

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Tecnologia
Engenharia de Produção

Simulação em uma Base de Distribuição de Combustíveis

Autor: André Rebouças Cruz
Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Crispiniano Garcia

Brasília, DF
2021

André Rebouças Cruz

Simulação em uma Base de Distribuição de Combustíveis

Projeto de Graduação submetido ao curso de graduação em Engenharia de Produção da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro de Produção.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade de Tecnologia

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Crispiniano Garcia

Brasília, DF

2021

André Rebouças Cruz

Simulação em uma Base de Distribuição de Combustíveis/ André Rebouças
Cruz. – Brasília, DF, 2021-

62 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Crispiniano Garcia

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Tecnologia , 2021.

1. . 2. . I. Prof. Dr. Reinaldo Crispiniano Garcia. II. Universidade de Brasília.
III. Campus Darcy Ribeiro. IV. Simulação em uma Base de Distribuição de
Combustíveis

CDU

André Rebouças Cruz

Simulação em uma Base de Distribuição de Combustíveis

Projeto de Graduação submetido ao curso de graduação em Engenharia de Produção da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro de Produção.

Brasília, DF, 04 de novembro de 2021:

Prof. Dr. Reinaldo Crispiniano Garcia
Orientador

Prof. Dr. João Mello da Silva
Convidado 1

Convidado 2

Brasília, DF
2021

Este trabalho é dedicado a Maria Inês.

Resumo

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo de simulação para os processos de carregamento de caminhão tanque em uma base de distribuição de combustíveis. Por meio de uma abordagem quantitativa empírica, foi possível estruturar um banco de dados relativos a quatro meses de operação, levando em conta as regras e características do terminal. Com isso, desenvolveu-se um modelo descritivo para essas atividades, capaz de mensurar custos operacionais ao longo do tempo, e que pôde ser aplicado a um estudo de caso real, de forma a prescrever a melhor alternativa entre duas opções de investimento. O projeto também contribuiu com a proposição de uma nova métrica de custeio, desenvolvida em conjunto com a equipe de supervisão da base.

Palavras-chaves: Simulação. Pesquisa Operacional. Base de Distribuição. Modelo.

Abstract

This work aimed to develop a simulation model for tank truck loading processes in a fuel distribution terminal. Through an empirical quantitative approach, it was possible to gather data from four months of operation, taking into account the rules and characteristics of the terminal. Thus, a descriptive model for these activities was developed, capable of measuring operating costs over time, which could be applied to a real case study, in order to prescribe the best alternative between two investment options. The project also contributed by proposing a new costing metric, developed together with the terminal's supervision team.

Key-words: Simulation.Operation Reasearch.Fuel distribution. Model.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Esquema da cadeia de suprimentos de combustíveis. Fonte: U.S. Energy Information Administration	25
Figura 2 – Processo de modelagem. Fonte: (CAUCHICK, 2019, p.230)	32
Figura 3 – Mapeamento do processo de carregamento de autotanque na Base de Brasília. Fonte: O Autor	35
Figura 4 – Gráfico da distribuição média da utilização de baias. Fonte: O Autor	36
Figura 5 – Gráfico da distribuição percentual de caminhões segundo o número de compartimentos. Fonte: O Autor	39
Figura 6 – Matriz de frequências entre produtos e o número de compartimentos a serem carregados. Fonte: O Autor	39
Figura 7 – Quadro de distribuições para os tempos de carregamento em minutos. Fonte: Autor	40
Figura 8 – Matriz de frequências para os volumes em função do número de compartimentos a carregar. Fonte: Autor	41
Figura 9 – Histograma para os tempos de saída da base em um intervalo de quatro meses. Fonte: Autor	42
Figura 10 – Configuração do Módulo <i>Create</i> . Fonte: Autor	43
Figura 11 – Configuração do Módulo <i>Decide</i> para Bitrens. Fonte: Autor	44
Figura 12 – Detalhamento da configuração dos módulos <i>Assign</i> . Fonte: Autor	44
Figura 13 – Desdobramento da programação mais típica dos bitrens que frequentam a base. Fonte: Autor	45
Figura 14 – Detalhamento da configuração dos módulos <i>Assign</i> para os Bitrens. Fonte: Autor	45
Figura 15 – Modelagem para as filas fora da base de abastecimento. Fonte: Autor	46
Figura 16 – Configuração do módulo <i>Pickstation</i> . Fonte: Autor	47
Figura 17 – Modelagem para os processos de carregamento. Fonte: Autor	47
Figura 18 – Modelagem para a saída do terminal. Fonte: Autor	48
Figura 19 – Quadro comparativo dos resultados do modelo básico. Fonte: Autor	50
Figura 20 – Esquema das opções de posicionamento para o novo braço de S10. Fonte: Autor	51
Figura 21 – Quadro comparativo dos resultados para as opções 1 e 2. Fonte: Autor	53
Figura 22 – Visão geral do modelo de simulação.	62

Lista de abreviaturas e siglas

CIF	<i>Cost Insurance and Freight</i>
BPM	<i>Business Process Management</i>
BPMN	<i>Business Process Management Notation</i>
FOB	<i>Free On Board</i>
KPI	<i>Key Performance Indicators</i>
OPEX	<i>Operational Expenditures</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	O Valor da Logística	21
2.2	A Simulação Como Ferramenta de Decisão	22
2.3	A Cadeia de Suprimentos de Combustíveis	24
3	CONTEXTUALIZAÇÃO DAS OPERAÇÕES E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	27
4	METODOLOGIA	31
4.1	Definição de Escopo	33
5	DESENVOLVIMENTO	35
5.1	Mapeamento do Processo de Carregamento	35
5.2	Análise Exploratória de Dados	37
5.2.1	Chegada dos Caminhões	37
5.2.2	Bitrens	38
5.2.3	Compartimentação e Programações	38
5.2.4	Tempo de Carregamento	40
5.2.5	Volumes	41
5.2.6	Tempos de Saída	42
5.3	Desenvolvimento do Modelo	43
5.3.1	Geração e Caracterização dos Caminhões	43
5.3.2	O Processo de Carregamento	45
5.3.3	Indicadores do Modelo	48
5.4	Validação	49
6	APLICAÇÃO DO MODELO	51
6.1	Adaptação do Modelo	51
6.2	Resultados	53
7	CONCLUSÃO	55

REFERÊNCIAS	57
APÊNDICES	59
APÊNDICE A – MODELO DE CARREGAMENTO	61

1 Introdução

O mercado de combustíveis tem um papel fundamental na economia mundial, alcançando os consumidores por meio de uma cadeia logística longa e complexa. Entretanto, as receitas podem ser tão grandes quanto os custos de exploração, produção e distribuição. Essa cadeia de suprimentos pode ser afetada por crises geopolíticas e volatilidade de preços, ampliando a importância da previsão e otimização dos recursos em horizontes de tempo cada vez menores. Por isso, a busca por ferramentas de integração, que possam tornar essas cadeias de suprimentos mais adaptáveis, auxiliando a tomada de decisão e reduzindo custos, é cada vez maior. (LIMA; RELVAS; BARBOSA-PÓVOA, 2016)

Nos últimos meses, a sensibilidade do setor têm sido amplamente noticiada com a constante alta nos preços de combustíveis. Entre os impactos econômicos da COVID-19, evidenciou-se uma queda acentuada na atividade de diversos setores, que, diante da retomada a normalidade, têm demandado ainda mais recursos do que antes. No entanto, a infraestrutura não está dimensionada para esse volume, resultando em grandes filas nos portos, centros de distribuição, e até falta de caminhões e motoristas. Nesse contexto, o aumento da eficiência operacional dessas instalações contribui para a mitigação dos efeitos da crise, sendo necessário entender a cadeia de suprimentos como um todo, e o papel das bases de distribuição no âmbito dessas atividades.

Lima, Relvas e Barbosa-Póvoa (2016) explicam que existe um consenso entre os autores em torno da divisão da cadeia de suprimentos de combustíveis em três partes: *Upstream*, *Midstream* e *Downstream*. Na primeira, *Upstream*, inclui-se a extração, produção e transporte de material bruto para as refinarias ou usinas, onde será processado. Assim, os produtos convergem para a segunda etapa, conhecida como *Midstream*, compreendendo todas as operações necessárias para o uso final. A partir daí, a distribuição primária, que leva os produtos aos centros de distribuição, assim como a secundária, que os leva ao consumidor, compreendem a terceira e última etapa, denominada *Downstream*. Com isso, os autores ressaltam como essa última fase tem sido cada vez mais estudada, não só pelo seu nível de complexidade, como também de relevância para os resultados do setor.

Desde a saída das usinas e refinarias até os postos de abastecimento, nas cidades e estradas, desdobra-se um amplo esforço logístico, onde é preciso levar em consideração variáveis como o volume de vendas e preço médio, assim como diversas restrições financeiras e físicas, a depender da organização. Nesse contexto, as bases de distribuição assumem um papel central, atuando como pontos de armazenagem e transbordo, e a performance dessas instalações é determinante para que o mercado garanta margens sustentáveis de

crescimento. Por essa razão, o *Downstream* tem um grande potencial de retorno mediante o uso de ferramentas da pesquisa operacional orientadas para a otimização e simulação de cenários.

O nível de automação dessas instalações tem aumentado sua capacidade de gerar dados pertinentes às operações, e, conseqüentemente, viabilizado a coleta de um volume relevante para análise. Assim, já se encontram, nas empresas, painéis que agregam esses registros com grande variedade de filtros e métricas. Essas medidas são justamente as que formam indicadores chave de performance, também conhecidos como *KPIs* (acrônimo de *Key Performance Indicators*), usados para avaliar o desempenho das bases distribuídas pelo território nacional.

Tendo isso em vista, este estudo se propõe a analisar o funcionamento de uma base de distribuição de combustíveis, a fim de desenvolver uma ferramenta de apoio à decisão. A instalação, objeto do presente estudo, conta com nove tanques de armazenamento, podendo ser abastecida em modal ferroviário, rodoviário e por ducto. No entanto, ela se destina a distribuir somente no modal rodoviário, e, por isso, o enfoque do trabalho se deu nas operações de carregamento de caminhão tanque. Além disso, o terminal possui *KPIs* relacionados a esses processos que serão levados em conta para a validação e avaliação de diferentes cenários no modelo: *Custo Unitário* e *Gate to Gate*.

Acredita-se que este projeto é academicamente relevante ao contribuir com um modelo baseado em dados empíricos, registrando a interpretação matemática de uma realidade ainda pouco explorada do *Downstream*. Dessa forma, a ferramenta desenvolvida satisfaz, em alguma medida, uma carência específica da área, aproximando o trabalho científico dos interesses da sociedade. Além disso, propõe métricas que associam a performance das bases de distribuição a valores monetários, tornando a contribuição dessas instalações mais perceptível para as empresas do setor.

1.1 Objetivos

Levando em conta esse contexto, o objetivo geral deste trabalho será descrito a seguir, desdobrando-se, em seguida, em objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste projeto é desenvolver um modelo de simulação para os processos de carregamento de caminhão tanque em uma base de distribuição de combustíveis, a fim de possibilitar a tomada de decisões complexas apoiando-se nos indicadores de performance da organização.

Para que possa ser alcançado, o objetivo geral é desdobrado em objetivos especí-

ficos:

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Mapear o processo de carregamento e levantar os dados pertinentes e acessíveis para estudo.
2. Realizar uma análise exploratória e inferencial dos dados, encontrando as curvas teóricas de distribuição de probabilidade mais adequadas.
3. Desenvolver um modelo de simulação no software Arena, capaz de replicar os indicadores de performance da empresa.
4. Aplicar o modelo a uma situação real, a fim de verificar impactos nos indicadores.

Este trabalho será apresentado, inicialmente, a partir de uma breve revisão bibliográfica, seguida de uma contextualização específica do cenário estudado, na seção 3. Com isso, a partir da seção 4, serão discutidos os fundamentos metodológicos que orientaram o projeto, para então detalhar o seu desenvolvimento e aplicação prática nas seções 5 e 6. Finalmente, a seção 7 será dedicada às considerações finais e sugestões para pesquisas futuras.

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo tem como finalidade situar o projeto de simulação no contexto acadêmico atual. Nesse sentido, ele será dividido em três seções, onde serão discutidos os fundamentos principais que motivaram e orientaram o estudo.

2.1 O Valor da Logística

Inicialmente, a logística se desenvolveu num contexto militar como serviço de apoio às operações, com a missão de deslocar equipamentos e munições ao longo da retaguarda. Da mesma forma, no contexto civil, oferecia suporte ao transportar matérias primas e produtos acabados para as fábricas, e das fábricas até o consumidor final. Assim, por muito tempo, essa atividade foi tida como um custo inevitável, reativa à dinâmica das empresas. No entanto, o desdobramento das suas aplicações tem revelado valores importantes que a torna cada dia mais relevante e complexa. (NOVAES, 2007)

Diante dessa evolução histórica, a delimitação de seu escopo sofreu várias mudanças, culminando na forma com que Ballou (2009) conceitua a logística, alinhado com o conselho de gestão de cadeias de suprimento americano: "logística é o processo de planejamento, implantação e controle do fluxo eficiente e eficaz de mercadorias, serviços e das informações relativas desde o ponto de origem até o ponto de consumo com o propósito de atender às exigências dos clientes". Essa definição é muito rica, pois não somente leva em consideração os fluxos de bens físicos, mas também de serviços e informações, evidenciando o grande potencial dessa disciplina em gerar valor para as empresas e seus clientes.

Esse valor, para ambos os autores, se manifesta como tempo, lugar, qualidade e informação. Quando um produto ou serviço não está ao alcance dos clientes, no momento e local adequado para seu consumo, todo o seu valor seria perdido. Mas quando as empresas disponibilizam seus produtos em lugares e momentos anteriormente indisponíveis, acabam agregando um valor que antes não existia. O mesmo raciocínio se aplica para as especificações de qualidade do bem, que podem inviabilizar o consumo com sua ausência.

A informação, por sua vez, tem se apresentado mais relevante a cada dia, possibilitando maior velocidade de resposta entre os *stakeholders*. Muitos serviços de transporte utilizam ferramentas de rastreamento e localização em tempo real dos veículos e cargas, e assim é possível constatar situações de emergência a tempo de tomar atitudes eficazes. Isso viabiliza o uso de estoques e prazos reduzidos, e pode servir como diferencial ao disponibilizar esse acompanhamento aos clientes. Com isso, a minimização dos custos voltada

ao alcance do nível de serviço pretendido pode ser um fator determinante para que uma organização se diferencie num contexto de concorrência.

Quando [Bowersox et al. \(2013\)](#) trata da importância da logística para a economia, comenta que ela adiciona valor aos processos da cadeia de suprimentos posicionando (ou condicionando) estrategicamente um estoque para atender as demandas. Esse esforço é custoso, e em 2016 os gastos totais com operações logísticas somaram 7,5% do produto interno bruto (PIB) dos Estados Unidos naquela época, sendo 4,8% gastos somente com transporte, totalizando 895 bilhões de dólares.

O objeto de estudo deste projeto faz parte de uma cadeia logística intensiva em capital, não somente pelo fato de movimentar volumes com um valor de mercado relevante, como também porque as estruturas físicas para a operação segura desses produtos exigem investimento em tecnologias específicas. Por isso, o sucesso em implementar soluções que reduzam custos logísticos e tornem as operações mais eficientes tem grande potencial de retorno em termos financeiros e de valor para os consumidores e empresas.

2.2 A Simulação Como Ferramenta de Decisão

A pesquisa operacional dispõe de várias ferramentas úteis de otimização e análise de decisão. Entre elas, [Hillier e Lieberman \(2013\)](#) destacam a simulação como uma das mais utilizadas e flexíveis, imitando o funcionamento de um processo inteiro. Nem sempre é possível aplicar técnicas mais conhecidas, como modelos de filas ou transportes, em razão da complexidade e incerteza inerente às atividades em análise. A simulação, por sua vez, é capaz de incorporar todas essas variáveis num modelo específico para cada caso.

[Brailsford, Churilov e Dangerfield \(2014\)](#) reforçam a importância da disciplina, destacando a abordagem de simulação por eventos discretos como uma das mais comuns no meio acadêmico e empresarial. Trata-se de uma modelagem de objetos individuais (chamados de entidades) que percorrem um fluxo de atividades, alterando constantemente variáveis de estado do sistema ao longo do tempo. Toda vez que ocorre uma mudança de estado, registram-se as informações desse instante. Os intervalos de tempo relativos a essas atividades podem ser descritos por curvas de probabilidade, e cada entidade pode receber uma série de atributos que determinam seu comportamento no sistema.

A flexibilidade da simulação por eventos discretos não se restringe à replicação de sistemas complexos em modelagens mais simples em computadores, mas serve normalmente como instrumento de comparação e análise de cenários, sistemas de filas, ou a otimização de algum critério de performance específico. A cada dia que passa, ampliam-se os meios para o desenvolvimento de modelos dessa natureza, seja através de planilhas, linguagens de programação, ou softwares especializados. Com isso, grande parte dos pesquisadores e executivos recorrem a programas especialistas como o Arena e o Flexsim.

(GREASLEY; EDWARDS, 2021)

Qualquer modelo de simulação precisa ser validado para garantir que as respostas encontradas com a ferramenta sejam coerentes com a realidade. No entanto, como discute Law (2019), simplificar a realidade sempre traz consigo alguma margem para erro. Caso contrário, tratar-se-ia de um modelo determinístico e não de natureza estocástica. Nesse sentido, encontra-se um consenso, em Law (2019) e Sargent (2010), de que uma clara definição de escopo, uma comunicação constante com os *stakeholders*, aliada à coerência dos resultados com o que se observa na realidade, são meios seguros de estimar a validade do modelo. Nas palavras de Law¹:

“O teste mais definitivo da validade de um modelo ocorre quando os dados de saída do modelo se assemelham muito ao que seria observado na realidade. Se um sistema semelhante ao que foi proposto existe, então um modelo de simulação do sistema existente é desenvolvido e comparado com os dados empíricos. Se as duas séries de dados forem "próximas", o modelo será considerado "válido". (A precisão adequada para essa avaliação dependerá da intenção de uso do modelo e das necessidades do tomador de decisão.) O modelo pode ser, então, modificado para representar um sistema proposto. Quanto maior for a semelhança do sistema proposto com o existente, maior será a nossa confiança no novo cenário. Não existe uma abordagem definitiva para validar o modelo do sistema proposto. Se houvesse, não haveria necessidade de desenvolver um modelo de simulação. Se a comparação acima tiver êxito, ela acrescentará credibilidade ao uso da simulação.” (LAW, 2019, p.30, tradução do autor)

O nível de credibilidade dos estudos pode ser ampliada de acordo com o volume de dados disponíveis para análise. Greasley e Edwards (2021) explicam diferentes mecanismos úteis para essa coleta como mineração de dados, *data farming*, e a mineração de processos, aparentemente compatível com as circunstâncias deste projeto. Na mineração de processos, os dados são gerados conforme o desenrolar das operações, com registros de todos os eventos ocorridos: o horário da chegada de um caminhão, sua programação, compartimentação, volume, hora de entrada, tempo de carregamento, hora de saída, e assim por diante. Tudo isso serve para caracterizar as entidades e atividades usando a validação estatística das distribuições de probabilidade, pelo método qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov. (ROSS, 2013)

¹ The most definitive test of a simulation model's validity is establishing that its output data closely resemble the output data that would be observed from the actual system. If a system similar to the proposed one now exists, then a simulation model of the existing system is developed and its output data are compared to those from the existing system itself. If the two sets of data compare "closely," then the model of the existing system is considered "valid." (The accuracy required from the model will depend on its intended use and the utility function of the decision-maker.) The model is then modified so that it represents the proposed system. The greater the commonality between the existing and proposed systems, the greater our confidence in the model of the proposed system. There is no completely definitive approach for validating the model of the proposed system. If there were, then there might be no need for a simulation model in the first place. If the above comparison is successful, then it has the additional benefit of providing credibility for the use of simulation" (LAW, 2019, p.30)

As instalações estudadas neste projeto contam com um elevado nível de automação, gerando uma grande quantidade de dados operacionais todos os dias. Esse volume de dados viabiliza uma análise com alta confiabilidade, levando em conta todas as especificidades da operação com o apoio de profissionais experientes. Por essa razão, o uso de uma abordagem de simulação por eventos discretos é viável, podendo ser usada a fim de estudar diferentes cenários para uma tomada de decisão.

2.3 A Cadeia de Suprimentos de Combustíveis

Em uma breve explicação sobre a cadeia de suprimentos do setor de combustíveis, [Lima, Relvas e Barbosa-Póvoa \(2016\)](#) descrevem o *upstream* como a etapa de extração e transporte de matéria prima para as refinarias e usinas. Nelas, os insumos transformam-se em produto final, atendendo a todas as especificações de qualidade cabíveis, completando a etapa chamada de *midstream*. A partir desse momento, na fase de *downstream*, a logística começa a ganhar maior complexidade: o combustível precisa ser distribuído para bases de distribuição, localizadas estrategicamente por todo o país, levando em conta suas respectivas demandas, capacidade de armazenamento e o modal mais adequado (por caminhão, trem, duto ou navio). Essa é conhecida como a distribuição primária, e já incorre em custos relevantes.

A popularização dos biocombustíveis acrescentou um grau de complexidade ainda maior para as operações de distribuição. [An, Wilhelm e Searcy \(2011\)](#) discutem como a necessidade de terras aráveis, de um clima adequado e a sazonalidade das safras impactam numa cadeia que ainda compete com os preços e o desempenho dos combustíveis fósseis. Para o autor, as ferramentas da pesquisa operacional são um elemento chave nesses novos desafios para que, oferecendo apoio à tomada de decisão, otimizando as rotas logísticas, e prevendo o comportamento de parâmetros relevantes, seja possível alavancar a viabilidade econômica dessa cadeia de suprimentos, em especial.

A operação das bases de distribuição está no centro do *downstream*, e serve como ponto de partida para a distribuição secundária, que leva os produtos até os postos de combustíveis. A infraestrutura dessas instalações é determinante para garantir um nível de serviço adequado e uma boa utilização dos ativos da empresa. Por isso, manter uma base com excessivo tempo de espera para carregamento de caminhões impacta diretamente a margem de lucro das vendas, e pode inviabilizar muitos negócios. A figura 1 ilustra a cadeia de suprimentos de combustíveis, onde se encontram as bases de distribuição pertinentes a este projeto com o nome *Bulk Terminal Storage*.

[Reis, Pitombeira-Neto e Rolim \(2017\)](#) realizaram um projeto de simulação numa base de distribuição semelhante ao objeto deste estudo, observando cenários alternativos como aumento de vazão, a adição de um novo braço de carregamento e uma nova po-

Flow of crude oil and gasoline to your local gas station

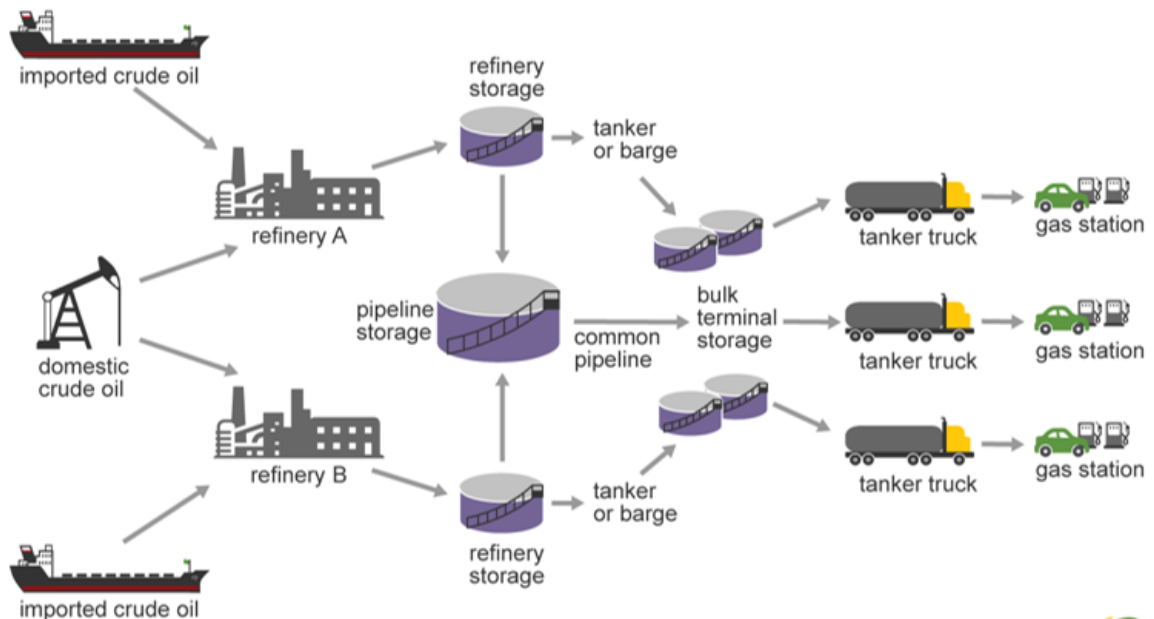


Figura 1 – Esquema da cadeia de suprimentos de combustíveis. Fonte: U.S. Energy Information Administration

lítica de filas. Seu modelo não se limitou a replicar de forma coerente o funcionamento das instalações, como também pode observar os impactos dessas diferentes situações nos indicadores de performance do terminal.

Ao simular um aumento de 20% na vazão das operações de carregamento, constatou-se melhoras de 7 a 4 minutos no tempo de carregamento de gasolina e diesel S10. Além disso, o impacto de acrescentar um braço de gasolina foi da ordem de 2 minutos, em grande parte devido à configuração das baias no local, que compartilham braços entre duas vagas. Já a comparação de uma política de filas FCFS (*First-Come-First-Served*) com o modelo proposto, que se baseia no tempo de espera dos caminhões, demonstrou bons resultados para a maioria da frota considerada no estudo.

Assim como esse trabalho, diversas outras iniciativas demonstram a pertinência do uso da simulação no *downstream*, como nas pesquisas Heckl et al. (2010), Cafaro et al. (2010), e Quinteros et al. (2019), propondo modelos de simulação para redes de distribuição dutoviária. E, da mesma forma, o *midstream* também tem sido muito estudado, não apenas quanto aos seus aspectos logísticos, como trata Cornillier et al. (2008), mas também no âmbito de manutenção e confiabilidade, abordado pelo projeto de Conn et al. (2010). Até a mesma abordagem de teste de cenários, manipulando variáveis de infraestrutura, pode ser encontrada em outros contextos, como ocorre na recente pesquisa de Feng et al. (2020).

Levando em consideração esse contexto acadêmico, o impacto dessas publicações e

a sua relevância econômica, o desenvolvimento de um modelo de simulação voltado para as operações de distribuição de combustíveis tem um grande potencial. Nas próximas seções, serão dados detalhes da base de distribuição em estudo e discutidos os fundamentos que estruturam a metodologia de modelagem e validação das rotinas de carregamento.

3 Contextualização das operações e definição do problema

O objeto de estudo deste projeto é uma base de distribuição de combustíveis, com capacidade de atender aproximadamente 220 postos de abastecimento na cidade de Brasília, Distrito Federal. Ela possui nove tanques de armazenamento, podendo receber produtos via trem, duto e caminhões tanque, destinando-se a distribuir esse volume exclusivamente no modal rodoviário. Para esse fim, conta com uma estrutura de carregamento de autotanques dividida em sete baias de uma plataforma de abastecimento e descarga, com capacidade para atender um veículo por vez.

Para a definição do problema, é necessário uma descrição sumária dos processos que ocorrem na base. Sendo assim, as operações com trens e caminhões que resultam no abastecimento dos tanques da base são chamadas de descarga, contando com baias e bombas dedicadas a essa tarefa. Elas envolvem um rigor maior em termos de controle de qualidade, exigindo sempre a tomada de amostras para análise e garantia da qualidade dos combustíveis que entram no terminal. Três, das sete baias da plataforma são dedicadas a essas operações, funcionando de forma independente entre si e em relação às atividades de carregamento. A falta de combustível na base é considerada pela supervisão como um evento extremamente atípico, sendo mais comum a escassez de espaço disponível em tanque, resultando em maiores tempos na fila de descarga e estadia e vagões.

Todas as atividades que resultam no carregamento de caminhões tanque são chamadas de carregamento, e ocorrem somente na plataforma de abastecimento, nas baias 2, 4, 5 e 7. Existem duas modalidades de abastecimento, conhecidas como *top* e *bottom*. Na primeira, os braços de carregamento são posicionados acima do autotanque, e o operador os insere pela escotilha de cada compartimento. Uma vez que o braço do produto programado está posicionado na escotilha do compartimento a ser carregado, aciona-se a liberação do fluxo. Esse mesmo procedimento se repete para cada compartimento, um de cada vez.

Já no carregamento *bottom*, os braços estão posicionados no nível do solo, e o operador os acopla em bocais situados nas laterais do caminhão, um para cada compartimento. Da mesma forma que no carregamento *top*, cada braço de carregamento corresponde a um produto, com a diferença de que é possível acoplar mais de um braço em diferentes compartimentos ao mesmo tempo. Isso permite uma operação mais ágil, carregando diferentes partições do veículo ao mesmo tempo.

Todos os comandos de liberação de fluxo para o abastecimento são controlados

por um sistema automatizado chamado de *multiload*, que possui as receitas de todas as devidas misturas (entre álcool e gasolina, ou entre diesel e biodiesel) além de alimentar o servidor da base com os dados do carregamento: hora de início e fim do carregamento, para cada braço, em cada compartimento, para todas as viagens (forma com que se chama a entrada de um veículo para ser carregado). É a partir desses registros que a performance da base pode ser avaliada em tempo real. Os indicadores chave de performance (KPIs) relativos às operações de carregamento são definidos como:

- *Gate to Gate*: o *lead time* mensal médio entre a entrada de um caminhão no perímetro da base, para ser carregado, até a sua saída.
- Custo Unitário: a razão entre os custos operacionais mensais (OPEX) e volume carregado (ou volume movimentado) total durante um mês de funcionamento.

Existem metas para a melhoria contínua desses parâmetros, mas indicadores que contemplem o ganho financeiro gerado pela maior eficiência das operações da base de distribuição não existem, e informações mais precisas a respeito das vendas se concentram em outros departamentos, com acesso mais restrito. Por essa razão, os funcionários do terminal têm dificuldade de estimar a viabilidade econômica de projetos e investimentos em infraestrutura.

Retornando ao contexto da operação, outra funcionalidade do *multiload* é monitorar qualquer irregularidade em termos de espaço disponível e vazão. Por meio de uma integração de sensores do caminhão e da baía, é possível confirmar que o compartimento a ser carregado está realmente vazio e que o volume programado é coerente. Caso o espaço, a vazão, ou qualquer outro aspecto do carregamento esteja fora dos limites esperados, o sistema interrompe automaticamente as atividades, podendo ser liberado somente com a autorização da supervisão na sala de controle. Essas interrupções são chamadas de alarmes, e existe um registro dessas ocorrências no sistema, mas a estimativa do seu impacto nas operações tem mostrado ser de difícil obtenção até o momento.

Uma vez que os caminhões finalizam o processo de carregamento, a sua programação pode exigir a aditivação dos produtos ou a tomada de amostras para fins de controle de qualidade. Esses procedimentos são realizados em uma plataforma separada, onde um funcionário da base se dedica a tarefa de aditivação manual e coleta. Nesse caso, não há registros de rotina no sistema de automação, sabendo-se somente o horário de saída do autotanque e o horário de finalização do carregamento.

As viagens que carecem de uma amostragem dos produtos da base pertencem a uma modalidade chamada FOB (*Free On Board*), em que o terminal não se responsabiliza mais pela entrega do produto no momento que o caminhão sai do perímetro da base. Já quando as negociações de venda exigem a entrega dos produtos nos postos, a empresa

aciona uma frota contratada e responde pela sua integridade até o momento da chegada no posto, configurando a modalidade CIF (*Cost, Insurance and Freight*). No entanto, para agilizar a entrega, nem todos os clientes exigem amostragem na modalidade FOB.

Assim, o funcionamento da base de distribuição ocorre todos os dias, fechando num intervalo de 21h a meia noite para fins de contabilização e fechamento do estoque. Aos sábados a operação trabalha em horário reduzido, de meia noite às 18h, e domingos de 06h ao meio dia. Essa jornada totaliza 129 horas de operação por semana, que é dividida em três turnos, cumpridos, cada um, por uma equipe diferente.

Em face do exposto, define-se como problema deste projeto a ausência de uma ferramenta de simulação que ampare decisões gerenciais e de investimentos em infraestrutura do terminal, com vistas à incrementar sua eficiência operacional.

4 Metodologia

Esta seção tem por objetivo definir a abordagem metodológica que irá pautar o desenvolvimento do projeto, a fim de localizar na literatura o enfoque mais adequado ao seu escopo.

Nesse sentido, [Cauchick \(2019\)](#) contribui com uma visão geral da metodologia científica aplicada à engenharia, incluindo os paradigmas atuais da área de pesquisa operacional e simulação. O autor dá ênfase à pesquisa quantitativa baseada em modelos e técnicas de simulação por eventos discretos, discutindo os seus dois desdobramentos possíveis, entre as classes axiomática e empírica. Essa tipologia pode ser particularmente entendida como uma abordagem de geração de conhecimento racional, não somente pela premissa de que se pode explicar pelo menos parte dos processos reais, mas também porque as relações causais entre as variáveis permitem prever o futuro das atividades modeladas.

A pesquisa axiomática tem como ponto de partida a definição de problemas idealizados, com fontes de dados artificiais. É uma modalidade fortemente associada à áreas como matemática, estatística e ciências da computação, capaz de formular descrições dos processos analisados, ou de prescrever políticas e estratégias que melhorem a solução do caso em questão. Já a abordagem empírica, por sua vez, concentra-se em garantir uma aderência entre o que se observa na realidade e o comportamento do modelo, envolvendo a interpretação do mundo natural com fontes de dados reais. Assim, essa abordagem também pode assumir um caráter descritivo e prescritivo.

Segundo essa explicação, é possível deduzir que, como a vivência e extração de dados em campo foram características marcantes neste projeto, a sua classificação do ponto de vista metodológico se aproxima à abordagem quantitativa empírica descritiva, definida, nas palavras do autor, da seguinte forma:

A pesquisa empírica descritiva está principalmente interessada em criar um modelo que descreva de forma adequada as relações causais que podem existir na realidade, o que leva a uma compreensão dos processos reais. Preocupa-se em desenvolver e analisar modelos quantitativos para representar os problemas ou processos observados na realidade, com o propósito de entender melhor o processo modelado, explicar suas características e avaliar seu comportamento e desempenho na sua configuração original e em configurações alternativas. ([CAUCHICK, 2019](#), p.227)

Por essa razão, aplicam-se a ela os seguintes passos, descritos por [Bertrand e Fransoo \(2002\)](#), para essa modalidade:

- a identificação das premissas do problema;

- dos tipos de decisões e processos envolvidos;
- a derivação de hipóteses quanto ao funcionamento do sistema;
- o desenvolvimento de métricas para o modelo;
- a apresentação dos resultados;
- a interpretação das observações em relação às hipóteses;
- e a confirmação ou rejeição do modelo

Dessa forma, [Cauchick \(2019\)](#) ilustra o processo de modelagem de maneira semelhante ao que se encontra no artigo de [Sargent \(2010\)](#), como um processo contínuo de melhoria do modelo. A figura 2 representa de forma esquemática o desenvolvimento da simulação, onde, na formulação, o pesquisador seleciona as variáveis que irão fazer parte do estudo. Na dedução, aplicam-se as técnicas matemáticas e estatísticas a fim de resolver o problema proposto, gerando soluções que possam ser avaliadas pelo tomador de decisão. Caso a inferência desses resultados não seja suficiente para fundamentar uma escolha, inicia-se novamente o ciclo de desenvolvimento.

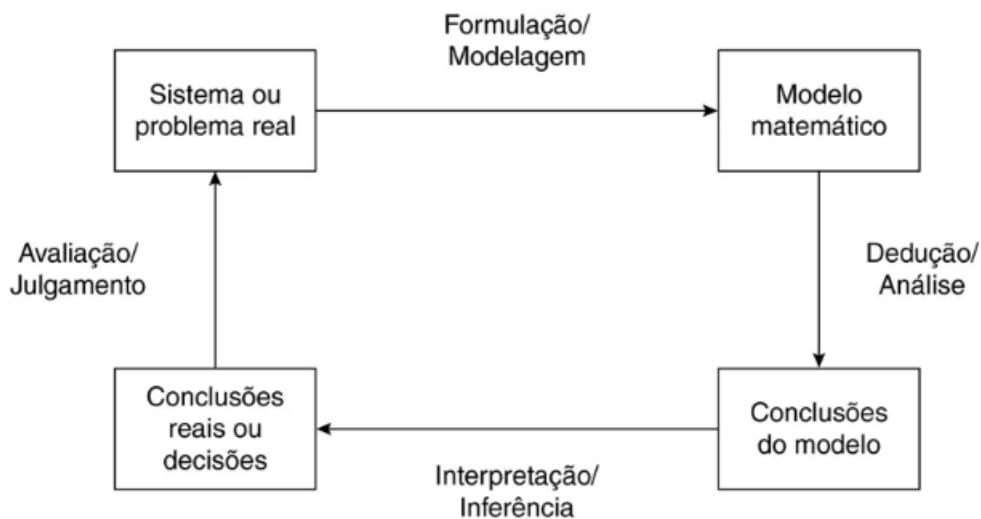


Figura 2 – Processo de modelagem. Fonte: ([CAUCHICK, 2019](#), p.230)

Como o projeto prevê a validação de um modelo de simulação que descreve as operações da base de distribuição de combustíveis, seguida de uma aplicação prática para uma tomada de decisão, entende-se que o estudo usará, em um primeiro momento, um paradigma descritivo, para, posteriormente realizar um estudo de caso de caráter prescritivo. Sendo assim, as técnicas de validação do primeiro modelo serão baseadas nas contribuições de [Law \(2019\)](#) e [Sargent \(2010\)](#), a fim de garantir que o segundo também possa produzir resultados consistentes com a realidade.

Dessa forma, a primeira etapa do projeto consistirá em uma delimitação clara do escopo do modelo, seguida de um mapeamento dos seus processos e decisões. Esse mapa, por sua vez, orientará o levantamento das variáveis pertinentes, e um estudo detalhado de cada uma a fim de parametrizar a simulação com a maior confiabilidade possível. Assim, o desenvolvimento do modelo no Arena irá incorporar essas variáveis, replicando o funcionamento real da base por meio de indicadores já utilizados, ou desenvolvidos pelo projeto.

4.1 Definição de Escopo

Existe consenso na literatura, a exemplo de [Law \(2019\)](#), [Sargent \(2010\)](#), [Ross \(2013\)](#), e [Hillier e Lieberman \(2013\)](#), no que diz respeito ao papel crucial da definição do escopo do projeto de simulação. É necessário esclarecer qual é o problema exato a ser resolvido, quais perguntas devem ser respondidas, e os limites sobre os quais a modelagem será implementada. E, conforme apresentado na seção de objetivos deste trabalho, deseja-se desenvolver um modelo de simulação para os processos de carregamento de caminhão tanque em uma base de distribuição de combustíveis.

O principal problema que justifica a importância deste estudo é a difícil estimação do impacto nos indicadores de performance da base quando se realiza algum investimento em infraestrutura. Além disso, não existe um critério padrão para avaliar o impacto financeiro (de redução de custos operacionais) dessas mudanças, a fim de discutir sua viabilidade com maior profundidade. Entendeu-se que levantamento da economia que o terminal gera com sua eficiência transmite à companhia a imagem de uma unidade que agrega valor, ao invés de simplesmente consumir recursos como uma atividade meio, imprescindível à realização das vendas.

Levando em conta que a simulação é uma ferramenta adequada para esse tipo de situação, o escopo do modelo foi delimitado para as operações de carregamento de caminhões sem levar em conta a dinâmica de tancagem e descarga. Essa decisão foi feita com base em três premissas que dizem respeito ao funcionamento específico da base estudada, e que não se aplicam necessariamente para outros centros de distribuição semelhantes:

- A eventualidade de falta de combustíveis nos tanques pode acontecer, mas é entendida pela equipe de supervisão como muito rara. Na realidade, parte do desafio da gestão do terminal é coordenar as entradas de produto, que excedem muitas vezes a capacidade de tancagem, e podem gerar grandes filas. Por isso não é incoerente dizer que, para fins de modelagem, sempre haverá produto disponível para o carregamento.
- O carregamento é a atividade fim da base de distribuição, e seu desempenho tem

um impacto que pode ser percebido por outras áreas da companhia. As operações de descarga podem ocorrer de maneira independente, e os custos associados a suas operações podem ser considerados sem necessariamente incluí-las no modelo.

- A disponibilidade de dados estruturados relativos às operações de carregamento é maior em comparação com as demais funções do terminal. O sistema de automação que alimenta essas bases somente leva em conta o modal rodoviário, dificultando a tarefa de consolidação dos dados de outros modais da descarga como vagões e bombeio.

Com isso, além de delimitar o modelo funcionalmente, no que se refere às atividades que serão consideradas, também foi possível defini-lo temporalmente. A maioria dos indicadores de performance estão dimensionados para medir um mês de operação, e o volume coletado compreende um quadrimestre. Assim, o dimensionamento da modelagem para descrever um mês de operação garante o levantamento de informações relevantes para a tomada de decisão, contando com uma quantidade relevante de dados empíricos.

Dessa forma, olhando para os processos de carregamento de maneira isolada, e replicando seu funcionamento no período de um mês, torna-se mais fácil simplificar a realidade e oferecer análises mais precisas. Para isso, é necessário compreender de forma mais detalhada os processos realizados atualmente na base de distribuição.

5 Desenvolvimento

Este capítulo tem como foco retratar o mapeamento dos processos de carregamento, a análise exploratória dos dados disponíveis, além de detalhar o desenvolvimento do modelo de simulação. Para isso, ele será dividido em três seções, contemplando respectivamente cada uma dessas etapas.

5.1 Mapeamento do Processo de Carregamento

No formato de guia de boa práticas, [Bilodeau, Vitkus e Powell \(2013\)](#) fazem uma coletânea do corpo de conhecimento do *Business Process Management* (BPM), constituindo uma referencia importante para o *Business Process Management Notation* (BPMN). Essa técnica se difundiu como padrão de modelagem no mercado, definindo uma notação padronizada que facilita sua compreensão. Para os fins deste projeto, esses princípios foram usados para orientar a tarefa de estudo do processo de carregamento de caminhões tanque. Na figura 3, a seguir, encontra-se um desdobramento em alto nível das atividades que um motorista realiza para carregar na base de distribuição.

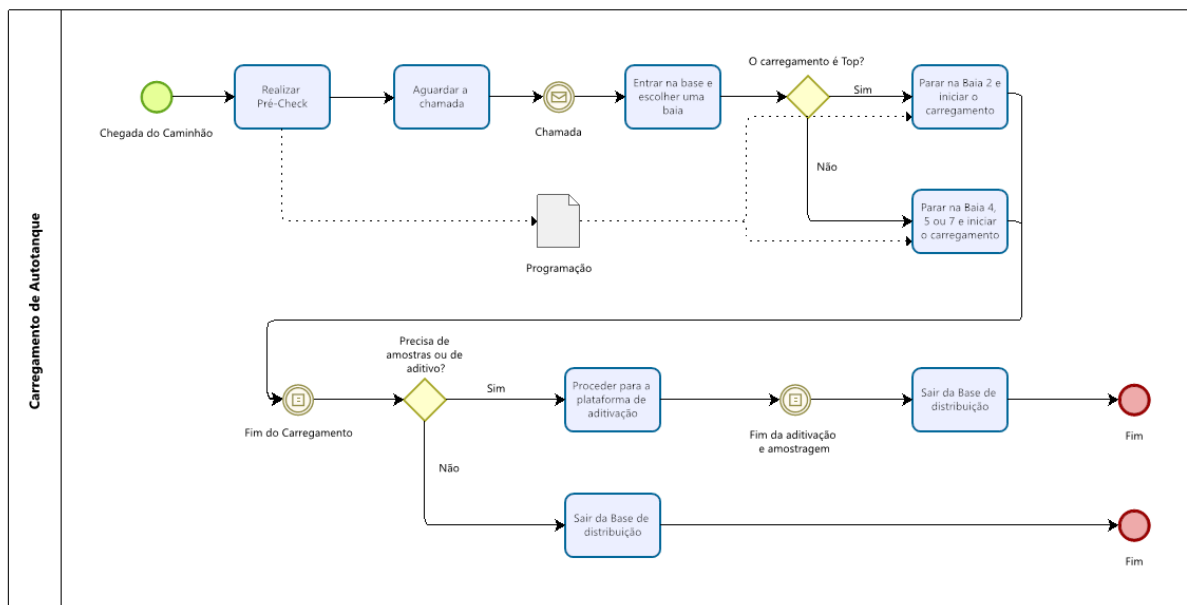


Figura 3 – Mapeamento do processo de carregamento de autotanque na Base de Brasília.
Fonte: O Autor

O primeiro passo ao chegar nas imediações da base é a realização do *pre-check*. Essa atividade consiste na confirmação de chegada do motorista por meio de um console instalado na sala de espera, no cadastro dos lacres a serem usados antes e depois do carregamento, e no registro dos envelopes das amostras caso sejam necessárias. Com isso,

a programação de carregamento é confirmada, emitindo-se um recibo com todos esses dados para o condutor, especificando quais serão os compartimentos carregados, o volume e com quais produtos. Desse ponto em diante o sistema reconhece que existe um caminhão esperando para carregar e o chama automaticamente se houverem baias disponíveis.

Assim que for chamado, o veículo tem quinze minutos para entrar no terminal, registrando sua entrada em um console instalado na cancela de entrada. A partir desse momento o sistema sabe exatamente o seu horário de entrada e passa a contar o tempo de estadia do caminhão na base. Em seguida, o condutor procede para a plataforma de carregamento, onde escolherá alguma baia disponível, a depender da configuração do seu autotanque: se ele for do tipo top, somente poderá carregar na baia 2, caso contrário, poderá optar pelas baias 4, 5 e 7. Nesse último caso, identifica-se, por parte dos supervisores e com o apoio do sistema de automação, uma preferência pelas baias 4 e 5 em relação à 7.

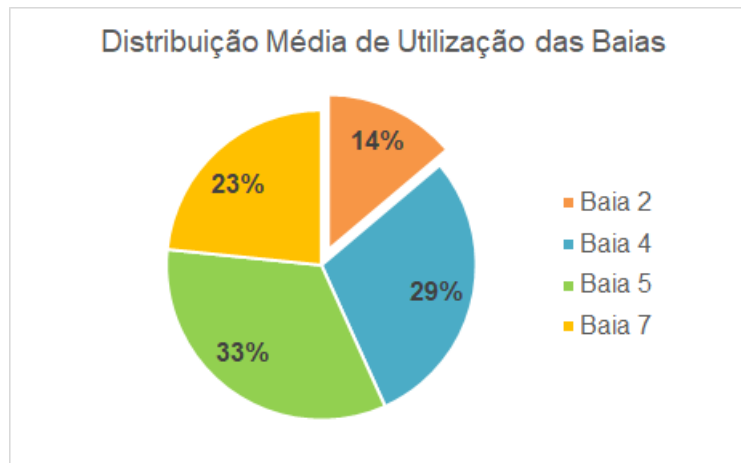


Figura 4 – Gráfico da distribuição média da utilização de baias. Fonte: O Autor

A distribuição retratada no gráfico acima foi elaborada usando os dados de utilização das baias fornecido pelo sistema de automação. Entende-se que a preferência dos motoristas pelas baias 5 e 4 se deve ao fato de terem equipamentos mais novos e, portanto, com manuseio mais fácil. Além disso, em determinadas horas do dia, a baia 7 fica mais exposta à luz do sol ou chuva, por estar na extremidade da plataforma, fazendo com que os condutores a evitem caso tenham outra opção.

Finalmente, uma vez que o processo de carregamento se conclui, o motorista pode prosseguir para a saída ou aditivação/amostragem dos produtos, na plataforma de aditivação. Esse processo não é integrado ao sistema de dados da base, sabendo-se somente a hora do fim do carregamento e a de saída do veículo. É possível, no entanto, determinar uma distribuição geral para essa fase do atendimento, a fim de tornar o modelo mais realista. O mapeamento facilita a identificação de pontos como esse, orientando a análise dos dados que irão compor o modelo. Na seção seguinte serão discutidas as premissas e

passos dados na exploração dos dados empíricos da base.

5.2 Análise Exploratória de Dados

O sistema de automação da base de distribuição disponibiliza relatórios mensais em dois formatos: o *gate to gate*, que mostra os intervalos de tempo entre cada fase do processo de carregamento para cada viagem ocorrida; e o relatório de carregamento diário, que desdobra as informações de programação e volume em cada uma dessas viagens. Assim, em função de estruturar um banco de dados suficiente para uma simulação de um mês de operações, decidiu-se extrair relatórios dos meses de setembro a dezembro de 2020. Esse conteúdo foi compilado em uma planilha única, totalizando 11.595 viagens.

Levando em conta o mapeamento realizado na seção anterior, procurou-se entender o comportamento de diferentes aspectos da operação por meio de uma análise exploratória. O estudo de como ocorre a chegada dos caminhões, como estes estão configurados, sua compartimentação interna, quais são as programações esperadas, em quanto tempo se costuma carregar, a distribuição do volume carregado e os tempos de saída, é fundamental para que o modelo possa ser devidamente parametrizado de acordo com a realidade. Por esse motivo, as seções a seguir serão dedicadas a detalhar esse estudo.

É importante mencionar que as curvas de distribuição de probabilidade, apresentadas no decorrer deste capítulo, foram encontradas usando um módulo da plataforma *Arena*, chamado *Input Analyzer*. Essa aplicação compara diversas distribuições, escolhendo aquela que apresentar a maior aderência entre todas as expressões testadas. No entanto, ao aplicar os testes estatísticos qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov, não foi possível verificar encaixe para todas as curvas teóricas, sendo necessário construir expressões específicas com as probabilidades cumulativas calculadas pelo próprio aplicativo. Assim, em concordância com a metodologia quantitativa empírica apresentada por [Cau-chick \(2019\)](#), buscou-se descrever a realidade observada da melhor forma possível, mesmo que parcialmente, considerando, também, o que ensina [Law \(2019\)](#), de que a coerência do modelo final com a realidade confere, por si só, validação suficiente.

5.2.1 Chegada dos Caminhões

O ritmo de chegada dos caminhões nas imediações do terminal é um parâmetro fundamental para que o modelo se comporte de acordo com a realidade. Essa métrica representa, de maneira indireta, a demanda do mercado consumidor e determina o ritmo das atividades dentro do terminal. Muitos fatores externos podem contribuir para a flutuação dessa demanda entre um dia e outro, como variações no preço dos combustíveis, épocas do ano específicas como a volta às aulas, férias ou feriados. Internamente, pode-se

dizer que as negociações da distribuidora com os postos também podem ter resultados variados, aumentando ou reduzindo o volume movimentado.

Os dados disponibilizados no sistema permitem a identificação das viagens com um código único, desdobrando, para cada uma, informações específicas como a data e hora de chegada na base. Por isso decidiu-se observar a frequência da chegada de caminhões por dia da semana, a fim de validar uma distribuição de probabilidade que descreva a demanda a cada dia da semana.

5.2.2 Bitrens

Os caminhões podem transportar um ou dois tanques, sendo o último caso normalmente chamado de bitrem. No entanto, a plataforma de carregamento é dimensionada para atender um tanque de cada vez, e por isso esses veículos de maior volume demoram mais para carregar. Eles normalmente são usados para o transporte de produtos a outras bases de distribuição, a fim de suprir eventuais faltas de produto devido a algum excesso de demanda. Assim, a base estudada neste projeto assume o papel de suprir as instalações menores da região, recebendo regularmente esse tipo de autotanque. Neste caso, apenas 5,67% das viagens são de bitrens.

5.2.3 Compartimentação e Programações

Os tanques transportados pelos caminhões podem ser subdivididos em compartimentos separados, permitindo o carregamento de diferentes produtos ao mesmo tempo. Por isso, ao realizar o *pre-check*, o motorista confirma quais combustíveis serão carregados em cada compartimento, bem como o seu volume em cada um, emitindo um recibo com essa programação.

O estudo da configuração típica dos veículos que frequentam a base é fundamental para a precisão do modelo no que diz respeito aos tempos de atendimento e volume movimentado. Caminhões que carregam um par de compartimentos com o mesmo produto podem vir a ser atendidos mais rápido ou demorar mais por conta disso. Afinal, se houverem dois braços *bottom* de um mesmo produto, é possível carregar um par de compartimentos em paralelo.

Por essa razão, a partir da base de dados estabelecida, foram filtrados os dados relativos à compartimentação e programação das viagens. Em primeiro lugar, analisou-se a distribuição dos compartimentos, a fim de entender o perfil médio dos caminhões que frequentam a base. E nesse sentido é importante mencionar que se entende por compartimento aquilo que efetivamente será carregado. Por exemplo, se um caminhão possui seis compartimentos, e vier para carregar apenas três, o sistema registrará somente esse trio na programação. Não haverá como saber que esse veículo realmente tinha seis seções. Assim,

no gráfico a seguir, desdobra-se a distribuição de compartimentos a carregar segundo o sistema.

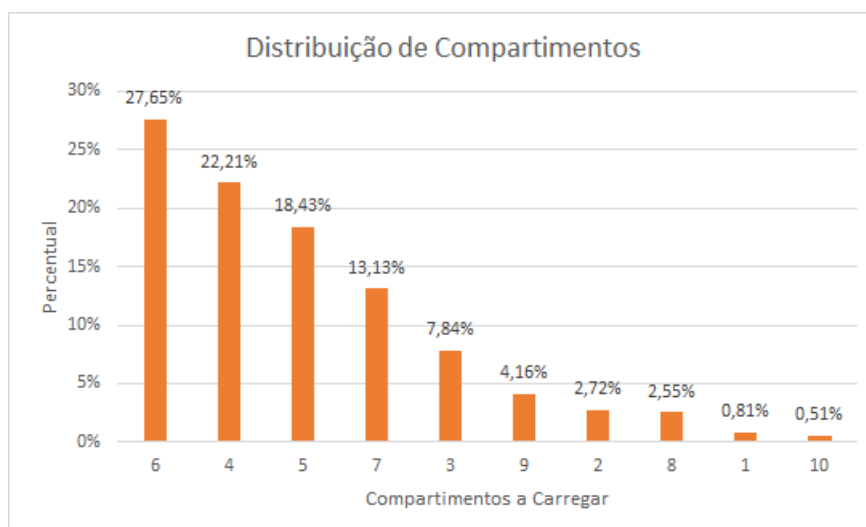


Figura 5 – Gráfico da distribuição percentual de caminhões segundo o número de compartimentos. Fonte: O Autor

Observa-se, com o gráfico, que a maioria dos caminhões entra na base para carregar de quatro a seis compartimentos. Existe a possibilidade de se carregar apenas um, dois ou até dez, mas esses casos são mais raros, e esse perfil de compartimentação pode corresponder a carros bitrem, corroborando a observação anterior quanto à minoria dessa configuração.

A programação dos caminhões, por sua vez, está relacionada com a compartimentação no sentido de que ela expressa indiretamente a demanda por um certo produto. Se a gasolina, por exemplo, tiver a maior demanda, espera-se que ela ocupe, em geral, mais compartimentos. Passa a ser necessário, então, conhecer previamente os compartimentos a serem carregados para então estimar a programação mais provável de um determinado perfil. Por essa razão, foi feita uma matriz de frequências relacionando o número de seções a serem carregadas com os produtos da base: gasolina (GASA), álcool hidratado (ALCH), diesel S500 (DIESE) e diesel S10 (ODS10).

		Compartimento									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Produto	ALCH	8,6%	10,3%	9,0%	10,9%	11,0%	11,4%	16,3%	34,8%	8,8%	80,7%
	DIESE	8,8%	9,1%	12,7%	7,4%	9,4%	8,7%	5,7%	2,6%	3,8%	17,9%
	GASA	38,3%	39,8%	56,7%	67,8%	65,7%	66,3%	63,4%	47,0%	62,9%	1,4%
	ODS10	44,3%	40,8%	21,6%	13,9%	14,0%	13,6%	14,6%	15,6%	24,5%	0,0%

Figura 6 – Matriz de frequências entre produtos e o número de compartimentos a serem carregados. Fonte: O Autor

O relacionamento dessas variáveis numa matriz revela com clareza um perfil médio de carregamento para cada compartimento. É possível ler a tabela de forma mais intuitiva

respondendo a seguinte pergunta: dado o número de compartimentos de um carro, qual é a chance de, escolhendo uma dessas seções aleatoriamente, encontrar um produto específico? Em suma, ela representa a probabilidade condicional de se carregar um tipo de combustível dado o número de compartimentos.

5.2.4 Tempo de Carregamento

O processo de carregamento se inicia a partir do momento que o caminhão para na plataforma, e o motorista segue o procedimento padrão de aterramento, acoplando os braços nos bocais do autotanque. A vivência mostra que muitos fatores afetam esse procedimento como a oscilação da vazão das bombas, a experiência do condutor, o volume a ser carregado, a programação e até a compartimentação do tanque. Por isso, no sentido de incorporar todos esses elementos de forma simples e precisa, optou-se pela abordagem geral de estudar o tempo de carregamento entre as baias *bottom*, o tempo de carregamento de um braço *bottom*, e o tempo de um braço top. O sistema reconhece o horário de início e fim da atividade, sendo possível levantar as estatísticas descritivas desse intervalo entre todas as viagens da base de dados.

O quadro da figura a seguir resume as distribuições estatísticas encontradas para cada um dos conjuntos de dados mencionados. Cada uma das estimativas abaixo resulta de uma filtragem diferente de um mesmo conjunto de dados. Na primeira, estuda-se o tempo geral para se carregar um caminhão qualquer em uma baia *bottom*, levando em conta todas as viagens disponíveis. Já nas duas últimas, houve um filtro no sentido de levantar o tempo que um braço *bottom* leva para carregar um compartimento (observando-se o funcionamento de um equipamento específico), e o mesmo para um braço top.

	Distribuições	
	Distribuição em Minutos	Observações
Tempo Bottom Geral	Lognormal (14.8, 9.54)	11.595
Tempo Braço Bottom	Lognormal (4.15, 0.854)	16.091
Tempo Braço Top	Normal (4.43, 1.12)	1.293

Figura 7 – Quadro de distribuições para os tempos de carregamento em minutos. Fonte: Autor

O uso de uma distribuição geral para um processo com diversas interfaces possibilita a inclusão indireta de todas essas facetas em um único parâmetro. Encontram-se, inclusas pelo caráter estocástico da curva e de forma simplificada, todas as componentes relevantes ao processo. A principal consequência disso, porém, é o nível em que as atividades passam a ser analisadas, tendo-se, por exemplo, pouca informação no modelo a respeito do impacto da experiência dos condutores nos resultados. Trata-se de uma escolha feita com base no escopo do projeto e no tipo de perguntas que se deseja responder.

5.2.5 Volumes

Toda a quantidade de produto efetivamente carregada em uma viagem, conforme os registros do sistema, é entendida como o volume. E a soma de todas essas viagens resulta no volume movimentado, que é uma das principais métricas de desempenho da base de distribuição. Por isso, a precisão dessa variável específica é fundamental para que o modelo seja capaz de reproduzir o funcionamento do terminal em termos dos seus KPIs.

Em um primeiro momento, procurou-se usar uma abordagem de relacionamento entre compartimentação e volume, semelhante ao que foi feito com a programação de carregamento. O quadro a seguir mostra as capacidades por compartimento mais frequentes em função do número de compartimentos a carregar, evidenciando em amarelo a grande ocorrência do volume de 5m³ em relação a todos os outros. No entanto, a aplicação detalhada dessas probabilidades no modelo não foi capaz de gerar resultados consistentes conforme o esperado, levando ao uso de um procedimento mais geral.

		Compartimento a Carregar									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Volume	1.000	0,00%	0,08%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	2.000	2,00%	4,15%	1,40%	0,82%	1,01%	0,46%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%
	3.000	3,75%	5,35%	1,28%	1,21%	7,33%	0,63%	0,34%	0,30%	0,18%	20,00%
	4.000	0,00%	0,08%	0,17%	0,20%	0,48%	0,25%	0,01%	0,15%	0,09%	10,00%
	4.700	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,10%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	5.000	66,50%	69,61%	92,43%	95,41%	83,02%	97,24%	96,95%	96,49%	99,73%	70,00%
	5.500	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	6.000	0,00%	0,08%	0,05%	0,03%	0,03%	0,05%	0,26%	2,29%	0,00%	0,00%
	7.000	0,75%	0,45%	0,07%	0,02%	0,06%	0,10%	1,59%	0,76%	0,00%	0,00%
	7.500	0,00%	0,08%	0,07%	0,02%	0,06%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	8.000	0,00%	0,00%	0,00%	0,46%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	9.300	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,10%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	9.600	0,00%	0,00%	1,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	10.000	6,00%	3,47%	2,95%	1,77%	7,77%	0,92%	0,79%	0,00%	0,00%	0,00%
	11.000	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	12.000	0,25%	0,00%	0,05%	0,00%	0,08%	0,07%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	13.000	0,00%	0,00%	0,02%	0,00%	0,16%	0,07%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	15.000	0,00%	0,23%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	21.000	0,00%	0,30%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	22.000	11,50%	7,69%	0,50%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
23.000	8,25%	7,54%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
24.000	0,00%	0,23%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
25.000	0,00%	0,23%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
26.000	0,25%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
30.000	0,00%	0,00%	0,00%	0,08%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
33.500	0,25%	0,23%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
35.000	0,00%	0,23%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
42.000	0,50%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	

Figura 8 – Matriz de frequências para os volumes em função do número de compartimentos a carregar. Fonte: Autor

Assim, para expressar o volume característico da frota atendida pela base de distribuição, utilizou-se, também, uma abordagem de mais alto nível, definindo uma dis-

tribuição geral. Foi possível utilizar toda a base de dados e selecionar o volume total carregado pelas mais de onze mil viagens registradas. Com isso constatou-se que dado um veículo aleatório que entra no terminal, sua capacidade em termos de volume (em metros cúbicos) é descrita por uma distribuição $weibull(24.2, 3.76)$, em litros. A partir do uso desse procedimento, os resultados em termos de volume movimentado passaram a ser mais coerentes com a realidade da base.

5.2.6 Tempos de Saída

Conforme mencionado acima, após o término do processo de carregamento, os caminhões podem proceder para a plataforma de aditivação ou simplesmente para a saída. As informações pertinentes a essa etapa, no entanto são escassas, uma vez que o sistema de automação da base registra somente o horário de saída dos veículos. Isso torna a tarefa de determinar quais caminhões deverão ser aditivados mais difícil, já que o levantamento desses dados consumiria tempo até que se tenha um volume relevante para análise.

Diante disso, optou-se por estudar de forma agregada os tempos de saída, a fim de entender o perfil que essa etapa apresenta com os dados disponíveis. A figura a seguir ilustra o histograma encontrado, mostrando a curva de probabilidade que melhor se encaixa à amostra.

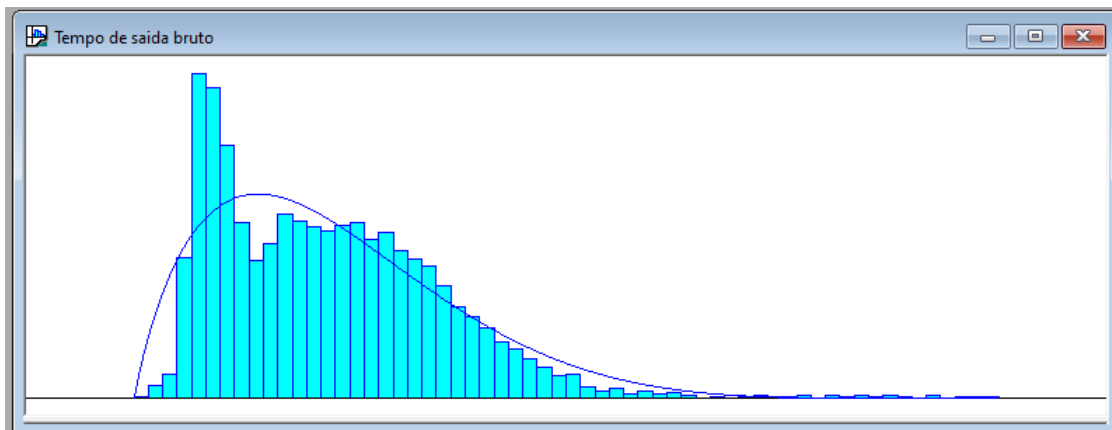


Figura 9 – Histograma para os tempos de saída da base em um intervalo de quatro meses.
Fonte: Autor

Observa-se, no início, uma grande frequência de tempos mais curtos até um determinado limite, a partir do qual os caminhões podem vir a demorar até 60 minutos para sair, em casos mais extremos. Ao se considerar o caso estudado, o gráfico demonstra com clareza tanto a distribuição dos veículos que deixam a base imediatamente, como os que passam mais tempo na aditivação e amostragem. Assim, a curva de distribuição $Beta(1.89, 6.32)$, delimitada pela linha azul, compreende essas duas possibilidades.

5.3 Desenvolvimento do Modelo

O desenvolvimento do modelo de simulação foi feito com o uso de um software dedicado a esse mesmo propósito, chamado Arena. Desenvolvido pela *Rockwell Simulation*, o aplicativo possui diversos módulos configuráveis que podem ser arranjados em fluxos que imitam processos reais, com inúmeras possibilidades para a criação de modelos complexos. A plataforma conta com funções próprias para gerar números aleatórios segundo distribuições específicas, teste de encaixe de curvas de probabilidade, registro de indicadores, e emissão de relatórios.

O anexo X e Y ilustram o modelo desenvolvido, e para facilitar a explicação do seu funcionamento, ele será dividido em três partes: a geração e caracterização dos caminhões (entidades), o processo de carregamento e os indicadores do modelo. Dessa maneira serão discutidos em maior detalhe cada um dos passos e escolhas feitas ao criar o modelo, sem perder de vista a visão sistêmica do modelo.

5.3.1 Geração e Caracterização dos Caminhões

A primeira etapa no desenvolvimento do modelo teve como objetivo entender o ritmo de chegadas dos caminhões na base, e o seu perfil típico de configuração. Por isso, esta seção se dedicará a explicar o modelo desde o módulo “Entrada Carregamento” até a estação “ENTER Chegada”, onde, para o modelo, o veículo efetivamente chega nas imediações do terminal.

O primeiro bloco, “Entrada Carregamento”, define a taxa de chegada dos caminhões de acordo com os dados levantados anteriormente. A figura 10 mostra a configuração do módulo, definindo o tempo entre chegadas com uma programação (chamada pelo programa de *schedule*), onde, a cada dia da semana, uma distribuição é usada para definir os tempos de chegada. Não existem limites máximos para a criação das entidades e os veículos chegam um de cada vez.

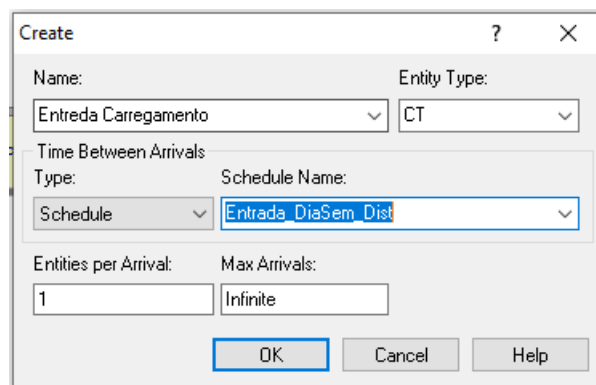


Figura 10 – Configuração do Módulo *Create*. Fonte: Autor

Uma vez criada a entidade, ela recebe a figura de um caminhão para a animação por meio do módulo *assign Picture*, procedendo, então para o primeiro bloco de decisão, definindo se esta entidade será considerada como bitrem ou não. A análise exploratória demonstrou que apenas 5,67% das viagens no terminal seguem essa configuração, e, portanto, o percentual foi usado como critério para refletir a mesma realidade no modelo.

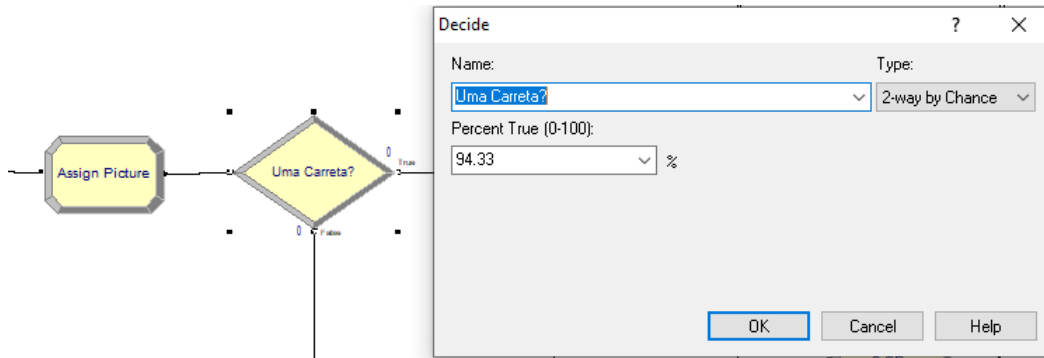


Figura 11 – Configuração do Módulo Decide para Bitrens. Fonte: Autor

Se a entidade não for considerada um bitrem, ela procederá para um segundo módulo de decisão, onde será determinado o seu número de compartimentos. Para isso, foram usados os percentuais da distribuição de compartimentos, ilustrados na figura 12. A partir desse resultado, a entidade seguirá para um módulo específico onde será conhecido o seu número de compartimentos. Nesse bloco, será definida a sua programação de carregamento, levando em conta a compartimentação e o quadro de distribuição de programações por compartimentos a carregar. Essa atribuição é feita usando expressões próprias do Arena, que geram números aleatórios e classificam a programação por meio de expressões lógicas.

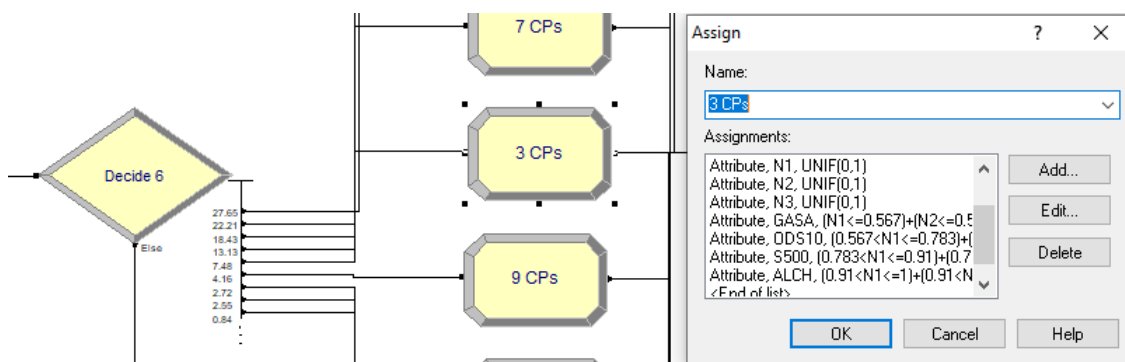


Figura 12 – Detalhamento da configuração dos módulos *Assign*. Fonte: Autor

Já para o caso de o caminhão ser classificado como bitrem, ele receberá um tratamento semelhante, levando em conta o perfil dos caminhões desse tipo que frequentam a base. De acordo com os registros do sistema, apenas três caminhões respondem pelo trânsito de bitrens em Brasília, totalizando 658 viagens na base de quatro meses. O quadro a seguir detalha a distribuição das programações e compartimentação para cada veículo.

	Caminhões		
	1	2	3
ALCH	7,00%	8,76%	0,00%
DIESE	3,00%	3,63%	0,00%
GASA	65,00%	64,55%	0,00%
ODS10	25,00%	23,06%	100,00%
Compartimentos	8	8	2

Figura 13 – Desdobramento da programação mais típica dos bitrens que frequentam a base. Fonte: Autor

Observa-se que o caminhão 3 assume um perfil muito diferente dos demais, dedicando-se ao transporte exclusivo de diesel S10. Por essa razão foi dedicado um módulo específico para esse caso, e outro para parametrizar a distribuição encontrada nos outros dois, conforme sua compartimentação. A figura 14, a seguir, detalha a configuração dos módulos para caminhões bitrem.

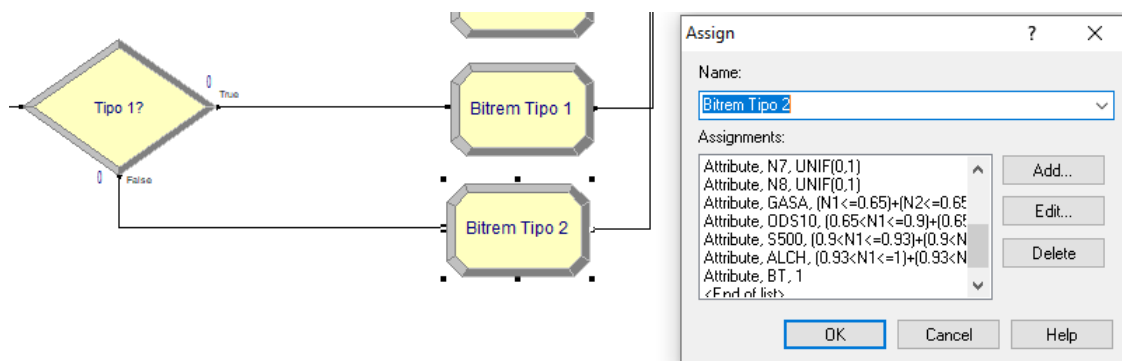


Figura 14 – Detalhamento da configuração dos módulos *Assign* para os Bitrens. Fonte: Autor

O passo seguinte, para ambos os casos, é a entrada no módulo “ENTER Chegada”, onde o modelo reconhece a chegada do caminhão às imediações da base. Desse momento em diante o modelo buscará representar as dinâmicas do processo de carregamento, levando em conta todos os atributos definidos na entidade até o momento.

5.3.2 O Processo de Carregamento

Ao chegar no terminal, o modelo deve discernir qual modalidade de carregamento será utilizada: *top* ou *bottom*. Segundo a base de dados coletada para estudo, 13,84% das viagens ocorridas foram *top*, sendo este, portanto, o critério do módulo de decisão que definirá para qual fila o caminhão será conduzido. A figura 15 ilustra a modelagem do sistema de filas do lado de fora do terminal de distribuição, responsável por controlar a entrada dos caminhões nas instalações.

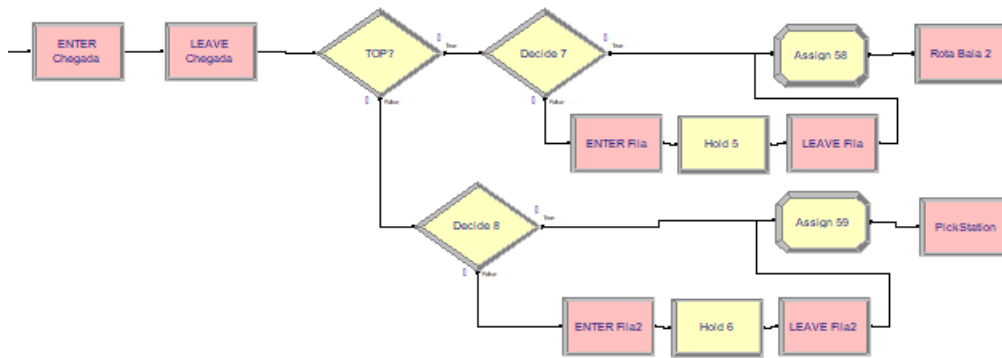


Figura 15 – Modelagem para as filas fora da base de abastecimento. Fonte: Autor

O princípio básico do modelo de filas é o mesmo para as duas modalidades de abastecimento. Nele, o bloco de decisão verifica se existe espaço vago nas baias de abastecimento ou lugar para um caminhão ficar em fila, e, em caso positivo, o caminhão entra imediatamente, registrando-se a sua hora de entrada. Segundo as práticas operacionais, é permitido que no máximo um caminhão tanque fique esperando atrás de cada uma das baias baia, a fim de agilizar o processo nos dias mais cheios. Já em caso negativo, o veículo entra numa fila fora do terminal, onde só será liberado após um sinal, que será dado após a saída de um autotanque de alguma baia. A diferença principal entre os dois mecanismos ocorre no momento de entrada, realizada com o bloco *Route* no caso *top*, e com o módulo *pickstation* para o caso de carregamento *bottom*.

O bloco *Route* contará o tempo de traslado até a baia 2, verificado empiricamente, em campo, como sendo de aproximadamente 1 minuto. Já o módulo *pickstation* selecionará, entre as três baias *bottom*, qual será a escolhida pelo motorista. A figura 16, apresenta a configuração do bloco, onde se definiu como critério a minimização do número de veículos em fila, do número de veículos dirigindo-se à baia em questão, e o número de baias ocupadas. Contando, de forma semelhante ao *route*, o tempo de traslado de 1 minuto. Em outras palavras, ao entrar na base, o condutor escolherá a baia disponível. Estando todas ocupadas, escolherá a que tiver menor fila, e em caso de empate prevalecerá a preferência média dos motoristas, constatada no mapeamento dos processos de carregamento.

Assim, entrando numa baia, inicia-se o processo de carregamento. Na modalidade *top*, a expressão que define o tempo do processo é uma multiplicação da distribuição geral do tempo de um braço *top* pelo número de compartimentos do caminhão. E, para o carregamento *bottom*, a expressão simplesmente aplica a distribuição do tempo geral de carregamento desta mesma modalidade. Assim, o passo seguinte consiste na sinalização para as filas de fora do terminal, da liberação de espaço para mais um caminhão entrar, dando seguimento à última etapa do processo.

O bloco “*ROUTE* Saída” contabiliza a distribuição geral do tempo de saída, es-

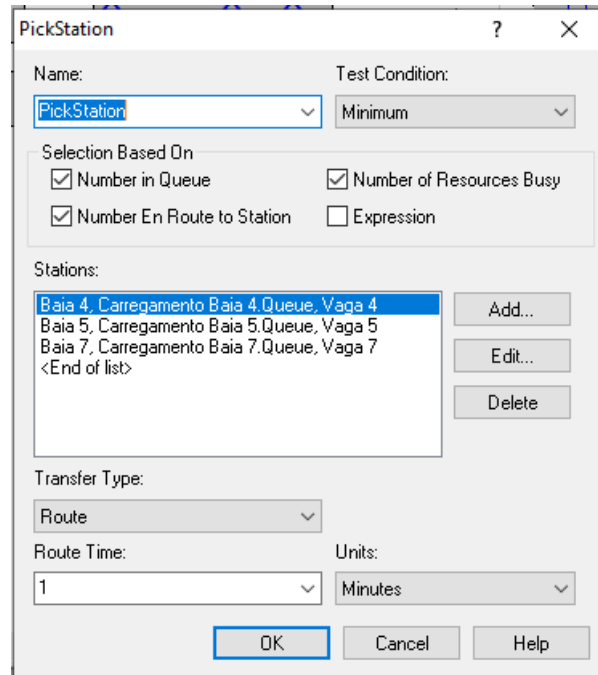


Figura 16 – Configuração do módulo *Pickstation*. Fonte: Autor

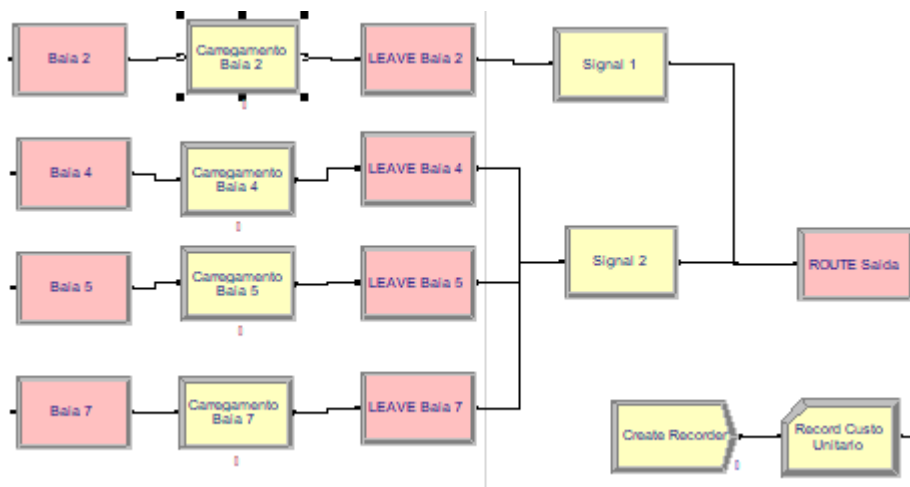


Figura 17 – Modelagem para os processos de carregamento. Fonte: Autor

tudada anteriormente, conduzindo a entidade à saída da base de abastecimento. Os dois últimos blocos que se seguem dedicam-se a registrar o tempo de saída, a fim de calcular o *lead time* total da viagem, e a determinar o volume movimentado com o abastecimento realizado, usando a expressão da distribuição encontrada para volumes de carregamento. Essas duas medidas são de importância fundamental para que o modelo seja capaz de calcular informações relevantes a respeito dos cenários estudados.

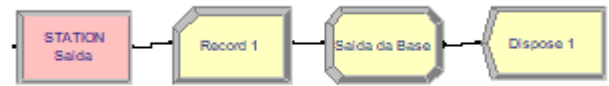


Figura 18 – Modelagem para a saída do terminal. Fonte: Autor

5.3.3 Indicadores do Modelo

Conforme discutido nas seções anteriores, a base de distribuição conta com dois indicadores de desempenho principais, chamados de custo unitário e gate to gate, podendo ser expressas pelas equações 5.1 e 5.2:

$$\text{Custo Unitário} = \frac{\text{OPEX Mensal}}{\frac{\text{Volume Movimentado}}{1000}} \quad (5.1)$$

$$\text{Gate to Gate} = \frac{\sum_{n=1}^n \text{Tempo da Viagem } n}{n} \quad (5.2)$$

O modelo é capaz de monitorar esses indicadores por meio de módulos específicos que registram o tempo das viagens e o volume movimentado mensal. A variável de OPEX mensal, por sua vez, foi extraída dos relatórios mensais da companhia, detalhando os custos operacionais de cada mês no último ano. Com isso, para os fins deste modelo, utilizou-se a média desses valores, resultando num custo unitário aproximado em reais por metro cúbico.

No entanto, mesmo usando essas informações no dia a dia, a equipe do terminal ainda sente dificuldade de medir os ganhos financeiros que podem surgir com a sua eficiência operacional. O motivo disso é que a estimativa do impacto de possíveis investimentos na infraestrutura do terminal está relacionada com muitas variáveis. Mas, com a simulação desses processos num modelo, torna-se possível associar dados gerados nas iterações, e assim chegar numa estimativa de desempenho com confiabilidade e coerência. Nesse sentido, uma nova métrica de custeio foi elaborada, em conjunto com a equipe de supervisão da base, afim de traduzir a eficiência operacional em termos monetários. A equação 5.3 representa o custo incorrido durante um mês de operação, levando em conta o custo unitário e a soma de todo o tempo dedicado ao carregamento, em minutos.

$$\text{Custo Incorrido} = \frac{\text{Custo Unitário} * \sum \text{Tempo de Carregamento}}{\text{Tempo para carregar } 1m^3} \quad (5.3)$$

Para garantir que o resultado da expressão resulte em um valor monetário, incluiu-se como variável o tempo que leva para se carregar $1m^3$. Dessa forma, a equação resulta num quociente cujo numerador está em $\text{min} * \frac{R\$}{m^3}$ e o divisor em $\frac{\text{min}}{m^3}$. Com a divisão, essas

unidades se cancelam, agregando em um único indicador o comportamento do volume (com o custo unitário) e do gate to gate, com o tempo total de carregamento. Essa medida resume a cadeia de valor do terminal, e serve como mais um parâmetro para a tomada de decisão com a avaliação de cenários na simulação.

Outra expressão desenvolvida durante o projeto se dedica a traduzir o uso da capacidade instalada, levando em conta o tempo disponível para operação, a demanda, e os recursos disponíveis. Conforme discutido em seções anteriores, a base de distribuição fecha para carregamentos em horários específicos durante a semana, e possui recursos limitados (como as baias de carregamento). Em outras palavras, existem restrições físicas e temporais que limitam a operação do terminal, e orientam a estimativa da sua capacidade. Assim, a expressão 5.4 calcula em termos percentuais quantas horas de fato tem sido gastas carregando diante de todo o tempo que a instalação tem disponível.

$$Capacidade\ em\ Uso = \frac{Gate\ to\ Gate\ Médio * N^o\ de\ Viagens}{60 * Horas\ disponíveis\ no\ mês * N^o\ de\ Baias} * 100 \quad (5.4)$$

A companhia entende que uma medida ideal de capacidade deve ficar entre 60% e 70%, e que a partir desse ponto são cogitadas obras para ampliação da capacidade das instalações. Com isso, é possível ter uma noção do impacto de alguma mudança no modelo em função da estrutura operacional, de forma que se saiba quando certa situação seria viável ou não.

5.4 Validação

Segundo Law (2019), uma das melhores formas de validar um modelo de simulação é comparando o seu comportamento com a realidade. Se o projeto conseguir espelhar aquilo que ocorre na prática de forma coerente, já passa a ser possível basear as decisões de negócio com os seus resultados. Neste trabalho, muitas simplificações foram feitas no sentido de englobar as variáveis mais importantes do problema de maneira resumida, porque seria muito custoso tratar as situações com um grande detalhamento. A literatura reforça que essa síntese faz parte da própria essência da simulação, e que aumentar muito o detalhamento dos processos pode levar a resultados tendenciosos.

Por essa razão, foram estabelecidos limites para cada variável do modelo, a fim de verificar se o mesmo é capaz de replicar o funcionamento normal da base de distribuição. Os valores retratados foram alterados com um índice, a fim de proteger informações sensíveis da companhia no que diz respeito aos valores absolutos da operação, sem perder, no entanto, a proporcionalidade entre si.

Esses dados foram submetido à apreciação de 6 profissionais que supervisionam as operações da base de distribuição, com experiência de 10 a 20 anos na atividade, a fim

de validar os valores de referência para a comparação do modelo com a realidade. Assim, a figura 19 resume os intervalos considerados pelos supervisores da base como representativos de uma operação mensal normal, em comparação com os resultados obtidos no modelo.

	Valores Esperados	Resultados da Simulação
Viagens	2.250 a 2.610	2.382 Viagens / Mês
Volume Movimentado	45.000 a 54.000	50.535 m³ / Mês
Custo Unitário	3,30 a 3,68	3,57 R\$ / m³
Gate to Gate	28,8 a 31,5	29,0 Minutos
Custo Incorrido	95.150 a 142.450	111.925,16 R\$ / Mês
Capacidade em Uso	60 a 70	64,61 %

Figura 19 – Quadro comparativo dos resultados do modelo básico. Fonte: Autor

Observa-se que, para todas as variáveis de interesse, o modelo é capaz de replicar valores coerentes, respeitando os limites estabelecidos. Como esses resultados foram obtidos com a execução de 1000 iterações de 1 mês de duração, conclui-se que a modelagem concebida é correta e suficiente para os fins deste projeto.

6 Aplicação do Modelo

Uma vez validado, o modelo desenvolvido pode ser usado como referência para a simulação de cenários de interesse, no sentido de apoiar a tomada de decisão da companhia antes de dedicar recursos importantes na execução de obras e investimentos. Para situar a implementação num contexto mais realista possível, procurou-se alinhar essa avaliação com os projetos que estavam sendo estudados pela companhia enquanto o modelo estava sendo criado.

6.1 Adaptação do Modelo

O caso que se apresentou para análise consistiu na estimação do impacto de um braço de carregamento adicional, de S10, na baía 5. Em suma, quais seriam os ganhos operacionais, e financeiros (em termos de redução de custos com a maior eficiência) diante dessa mudança? Além disso, buscou-se entender qual seria a melhor posição em que o braço deveria ser instalado. A figura 20, a seguir, retrata de forma esquemática as duas situações possíveis.

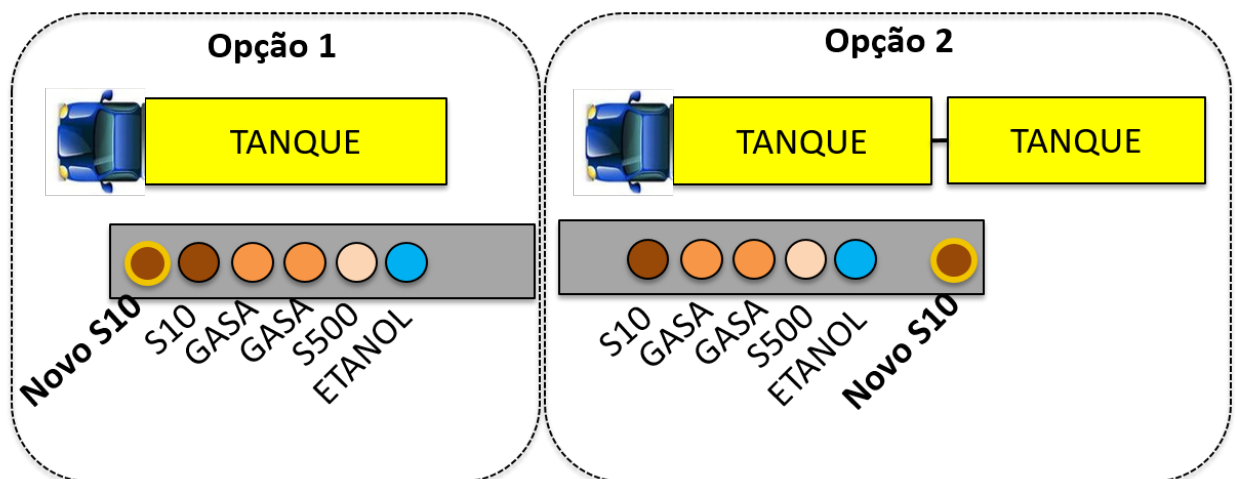


Figura 20 – Esquema das opções de posicionamento para o novo braço de S10. Fonte: Autor

A depender da sua posição, o braço poderá atender somente caminhões com um tanque, ou veículos do tipo bitrem. Portanto, na opção 1, a possibilidade de carregar compartimentos em paralelo com combustível do tipo S10 só ocorrerá para caminhões com uma carreta. Já na opção 2, o benefício ocorrerá somente para os autotanques do tipo bitrem. Deseja-se demonstrar, assim, qual é a melhor alternativa.

O princípio de solução para esse caso se concentra em uma modelagem da expressão de tempo de carregamento na baía 5, utilizando os recursos lógicos fornecidos pela plataforma Arena. Diante da distribuição geral de tempo de carregamento presente no módulo, passa a ser necessário identificar quais são as entidades cujos atributos se qualificam para o uso do novo braço de carregamento em paralelo. Como se conhece o tempo geral de carregamento de um braço *bottom*, essa estimação de economia de tempo consistiria em deduzir essa distribuição da geral, agilizando o processo para o caminhão qualificado. A expressão 6.1 resume esse raciocínio:

$$LOGN(\mu_G, \sigma_G) - ((ODS10 \geq 2) * (ABS(ODS10/2)) * (LOGN(\mu_b, \sigma_b))) \quad (6.1)$$

onde:

μ_G – é a média da distribuição de tempo de carregamento geral.

σ_G – é o desvio padrão da distribuição de tempo de carregamento geral.

μ_b – é a média da distribuição de tempo de um braço de carregamento *bottom*.

σ_b – é o desvio padrão da distribuição de tempo de um braço de carregamento *bottom*.

$ODS10$ – representa a quantidade de compartimentos a serem carregados com S10.

ABS – é a função nativa do Arena que retorna a parte inteira de uma divisão.

$LOGN$ – retorna um número aleatório a partir da distribuição lognormal.

A expressão 6.1 retrata a adaptação feita no módulo de carregamento da baía 5, usando os parâmetros μ_G e σ_G para a distribuição de carregamento geral e μ_b e σ_b para a curva de carregamento de um braço *bottom*. No Arena, as expressões condicionais retornam 0, quando falsas e 1 quando verdadeiras. Assim, caso a entidade apresente dois ou mais compartimentos a serem carregados com S10, ativa-se o efeito de carregamento em paralelo. No entanto, esse desconto só pode ser aplicado para cada par de seções a serem abastecidas com o mesmo produto, e, para isso, será levado em conta a parte inteira da divisão $ODS10/2$.

Assim, para modelar a opção 2, basta incluir um termo condicional adicional, a fim de identificar se a entidade é bitrem. A expressão 6.2 mostra a variável BT como condição necessária a fim de contabilizar o desconto de tempo de carregamento nessa ocasião específica.

$$LOGN(\mu_G, \sigma_G) - ((BT == 1) * ((ODS10 \geq 2) * (ABS(ODS10/2)) * (LOGN(\mu_b, \sigma_b)))) \quad (6.2)$$

onde:

BT – é igual a 1 caso a entidade seja bitrem.

A simulação dos dois cenários foi configurada para representar um mês de operação com 1000 iterações cada uma. Todos os indicadores presentes no modelo original também foram monitorados para as duas opções, agindo, também como referencial para a estimação de redução de custos. Por conseguinte, o capítulo a seguir tratará dos resultados encontrados, verificando a sua pertinência com a realidade das operações.

6.2 Resultados

A figura 21 resume os resultados da simulação para as duas opções, onde se observa uma grande diferença em termos de redução de custos entre a opção 1 e 2. Em que pese o número de caminhões, o volume movimentado e custo unitário terem sido muito parecidos, houve uma melhora substancial em tempo de carregamento na primeira alternativa. Por essa razão, a base foi capaz de utilizar seus recursos de forma mais eficiente, ampliando sua capacidade de atender a uma demanda maior no futuro.

O principal motivo para essa diferença acentuada é a reduzida quantidade de caminhões bitrem em relação ao restante da frota que frequenta o terminal. No momento, esse tipo específico de veículo representa em torno de 5,67% das viagens, no levantamento feito com 4 meses de operação. No entanto, esse resultado não pode ser interpretado como definitivo, uma vez que mudanças contratuais podem vir a modificar o perfil de caminhões que abastecem na base de Brasília.

	Resultados da Opção 1	Resultados da Opção 2
Viagens	2.385 Viagens / Mês	2.383 Viagens / Mês
Volume Movimentado	50.622 m ³ / Mês	50.580 m ³ / Mês
Custo Unitário	3,57 R\$ / m ³	3,57 R\$ / m ³
Gate to Gate	25,34 Minutos	28,8 Minutos
Custo Incorrido	87.439,77 R\$ / Mês	110.588,72 R\$ / Mês
Capacidade em Uso	56,54 %	64,22 %
Redução de Custos	24.248,62 \$ / Mês	1.098,79 \$ / Mês

Figura 21 – Quadro comparativo dos resultados para as opções 1 e 2. Fonte: Autor

Dito isso, ao se levar em conta os resultados da simulação em si, nota-se mais uma vez uma coerência quantitativa, ao não se desviarem muito dos valores originais da base, e qualitativa, no sentido de manterem aderência às relações de causa e efeito entre os indicadores de performance. Além disso, a redução de custo da opção 1 é significativa, e viabiliza os investimentos necessários para a execução da obra.

Este trabalho foi realizado em um terminal de médio porte de uma companhia que opera, atualmente, 64 bases espalhadas pelo Brasil. Cada uma dessas instalações conta com particularidades específicas, variando muito em suas dimensões e orçamento, e a análise detalhada dessa rede foge ao escopo do projeto. Mas, para estimar um impacto

potencial a nível corporativo do emprego do modelo, é possível generalizar os resultados obtidos localmente. Assim, se a opção 1 foi capaz de melhorar a alocação de custos em um determinado percentual, qual seria a melhoria caso isso ocorresse em todas as bases? Novamente, por razões de segurança, não é possível expor a relação entre a redução de custos com o OPEX real da Base de Brasília, no entanto, em valores absolutos, estima-se um impacto global da ordem de R\$ 2.635.041,67 por mês.

7 Conclusão

Este projeto teve como objetivo desenvolver um modelo de simulação para uma base de distribuição de combustíveis em Brasília. Para tanto, delimitou-se como escopo do modelo os processos de carregamento de autotanque, sendo feito um mapeamento desses processos para orientar o levantamento de informações e dados relativos à operação. Em sequência, apoiado em uma análise exploratória e inferencial, foi criado um modelo de simulação com o software Arena, apto a replicar os indicadores de performance do terminal com confiabilidade.

O projeto propiciou uma ferramenta eficaz para a tomada de decisão, levando em consideração todas as características mais relevantes quanto à base de distribuição. O modelo demonstrou ser capaz de descrever as atividades mensais e de estimar impactos de diferentes cenários nos indicadores de performance, mensurando o potencial de redução de custos para a avaliação de investimentos em infraestrutura. Passou a ser possível, então, discutir essas alternativas com maior credibilidade, uma vez que a simulação englobou relações de causa e efeito importantes na cadeia de valor do *downstream*.

Além de descrever com consistência a dinâmica dos indicadores de performance já utilizados pela companhia (*gate to gate* e custo unitário), o projeto propôs uma nova métrica de custeio apta a acompanhar o custo incorrido com as operações ao longo do tempo, e de traduzir o comportamento do OPEX com coerência. Com essa medida, os ganhos com eficiência operacional podem ser expressos em termos monetários, facilitando a gestão e divulgação dos resultados da unidade para a alta gerência.

Longe de representar um modelo final, esta abordagem conta com limitações relacionadas ao seu escopo, visto que a tancagem e os processos de descarga não foram modelados. Além disso, as generalizações feitas na parametrização do modelo limitam a sua aplicabilidade em situações mais específicas. Por esse motivo, sugere-se que as próximas pesquisas se aprofundem na simulação dos processos de descarregamento dos caminhões e vagões, levando em conta os indicadores de performance relativos a essas atividades.

Por fim, o estudo pretendeu contribuir para a academia ao demonstrar de que forma é possível criar um modelo de simulação no cenário de um terminal de distribuição de combustíveis. Nesse diapasão, abordagens semelhantes às descritas neste projeto podem ser replicadas em outras localidades, facilitando o desenvolvimento de novas ferramentas para tomada de decisão, concorrendo para uma gestão mais eficiente em o setor de energia, tão importante para o Brasil.

Referências

- AN, H.; WILHELM, W. E.; SEARCY, S. W. Biofuel and petroleum-based fuel supply chain research: a literature review. *Biomass and Bioenergy*, Elsevier, v. 35, n. 9, p. 3763–3774, 2011. Citado na página 24.
- BALLOU, R. H. *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos-: Logística Empresarial*. [S.l.]: Bookman Editora, 2009. Citado na página 21.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, MCB UP Ltd, 2002. Citado na página 31.
- BILODEAU, N.; VITKUS, P.; POWELL, E. *BPM CBOK Version 3.0*. ABPMP, 2013. ISBN 9781490516592. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=QoT2ngEACAAJ>>. Citado na página 35.
- BOWERSOX, D. J. et al. *Gestão logística da cadeia de suprimentos*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. Citado na página 22.
- BRAILSFORD, S.; CHURILOV, L.; DANGERFIELD, B. *Discrete-event simulation and system dynamics for management decision making*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014. Citado na página 22.
- CAFARO, V. G. et al. Oil-derivatives pipeline logistics using discrete-event simulation. In: IEEE. *Proceedings of the 2010 winter simulation conference*. [S.l.], 2010. p. 2101–2113. Citado na página 25.
- CAUCHICK, P. *Metodologia Científica para Engenharia*. Grupo GEN, 2019. ISBN 9788535290707. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595150805/>>. Citado 4 vezes nas páginas 11, 31, 32 e 37.
- CONN, A. R. et al. A simulation model for improving the maintenance of high cost systems, with application to an offshore oil installation. *Quality and Reliability Engineering International*, Wiley Online Library, v. 26, n. 7, p. 733–748, 2010. Citado na página 25.
- CORNILLIER, F. et al. A heuristic for the multi-period petrol station replenishment problem. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 191, n. 2, p. 295–305, 2008. Citado na página 25.
- FENG, X. et al. A simulation-based approach for assessing seaside infrastructure improvement measures for large marine crude oil terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier, v. 142, p. 102051, 2020. Citado na página 25.
- GREASLEY, A.; EDWARDS, J. S. Enhancing discrete-event simulation with big data analytics: A review. *Journal of the Operational Research Society*, Taylor & Francis, v. 72, n. 2, p. 247–267, 2021. Citado na página 23.

- HECKL, I. et al. Custom simulator for logistic networks in downstream. *Clean Technologies and Environmental Policy*, Springer, v. 12, n. 6, p. 627–634, 2010. Citado na página 25.
- HILLIER, F.; LIEBERMAN, G. *Introdução à Pesquisa Operacional*. AMGH, 2013. ISBN 9788580551198. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=-A88a0-KxQ0C>>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 33.
- LAW, A. M. How to build valid and credible simulation models. In: IEEE. *2019 Winter Simulation Conference (WSC)*. [S.l.], 2019. p. 1402–1414. Citado 5 vezes nas páginas 23, 32, 33, 37 e 49.
- LIMA, C.; RELVAS, S.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. Downstream oil supply chain management: A critical review and future directions. *Computers & Chemical Engineering*, Elsevier, v. 92, p. 78–92, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 24.
- NOVAES, A. *Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição: Estratégia, Operação e Avaliação*. Elsevier, 2007. ISBN 9788535224153. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=TfS9PgAACAAJ>>. Citado na página 21.
- QUINTEROS, M. et al. Optimizing the pipeline planning system at the national oil company. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 277, n. 2, p. 727–739, 2019. Citado na página 25.
- REIS, A.; PITOMBEIRA-NETO, A.; ROLIM, G. Simulation of tank truck loading operations in a fuel distribution terminal. *Int. J. Simul. Model*, v. 16, p. 435–447, 2017. Citado na página 24.
- ROSS, S. *Simulation*. Elsevier Science, 2013. (Knovel Library). ISBN 9780124158252. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=1Dwsyyty3P8C>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 33.
- SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. In: IEEE. *Proceedings of the 2010 winter simulation conference*. [S.l.], 2010. p. 166–183. Citado 3 vezes nas páginas 23, 32 e 33.

Apêndices

APÊNDICE A – Modelo de Carregamento

