade e 39% do tempo armazenando produto certificado. Os tanques ficaram ociosos 10% do tempo da simulação, conforme consta na tabela 7.

Tabela 7 – Média de utilização dos tanques da refinaria no Cenário 1.

| <b>Estado do Tanque</b>           | <b>Utilização Média</b> |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Vazio                             | 10%                     |
| Recebendo produção                | 44%                     |
| Aguardando análise de laboratório | 1%                      |
| Armazenando produto certificado   | 39%                     |
| Enviando produto para PCR         | 5%                      |

Fonte: Elaboração própria.

O estoque médio dos tanques da refinaria representou cerca de 55% da capacidade de armazenamento deste elo da cadeia, enquanto o estoque médio do terminal representa aproximadamente 68% de sua capacidade. Observou-se que a capacidade máxima dos três elos da cadeia foi atingida em algum momento da simulação, conforme consta na tabela 8.

Tabela 8 – Estatística dos estoques dos tanques dos três elos da cadeia no Cenário 1.

|                      | <b>Estoque<br/>Mínimo (m³)</b> | <b>Estoque<br/>Médio (m³)</b> | <b>Estoque<br/>Máximo (m³)</b> | <b>Capacidade<br/>(m³)</b> |
|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Tanques da Refinaria | 0                              | 3.307                         | 5.940                          | 5.940                      |
| Tanque PCR           | 240                            | 1.040                         | 1.420                          | 1.420                      |
| Tanques do Terminal  | 0                              | 10.397                        | 15.000                         | 15.000                     |

Fonte: Elaboração própria.

### 5.3

#### **Cenário 2: dois tanques, produção 10% maior e lote base**

O Cenário 2 apresenta as mesmas características do Cenário Base, variando somente a vazão de produção, que neste caso é 10% maior. Como resultado, obteve-se produção média anual de 98.781 m<sup>3</sup> e embarque marítimo de 92.400 m<sup>3</sup>.

Neste cenário, as estatísticas de utilização dos tanques revelaram um nível de ociosidade dos tanques de 4%, consideravelmente inferior ao apresentado pelo Cenário Base. Os tanques dedicaram 42% do tempo a receber produção advinda da unidade e 47% do tempo estavam armazenando produto certificado.

Tabela 9 – Média de utilização dos tanques da refinaria no Cenário 2.

| <b>Estado do Tanque</b>           | <b>Utilização Média</b> |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Vazio                             | 4%                      |
| Recebendo produção                | 42%                     |
| Aguardando análise de laboratório | 1%                      |
| Armazenando produto certificado   | 47%                     |
| Enviando produto para PCR         | 5%                      |

Fonte: Elaboração própria.

O estoque médio dos tanques da refinaria ficou em cerca de 65% da capacidade de armazenamento total, e para o terminal esta taxa foi de 72%, conforme apresentado na tabela 10.

Tabela 10 – Estatística dos estoques dos tanques dos três elos da cadeia no Cenário 2.

|                      | <b>Estoque<br/>Mínimo (m³)</b> | <b>Estoque<br/>Médio (m³)</b> | <b>Estoque<br/>Máximo (m³)</b> | <b>Capacidade<br/>(m³)</b> |
|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Tanques da Refinaria | 0                              | 3.915                         | 5.940                          | 5.940                      |
| Tanque PCR           | 372                            | 1.073                         | 1.420                          | 1.420                      |
| Tanques do Terminal  | 0                              | 10.983                        | 15.000                         | 15.000                     |

Fonte: Elaboração própria.

## 5.4

### **Cenário 3: dois tanques, produção 10% maior e lote 25% maior**

O Cenário 3, que mantém a característica do Cenário Base de trabalhar com dois tanques, porém com produção 10% maior e tamanho do lote de embarque 25% superior, apresentou produção anual média de 93.869 m<sup>3</sup> e volume embarcado de 87.202 m<sup>3</sup>.

As estatísticas dos estados do tanque ao longo da simulação indicam alta taxa de utilização dos tanques da refinaria, uma vez que a ociosidade foi de cerca de 5% do tempo total. Por outro lado, 49% do tempo os tanques estavam armazenando produto certificado e 40% do tempo recebendo produção da unidade produtora.

Tabela 11 – Média de utilização dos tanques da refinaria no Cenário 3.

| <b>Estado do Tanque</b>           | <b>Utilização Média</b> |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Vazio                             | 5%                      |
| Recebendo produção                | 40%                     |
| Aguardando análise de laboratório | 1%                      |
| Armazenando produto certificado   | 49%                     |
| Enviando produto para PCR         | 5%                      |

Fonte: Elaboração própria.

O estoque médio dos tanques da refinaria, quando comparados à capacidade de armazenamento, apresentam 67% de média de ocupação dos tanques. Para o terminal esta estatística é de 69%. Estes resultados ficaram próximos aos observados no Cenário 2, novamente ocorrendo alta utilização dos tanques da refinaria.

Tabela 12 – Estatística dos estoques dos tanques dos três elos da cadeia no Cenário 3.

|                      | <b>Estoque Mínimo (m³)</b> | <b>Estoque Médio (m³)</b> | <b>Estoque Máximo (m³)</b> | <b>Capacidade (m³)</b> |
|----------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------|
| Tanques da Refinaria | 0                          | 3.964                     | 5.940                      | 5.940                  |
| Tanque PCR           | 362                        | 1.089                     | 1.420                      | 1.420                  |
| Tanques do Terminal  | 0                          | 10.494                    | 15.000                     | 15.000                 |

Fonte: Elaboração própria.

## 5.5

### **Cenário 4: três tanques, produção base e lote base**

A partir desta seção serão mostrados os resultados dos cenários que apresentam a adição de um tanque na refinaria em relação ao Cenário Base. No caso do Cenário 4, esta é a única diferenciação em relação ao Cenário Base.

O Cenário 4 apresentou produção anual média de 102.707 m<sup>3</sup> e volume embarcado de 92.400 m<sup>3</sup>. O acréscimo na capacidade de armazenamento na refinaria aumentou a produção em 5%, mesmo mantendo constante a vazão de produção, o que significa que houve redução dos eventos de interrupção da produção por falta de espaço para armazenamento de produto. Como consequência, houve aumento da taxa de ociosidade dos tanques para 24%.

Tabela 13 – Média de utilização dos tanques da refinaria no Cenário 4.

| <b>Estado do Tanque</b>           | <b>Utilização Média</b> |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Vazio                             | 24%                     |
| Recebendo produção                | 33%                     |
| Aguardando análise de laboratório | 1%                      |
| Armazenando produto certificado   | 47%                     |
| Enviando produto para PCR         | 3%                      |

Fonte: Elaboração própria.

Apesar do estoque médio da refinaria ter sido superior ao apresentado no cenário base, o aumento da capacidade permitiu com que proporcionalmente a taxa de ocupação destes tanques permanecesse no mesmo patamar de 54% da capacidade. Os tanques do terminal tiveram estoque médio de 71% de sua capacidade de armazenamento, conforme apresentado na tabela 14.

Tabela 14 – Estatística dos estoques dos tanques dos três elos da cadeia no Cenário 4.

|                      | <b>Estoque<br/>Mínimo (m³)</b> | <b>Estoque<br/>Médio (m³)</b> | <b>Estoque<br/>Máximo (m³)</b> | <b>Capacidade<br/>(m³)</b> |
|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Tanques da Refinaria | 0                              | 4.796                         | 8.910                          | 8.910                      |
| Tanque PCR           | 197                            | 1.030                         | 1.420                          | 1.420                      |
| Tanques do Terminal  | 0                              | 10.837                        | 15.000                         | 15.000                     |

Fonte: Elaboração própria.

## 5.6

### Cenário 5: três tanques, produção base e lote 25% maior

A adição do terceiro tanque na refinaria e o aumento do lote de embarque em 25% representados no Cenário 5 resultaram em uma produção de 96.837 m<sup>3</sup> por ano e embarque de 87.780 m<sup>3</sup> de produto no mesmo período.

Segundo os dados apresentados na tabela 15, os tanques da refinaria ficaram 15% do tempo vazios, 31% do tempo recebendo produção e maior parte do tempo, aproximadamente 53%, armazenando produto certificado.

Tabela 15 – Média de utilização dos tanques da refinaria no Cenário 5.

| <b>Estado do Tanque</b>           | <b>Utilização Média</b> |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Vazio                             | 15%                     |
| Recebendo produção                | 31%                     |
| Aguardando análise de laboratório | 1%                      |
| Armazenando produto certificado   | 53%                     |
| Enviando produto para PCR         | 3%                      |

Fonte: Elaboração própria.

A tabela 16 apresenta as estatísticas de estoque mínimo, médio e máximo. Na simulação atingiu-se o estoque máximo em todos os elos da cadeia. Em



relação ao estoque médio, na refinaria ele representa 60% da capacidade de armazenamento enquanto no terminal representa 68%.

Tabela 16 – Estatística dos estoques dos tanques dos três elos da cadeia no Cenário 5.

|                      | <b>Estoque<br/>Mínimo (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Estoque<br/>Médio (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Estoque<br/>Máximo (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Capacidade<br/>(m<sup>3</sup>)</b> |
|----------------------|---|--|---|---------------------------------------|
| Tanques da Refinaria | 0   | 5.337                                    | 8.910                                     | 8.910                                 |
| Tanque PCR           | 296                                       | 1.073                                    | 1.420                                     | 1.420                                 |
| Tanques do Terminal  | 0   | 10.385                                   | 15.000                                    | 15.000                                |

Fonte: Elaboração própria.

## 5.7

### Cenário 6: três tanques, produção 10% maior e lote base

O Cenário 6 apresenta a situação em que se possui três tanques para armazenar produto na refinaria, a vazão de produção é 10% maior do que a utilizada no Cenário Base e o tamanho do lote não sofreu alteração. Como resultado obteve-se uma produção anual 8% superior à da base, atingindo o valor de 105.529 m<sup>3</sup>, e volume embarcado de 95.634 m<sup>3</sup>.

Os resultados da utilização dos tanques apresentados na tabela 17 mostram que o aumento da produção resultou em utilização mais alta dos tanques, dado que a taxa de ociosidade foi de 9%. Os tanques dedicaram 30% do tempo da simulação a receber produção e 57% do tempo armazenando produto certificado.

Tabela 17 – Média de utilização dos tanques da refinaria no Cenário 6.

| <b>Estado do Tanque</b>           | <b>Utilização Média</b> |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Vazio                             | 9%                      |
| Recebendo produção                | 30%                     |
| Aguardando análise de laboratório | 1%                      |
| Armazenando produto certificado   | 57%                     |
| Enviando produto para PCR         | 3%                      |

Fonte: Elaboração própria.

O aumento da vazão de produção também refletiu nos níveis de estoques da refinaria, apresentados na tabela 18. Em média, o estoque da refinaria representou

cerca de 68% de sua capacidade. No terminal esta taxa de utilização ficou em torno de 71%.

Tabela 18 – Estatística dos estoques dos tanques dos três elos da cadeia no Cenário 6.

|                      | <b>Estoque<br/>Mínimo (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Estoque<br/>Médio (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Estoque<br/>Máximo (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Capacidade<br/>(m<sup>3</sup>)</b> |
|----------------------|---|--|---|---------------------------------------|
| Tanques da Refinaria | 0   | 6.024                                    | 8.910                                     | 8.910                                 |
| Tanque PCR           | 441                                       | 1.080                                    | 1.420                                     | 1.420                                 |
| Tanques do Terminal  | 0   | 10.834                                   | 15.000                                    | 15.000                                |

Fonte: Elaboração própria.

## 5.8

### **Cenário 7: três tanques, produção 10% maior e lote 25% maior**

Alterando todas as variáveis em relação ao Cenário Base (número de tanques, tamanho do lote e vazão de produção), o Cenário 7 apresentou produção anual de 97.883 m<sup>3</sup> e volume embarcado de 89.224 m<sup>3</sup>.

Neste cenário, 61% do tempo de simulação os tanques da refinaria ficaram dedicados a armazenar produto certificado, aguardando seu bombeio para o PCR. O nível de ociosidade foi baixo, representando 7% do tempo da simulação, e o tempo recebendo produção da unidade representou 28% em relação ao tempo total da simulação, conforme mostra a tabela 19.

Tabela 19 – Média de utilização dos tanques da refinaria no Cenário 7.

| <b>Estado do Tanque</b>           | <b>Utilização Média</b> |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Vazio                             | 7%                      |
| Recebendo produção                | 28%                     |
| Aguardando análise de laboratório | 1%                      |
| Armazenando produto certificado   | 61%                     |
| Enviando produto para PCR         | 3%                      |

Fonte: Elaboração própria.

A refinaria trabalhou com estoques altos, sendo o estoque médio equivalente a 71% da capacidade total de armazenamento. No caso do terminal, esta proporção ficou em torno de 69%, conforme apresentado na tabela 20.

Tabela 20 – Estatística dos estoques dos tanques dos três elos da cadeia no Cenário 7.

|                      | <b>Estoque<br/>Mínimo (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Estoque<br/>Médio (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Estoque<br/>Máximo (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Capacidade<br/>(m<sup>3</sup>)</b> |
|----------------------|---|--|---|---------------------------------------|
| Tanques da Refinaria | 0   | 6.321                                    | 8.910                                     | 8.910                                 |
| Tanque PCR           | 442                                       | 1.110                                    | 1.420                                     | 1.420                                 |
| Tanques do Terminal  | 0   | 10.432                                   | 15.000                                    | 15.000                                |

Fonte: Elaboração própria.

## 5.9

### Discussões

Os cenários simulados permitiram a avaliação do comportamento da produção e dos estoques da refinaria quando se varia a capacidade de armazenamento e a vazão de produção da unidade produtora, assim como o tamanho do lote de embarque marítimo no terminal. Os resultados referentes à produção anual obtida com a simulação dos cenários explicitados na seção 4.7 estão apresentados na tabela 21 de forma a facilitar a análise e a comparação.

Tabela 21 – Resultado da produção anual por cenário simulado.

|              | <b>Número de Tanques<br/>na refinaria</b> |           | <b>Vazão de<br/>produção</b> |                   | <b>Tamanho do lote de<br/>embarque</b> |                   | <b>Produção<br/>Anual (m<sup>3</sup>)</b> |
|--------------|---|-----------|------------------------------|-------------------|--|-------------------|---|
|              | 2 Tanques                                 | 3 Tanques | Base                         | Aumento<br>de 10% | Base                                   | Aumento<br>de 25% |   |
| Cenário Base | x   |           | x                            |                   | x                                      |                   | 97.415                                    |
| Cenário 1    | x   |           | x                            |                   |  | x                 | 93.672                                    |
| Cenário 2    | x   |           |                              | x                 | x                                      |                   | 98.781                                    |
| Cenário 3    | x   |           |                              | x                 |  | x                 | 93.869                                    |
| Cenário 4    |   | x         | x                            |                   | x                                      |                   | 102.707                                   |
| Cenário 5    |   | x         | x                            |                   |  | x                 | 96.837                                    |
| Cenário 6    |   | x         |                              | x                 | x                                      |                   | 105.529                                   |
| Cenário 7    |   | x         |                              | x                 |  | x                 | 97.883                                    |

Fonte: Elaboração própria.

As simulações dos diferentes cenários não resultaram em grandes discrepâncias nas estatísticas de estoque mínimo, médio e máximo do PCR e do terminal. As principais diferenças encontradas estão nos indicadores da refinaria.

Ao se comparar o Cenário Base com o Cenário 1, onde a única alteração é o aumento do lote em 25% no Cenário 1, percebeu-se uma redução na produção de 4% neste último cenário. O mesmo resultado foi obtido comparando-se o cenário 2 com o 3, o cenário 4 com o 5 e o cenário 6 com 7, que se diferenciam somente pelo tamanho do lote. No último caso, por exemplo, o Cenário 7 apresenta lote de embarque 25% maior e apresentou produção 7% menor que o Cenário 6. Isto significa que, independente da vazão de produção e do número de tanques na refinaria, é imprescindível a manutenção de um espaço de segurança no terminal para armazenar o produto em caso de atraso no carregamento do lote no navio em relação à data programada.

Este argumento é fortemente fundamentado também ao se comparar o Cenário Base com o Cenário 5, que se diferenciam pelo fato do segundo caso operar com três tanques e com lote de embarque 25% maior. Neste caso, apesar de uma expansão na configuração da tancagem original, a produção anual apresentou redução de 1% em função de não haver o espaço de segurança no terminal para armazenar produto e absorver possíveis variações das datas de carregamento das cargas nos navios.

Outra importante análise dos resultados da simulação é que a adição de um tanque na refinaria utilizando os mesmos parâmetros do Cenário Base (sem alteração na vazão de produção e no tamanho do lote, ou seja, Cenário 4) representou um ganho de 5% na produção anual em função de redução de interrupções na unidade por falta de espaço para armazenamento de produto. Como consequência, a ociosidade dos tanques aumentou de 11% para 24% e o percentual de tempo que o tanque fica no estado de aguardando análise de laboratório diminuiu de 2% para 1%, o que indica que ao se operar com um tanque a mais a atividade de certificação de produtos tem ganho em eficiência.

Comparando-se o Cenário Base com o Cenário 2 percebe-se que o aumento da vazão de produção em 10% resultou em grande redução da ociosidade dos tanques, passando de 11% para 4%, ou seja, 96% do tempo da simulação os tanques estavam armazenando produto. O estoque médio de produto na refinaria também sofreu aumento de 3.149 m<sup>3</sup> para 3.915 m<sup>3</sup>. A produção anual, que é objetivo deste estudo, apresentou aumento de 1%. Além disso, ao se comparar o Cenário 2 com o Cenário 6, percebe-se que o aumento da vazão da produção

apresenta maior impacto na produção anual se for combinada com aumento da tancagem da refinaria.

O cenário que apresentou maior produção anual foi o Cenário 6, que é justamente a combinação das três indicações discutidas acima: tamanho do lote conforme Cenário Base, adição de um tanque na refinaria e aumento na produção em 10%. O resultado foi uma produção anual de aproximadamente 105.500 m<sup>3</sup>, 8% maior que a alcançada com o Cenário Base.

## 6

### Conclusão

O estudo atingiu seu objetivo ao analisar o impacto que a alteração dos três fatores propostos (capacidade de armazenamento da refinaria, vazão de produção e tamanho do lote de embarque) têm na produção anual do derivado, assim como no comportamento dos estoques nos três elos da cadeia.

Ao longo do desenvolvimento do trabalho ficou clara a importância do constante diálogo com os especialistas dos processos estudados e do profundo entendimento das operações simuladas antes do início da implementação computacional, uma vez que uma interpretação equivocada da realidade pode levar a um modelo não representativo que por sua vez pode conduzir a decisões incertas que, na indústria do petróleo, envolvem alto capital empregado.

As análises conduzidas no estudo são importantes insumos para a tomada de decisão referente ao gerenciamento dos estoques da refinaria e da cadeia de suprimentos. Apesar do significativo esforço computacional requerido, a técnica da simulação permitiu analisar diversos cenários sem a necessidade de implementá-los, mostrando-se, portanto, uma ferramenta eficaz com grande adição de valor ao estudo e à prática da organização.

Uma importante conclusão do estudo é que trabalhar com um menor lote para embarque marítimo (aqui chamado de tamanho do lote base) resulta em uma maior produção anual do derivado, ou seja, tem-se uma estratégia que não envolve nenhuma alteração nos processos ou na infraestrutura. O estudo subsidia a tomada de decisão de optar por menor lote pois confere a visão estratégica de que esta capacidade não utilizada para formação do lote é determinante para absorver flutuações na operação dos navios e manter a refinaria em operação, ainda que isto possa significar, tendo em vista o curto prazo de uma única operação, não otimizar os recursos por não utilizar toda capacidade de armazenamento do terminal para a formação do lote.

Outros fatores que contribuíram para o aumento da produção anual foram a adição de um tanque na refinaria e o aumento da vazão de produção. Caso seja

necessário investimento para aquisição de algum recurso, os resultados do estudo podem subsidiar estudos de viabilidade técnica e econômica.

O estudo também permitiu a análise de cenários que combinam variações dos três fatores, sendo que o cenário que apresentou melhor resultado em termos de produção anual foi o Cenário 6, que propõe trabalhar com tamanho do lote conforme Cenário Base, adição de um tanque na refinaria e aumento na produção em 10%.

A melhoria do gerenciamento da cadeia de suprimentos não deve ser um esforço isolado, mas sim um processo de melhoria contínua. Sendo assim, o presente estudo pode e deve ser amplamente aprofundado.

Uma vez que toda a logística de formação de carga para embarque marítimo do derivado já está modelada, é possível a criação de novos cenários a partir da alteração de outras variáveis envolvidas. Dentre as possibilidades de aprofundamento do estudo, destaca-se a relevância de se analisar o aumento do fluxo de escoamento do produto do PCR para o terminal e seu impacto na produção anual.

Além disso, outra oportunidade de aprimoramento da modelagem atual em trabalhos futuros pode ser feita por meio do acréscimo da simulação da fila para atracação de navios no terminal marítimo.

## Referências bibliográficas

CHAN, A.; FERREIRA FILHO, V.J.M. Aplicação da simulação na avaliação da capacidade logística de uma refinaria: um parque de armazenamento. In: XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, **Anais...**, Gramado, 2005. p. 2072-2083.

CAROTENUTO, P.; GIORDANI, S.; ZACCARO, A. A simulation based approach for evaluating the impact of maritime transport on the inventory levels of an oil supply chain. In: 17th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, **Anais...**, Sevilla, Spain, 2014. p. 710-719.

CHIMA, C.M. Supply-chain management issues in the oil and gas industry. **Journal of Business & Economics Research**, vol. 5, p. 27 – 36, 2007.

CHWIF, L.; MEDINA, A.C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria & aplicações**. 4 ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2015.

CIGOLINI, R.; PERO, M.; ROSSI, T.; SIANESI, A. Using simulation to manage project supply chain in the offshore oil and gas industry. **Production Planning & Control: The Management of Operations**, v. 26, n. 3, p. 167-177, 2014.

CSONTOS, B.; HALASZ, L.; HECKL, I. Event-driven Simulation of Liquid Transportation Through Pipeline Networks for Oil Companies. **Chemical Engineering Transactions**, vol. 70, p. 1741-1746, 2018.

FENG, X.; WANG, M.; LI, Y.; GU, W.; ZHANG, Y. Optimal Throughput of Crude Oil Terminals with Options for Infrastructure Improvements. **Journal of Coastal Research**, v. 73, p. 628-634, 2015.

FULLER, D.B.; FERREIRA FILHO, V.J.M.; ARRUDA, E.F. Oil industry value chain simulation with learning agents. **Computers and Chemical Engineering**, v. 111: p. 199-209, 2018.

FULLER, D.B.; FERREIRA FILHO, V.J.M.; ARRUDA, E.F.; LIMOEIRO, C.D.P. Simulação de Refinarias. In: HAMACHER, S.; FERREIRA FILHO, V. J. M. **Aplicações de pesquisa operacional na indústria internacional de petróleo e gás**. 1 ed., Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2015. p. 259-277.

GAVIRA, M.O. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2003.

HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. **Introduction to Operations Research**. 4 ed. Oakland: Holden-Day, 1986.



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

LIMOEIRO, C.D.P.; FULLER, D.B.V.; ARAUJO FILHO, C.F. Modelo de simulação para analisar o escoamento da produção de derivados de petróleo a partir de terminal marítimo. In: XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. **Anais...** Bento Gonçalves: 2010. p. 2668-2678.

MAISIUK, Y.; GRIBKOVSKAIA, I. Fleet sizing for offshore supply vessels with stochastic sailing and service times. **Procedia Computer Science**, 31, p. 939-948, 2014.

OLIVEIRA, F.; NUNES, P.M.; BLAJBERG, R.; HAMACHER, S. A framework for crude oil scheduling in an integrated terminal-refinery system under supply uncertainty. **European Journal of Operational Research**, 252, p. 635-645, 2016.

SARGENT, R.G. Verification and validation of simulation models. **Journal of Simulation**, 7, p. 12-24, 2013.

WANG, J.; RONG, G.; FENG, Y. Optimizing crude oil operations under uncertainty. In: Proceedings of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing. **Anais...** Moscou: 2009. p. 1020-1025.

WINSTON, W.L. **Operations research: Applications and algorithms**. 2 ed. New York: PWS-KENT Publishing Company, 1991.