



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



MARINA LAGES SILVA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE POLÍTICAS DE ESTOCAGEM EM
UM PÁTIO DE EXPEDIÇÃO INDUSTRIAL**

OURO PRETO - MG
2025

Marina Lages Silva

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE POLÍTICAS DE ESTOCAGEM EM
UM PÁTIO DE EXPEDIÇÃO INDUSTRIAL**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Professor orientador: Dr. Aloísio de Castro Gomes Júnior

**OURO PRETO – MG
2025**



FOLHA DE APROVAÇÃO

Marina Lages Silva

Modelagem e Simulação de Políticas de Estocagem em um Pátio de Expedição Industrial

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Produção

Aprovada em 21 de janeiro de 2026

Membros da banca

Dr. Aloísio de Castro Gomes Júnior - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Helton Cristiano Oliveira e Gomes - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dra. Irce Fernandes Gomes Guimarães - (Universidade Federal de Ouro Preto)

O professor Aloísio de Castro Gomes Júnior , orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 21/01/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Aloísio de Castro Gomes Junior, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/02/2026, às 15:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1052377** e o código CRC **F65E659C**.

À minha família pelo amor, apoio e confiança.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus e ao meu anjo da guarda por manterem minha confiança de que tudo é possível na presença Deles.

Agradeço aos meus pais, grandes mestres e professores, Rita e Dener, que me apresentaram o poder da educação e de sua importância em nossas vidas. Obrigada por serem meu alicerce e por me acompanharem na realização de mais um sonho.

Agradeço aos mestres da UFOP, que me mostraram a beleza da engenharia, em especial ao meu orientador Aloísio e aos professores Américo, Irce e Helton.

Agradeço aos meus familiares, tios, tias, primos e primas, por serem ponto de apoio, amor e muita alegria. É impossível citar todos os nomes daqueles que fazem a diferença em minha vida e que me inspiraram para que eu pudesse chegar até aqui. Em especial, agradeço ao padrinho Juliano, à Clarissa, à Olívia e ao Antônio, por me acolherem em Ouro Preto. Agradeço à tia Denise por estar sempre por perto para aplaudir minhas conquistas. Agradeço aos meus padrinhos e madrinhas, Geciane, Cristiano e Lorenn, por serem referência e por terem me guiado até aqui.

Aos meus avós, por me mostrarem a importância do amor e da fé em tudo o que fazemos na vida.

Agradeço ao meu amor, Leon, por ter sido local de descanso em dias difíceis.

Agradeço às minhas amigas, por estarem sempre comigo, onde quer que eu esteja. À Isabela, por me acompanhar desde os sete anos de idade e por vir até Ouro Preto junto comigo. À Amanda, Ana Clara e Duda, por se fazerem sempre presentes.

Agradeço aos amigos que a UFOP me deu por tornarem meus dias mais felizes.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto, à gloriosa Escola de Minas e à Fundação Gorceix por terem me concedido meu maior bem, o conhecimento.

R E S U M O

O mercado industrial atual é marcado por intensa competitividade. Pequenas variações no valor final de um produto acabado podem determinar sua permanência ou perda de posição no mercado. Nesse contexto, destaca-se a importância das atividades logísticas dentro das indústrias, especialmente o processo de armazenagem de materiais. A empresa objeto deste trabalho é uma indústria produtora de alumina, cujos produtos são comercializados em *big bags* de 1.200 kg. No caso em estudo, os *big bags* são armazenados no pátio de expedição diretamente sobre o piso, em áreas demarcadas, com empilhamento máximo de dois sacos (um sobre o outro). Contudo, a movimentação excessiva desses volumes acarreta em problemas operacionais. Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo determinar a política de estocagem mais adequada para o pátio de expedição, de modo a reduzir o número de movimentações e o tempo de *picking*/carregamento, contribuindo para o aumento da eficiência operacional, a redução de custos e a preservação da integridade do produto. Para isso, foi desenvolvido um modelo de simulação computacional no software FlexSim®, no qual foram comparados cenários alternativos de alocação de produtos considerando distância percorrida pelas empilhadeiras, tempos de carregamento e utilização dos recursos operacionais. Os resultados demonstraram que o cenário baseado em classes por tipo de produto e frequência de movimentação apresentou o melhor desempenho global, com uma redução de 6,89% da distância percorrida pelas empilhadeiras, 2,56% no tempo médio de carregamento e de 23,36% no tempo máximo de carregamento.

Palavras-chave: simulação; armazenagem; políticas de estocagem.

A B S T R A C T

The current industrial market is characterized by intense competitiveness. Small variations in the final value of a finished product can determine its permanence or loss of position in the market. In this context, the importance of logistics activities within industries stands out, especially the material storage process. The company analyzed in this study is an alumina-producing industry, whose products are sold in 1,200 kg big bags. In the case under study, the big bags are stored in the shipping yard directly on the floor, in demarcated areas, with a maximum stacking of two bags, one on top of the other. However, the excessive handling of these loads leads to operational problems. Given this scenario, the objective of this study was to determine the most appropriate storage policy for the shipping yard, in order to reduce the number of handling operations and the picking/loading time, contributing to increased operational efficiency, cost reduction, and preservation of product integrity. To this end, a computer simulation model was developed using FlexSim® software, in which alternative product allocation scenarios were compared considering forklift travel distance, loading times, and utilization of operational resources. The results showed that the scenario based on product classes by type and handling frequency presented the best overall performance.

Keywords: simulation; warehousing; storage policies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução dos estados na Simulação de Eventos Discretos.....	13
Figura 2: Ciclo de Vida de um Projeto de Simulação	16
Figura 3: Atividades de Armazenagem	18
Figura 4: Big Bag	24
Figura 5: Pátio de Expedição.....	25
Figura 6: Diagrama de Ciclo de Atividades do Processo de Armazenagem	30
Figura 7: Modelo 3D	32
Figura 8: Lógica Elaborada no Process Flow	33
Figura 9: Mapa do Pátio de Expedição do Cenário Atual	37
Figura 10: Mapa do Pátio de Armazenagem para o Cenário 3.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Cronograma de Chegada de Caminhões.....	27
Tabela 2: Prévia da Planilha de Produção do Micronizador	28
Tabela 3: Prévia da Planilha de Produção do Moinho de Bolas.....	28
Tabela 4: Prévia da Planilha de Produção da Peneira	29
Tabela 5: Prévia da Planilha de Produção do Secador	29
Tabela 6: Número de Baias por Classe de Produto	36
Tabela 7: Movimentação por Tipo de Produto.....	38
Tabela 8: Número de Baias por Classe de Produto	38
Tabela 9: Resultados dos Cenários Analisados	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	OBJETIVOS	10
1.1.1	OBJETIVO GERAL.....	10
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS	12
2.1.1	DEFINIÇÃO.....	12
2.1.2	NOMENCLATURA.....	14
2.1.3	FASES DE UM ESTUDO DE SIMULAÇÃO.....	15
2.2	GESTÃO DE ARMAZENAGEM.....	17
2.2.1	OPERAÇÕES DE ARMAZENAGEM	18
2.2.2	POLÍTICAS DE ESTOCAGEM	19
2.3	APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO A GESTÃO DE ARMAZENAGEM	21
3	METODOLOGIA.....	24
3.1	CONCEPÇÃO	24
3.1.1	OBJETIVOS E DEFINIÇÃO DO SISTEMA	24
3.1.2	COLETA E TRATAMENTO DE DADOS	25
3.1.3	MODELO CONCEITUAL.....	29
3.2	IMPLEMENTAÇÃO.....	31
3.2.1	MODELO COMPUTACIONAL.....	31
3.2.2	DIMENSIONAMENTO DA SIMULAÇÃO	34
3.2.3	VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1	DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS ANALISADOS	36
4.2	INDICADORES DE DESEMPENHO	39
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	39
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1 INTRODUÇÃO

O mercado industrial atual é marcado por intensa competitividade. Pequenas variações no valor final de um produto acabado podem determinar sua permanência ou perda de posição no mercado. Nesse contexto, destaca-se a importância das atividades logísticas dentro das indústrias, especialmente o processo de armazenagem de materiais.

A armazenagem é o processo logístico responsável por estocar produtos, sejam matérias-primas, produtos em processo ou acabados, entre o ponto de origem e o ponto de consumo, além de fornecer informações sobre a condição e a disposição dos itens armazenados (Lambert, Stock e Ellram, 1998). A gestão eficiente dessa atividade exerce influência direta sobre o valor final do produto, uma vez que, segundo Ballou (2006), os custos logísticos podem representar de 4% a mais de 30% das vendas de uma empresa, o que evidencia a necessidade de aprimoramento contínuo nesta área.

De acordo com Gu *et al.* (2007), dentro do processo de armazenagem existem diversas atividades, sendo a estocagem uma das mais relevantes, pois tem o papel de organizar as mercadorias para maximizar a utilização do espaço e facilitar o manuseio de materiais. Os autores destacam ainda que diferentes políticas de estocagem podem ser adotadas, e a escolha adequada é crucial para o desempenho da etapa seguinte, o *picking*, responsável pela coleta dos produtos em seus locais de estocagem. Quando mal planejada, a política de estocagem impacta negativamente a eficiência dessa operação, que é geralmente reconhecida como a mais onerosa dentro do armazém, por demandar elevado uso de mão de obra ou de capital (Frazelle, 2002). Esse fato reforça o papel da gestão de armazenagem eficiente nos custos logísticos apontados por Ballou (2006).

Os sistemas produtivos e logísticos modernos são caracterizados por sua complexidade. Nesse cenário, diversas ferramentas têm sido utilizadas para apoiar a tomada de decisão, sendo a simulação computacional uma delas. Essa técnica permite analisar o comportamento de sistemas reais por meio de modelos computacionais, oferecendo suporte à avaliação de diferentes cenários operacionais e estratégias de gestão. Conforme Chwif e Medina (2022), a simulação também se aplica ao subsegmento da manufatura denominado logística interna, abrangendo projetos de sistemas de expedição e de movimentação de materiais, contexto no qual se insere o presente estudo.

A empresa objeto deste trabalho é uma indústria produtora de alumina, cujos produtos são comercializados em *big bags* de 1.200 kg. Esses recipientes flexíveis são amplamente utilizados para o transporte e o armazenamento de grandes volumes de materiais sólidos ou pastosos, como grãos, minérios, cimento e produtos químicos. No caso em estudo, os *big bags* são armazenados no pátio de expedição diretamente sobre o piso, em áreas demarcadas, com empilhamento máximo de dois sacos (um sobre o outro). Contudo, a movimentação excessiva desses volumes acarreta dois principais problemas operacionais: (i) aumento do tempo de carregamento dos caminhões, gerando filas e dificuldades de acomodação dos veículos no perímetro da empresa, devido à limitação de espaço e docas; e (ii) risco de avarias nos *big bags*, especialmente rasgos, em razão da fragilidade do material e do manuseio frequente.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo avaliar a política de estocagem mais adequada para o pátio de expedição utilizando simulação computacional, de modo a reduzir o número de movimentações e o tempo de *picking*/carregamento, contribuindo para o aumento da eficiência operacional, a redução de custos e a preservação da integridade do produto.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo deste trabalho é propor a política de alocação de produto acabado mais adequada a um pátio de expedição utilizando simulação computacional.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo principal, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Modelar o processo de armazenagem da empresa no ambiente do *software* FlexSim®, representando as principais atividades e restrições operacionais do sistema real.
- Comparar diferentes políticas de estocagem por meio de cenários simulados, avaliando indicadores de desempenho.
- Analisar os resultados da simulação para identificar a política que proporciona maior eficiência operacional.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco seções principais. A presente introdução exprime o contexto do estudo, o problema de pesquisa, os objetivos e a justificativa do tema. O capítulo 2, referente a revisão bibliográfica, reúne os fundamentos teóricos relacionados à armazenagem, políticas de estocagem e simulação computacional. O capítulo 3 aborda a metodologia, descrevendo os procedimentos adotados para o desenvolvimento do modelo de simulação e para a condução do estudo. O capítulo 4 apresenta a seção de resultados e discussão, revelando as análises obtidas a partir dos cenários simulados e suas interpretações. Por fim, o capítulo 5 contém as considerações finais, o qual sintetiza as conclusões do trabalho e propõem sugestões para estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS

Os sistemas produtivos e logísticos modernos são caracterizados por sua complexidade. Nesse contexto, a simulação computacional é uma importante ferramenta de apoio à tomada de decisão, permitindo a análise do comportamento de sistemas reais por meio de modelos computacionais.

Segundo Banks *et al.* (2004), a simulação é a imitação de um processo ou sistema real ao longo do tempo. Ela envolve a geração de um histórico artificial que permite obter inferências sobre as características operacionais do sistema real. O comportamento desse sistema real é construído a partir de um modelo de simulação, o qual obedece a um conjunto de premissas relativas a operação do sistema.

De acordo com Chwif e Medina (2022), a simulação computacional pode ser dividida em três categorias básicas: Simulação de Monte Carlo, Simulação Contínua e Simulação de Eventos Discretos. Considerando a natureza do sistema analisado neste trabalho, a ênfase será direcionada à Simulação de Eventos Discretos (SED) por ser a mais adequada à modelagem de sistemas nos quais as mudanças de estado ocorrem em pontos específicos no tempo.

2.1.1 DEFINIÇÃO

A Simulação de Eventos Discretos é utilizada para modelar sistemas que mudam o seu estado a partir da ocorrência de eventos em momentos discretos no tempo (Chwif; Medina, 2022). Para exemplificar, os mesmos autores usam o processo de preparar uma xícara de chá, como pode ser visto na Figura 1. O evento (A) consiste em encher a xícara de água quente, o evento (B) na inserção do sachê de chá na água quente e o evento (C) consiste em servir o chá. É possível perceber que cada evento ocorre em instantes determinados de tempo e que a cada ocorrência de um evento, o estado do sistema muda. Como por exemplo, ao passar do evento (A) para o evento (B), a xícara que continha apenas água quente passa a ter também o sachê de chá. Assim, a Simulação de Eventos Discretos é orientada pelos eventos ocorridos no sistema e por isso, o relógio de simulação sempre indica um instante em que um evento acontece.

Figura 1: Evolução dos estados na Simulação de Eventos Discretos



Fonte: adaptado de Chwif e Medina (2022, p. 8)

Ainda segundo os autores Chwif e Medina (2022), a aplicação da simulação em sistemas reais pode ser dividida em dois grandes grupos: serviços e manufatura. Alguns exemplos de aplicações da simulação no contexto de serviços são:

- Portos: a simulação pode ser utilizada para representar a operação portuária, considerando os processos internos, como o carregamento e o descarregamento de navios, bem como a utilização de equipamentos, como guindastes e berços de atracação. Esse tipo de aplicação permite apoiar diversas decisões, como a ampliação de terminais.
- Terminais Logísticos: a simulação possibilita a análise das chegadas e saídas de produtos por diferentes meios de transporte, como o rodoviário e o ferroviário, permitindo obter informações sobre a interação entre esses modais. Dessa forma, apoia decisões relacionadas ao layout do terminal, equipamentos, à quantidade de docas e aos turnos de trabalho.
- Cadeias Logísticas: por meio da simulação, é possível avaliar diferentes estratégias de distribuição e rotas a serem seguidas pelos veículos de transporte.
- Hospitais: a simulação permite a determinação de escalas e turnos de trabalho, bem como o dimensionamento do número de profissionais e a alocação de salas e espaços para procedimentos, com o objetivo de reduzir filas de pacientes e melhorar a qualidade do atendimento.
- Bancos: a aplicação da simulação auxilia na determinação da quantidade adequada de funcionários nos caixas, considerando a demanda real de clientes ao longo do dia, contribuindo para a redução do tempo de espera e para a melhoria do nível de serviço;

- Oficinas de Manutenção: a simulação pode ser utilizada para definir os recursos necessários, como mão de obra e equipamentos, de modo a atender ao tempo máximo de manutenção desejado, reduzindo atrasos e aumentando a produtividade do serviço.

Algumas aplicações referentes ao setor de manufatura são:

- Sistemas de movimentação e armazenagem de materiais: a simulação pode auxiliar na definição do layout e do recurso de transporte mais adequado para determinada operação, como esteiras, empilhadeiras e pontes rolantes;
- Linhas de Montagem: por meio da simulação dos tempos de processo e das paradas de máquinas, é possível identificar gargalos produtivos. Assim, podem ser definidas a velocidade das esteiras, número de operadores e entre outros;
- Sequenciamento da Produção: a simulação permite definir a ordem de fabricação dos pedidos, visando ao cumprimento dos prazos de entrega e à redução do *makespan*.

Deve-se ressaltar que a simulação também pode ser aplicada no subsegmento da manufatura chamado de logística interna (Chwif; Medina, 2022). Projetos de sistemas de expedição e de movimentação interna são exemplos de contextos nos quais a simulação pode ser aplicada, sendo este o foco do presente trabalho.

2.1.2 NOMENCLATURA

A definição da nomenclatura utilizada em um projeto de simulação é fundamental para a compreensão correta da metodologia, uma vez que os conceitos envolvidos na modelagem e simulação de eventos discretos possuem significados específicos. Dito isso, Banks *et al.* (2004) definiram os principais conceitos utilizados em uma SED:

- **Sistema:** conjunto de entidades e recursos que interagem ao longo do tempo para atingir um ou mais objetivos.
- **Modelo:** representação simplificada de um sistema, contendo relações estruturais, lógicas ou matemáticas que descrevem o sistema em termos de estado, entidades e seus atributos, recursos, eventos, atividades e atrasos.
- **Estado do Sistema:** conjunto de variáveis que contém todas as informações necessárias para descrever o sistema a qualquer momento.

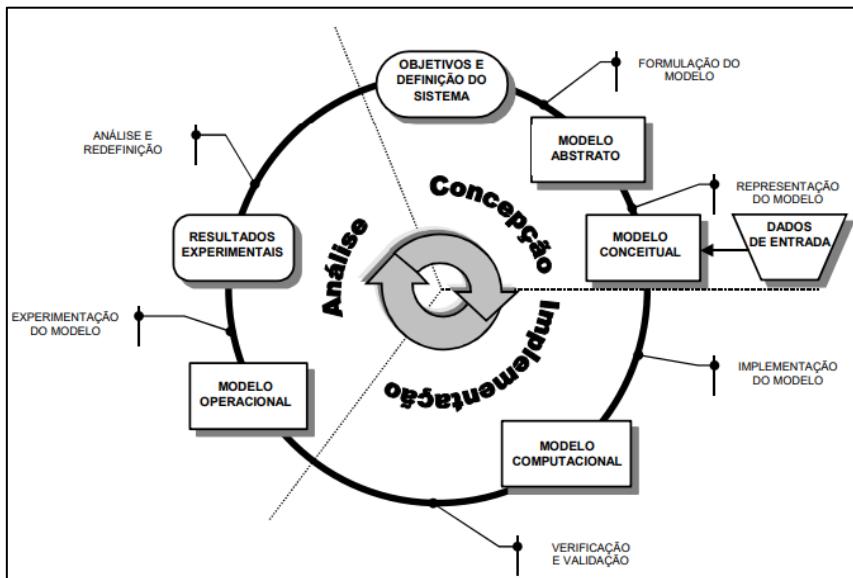
- **Evento:** ocorrência instantânea que altera o estado de um sistema, como por exemplo, a chegada de uma entidade.
- **Entidade:** objeto que circula no sistema interagindo com os demais componentes do modelo, como por exemplo, pessoas, máquinas e produtos.
- **Atributos:** propriedades de uma determinada entidade, como por exemplo, a prioridade de um cliente em espera ou a quantidade de vagões de um trem.
- **Recurso:** o recurso é tido como uma entidade estática que fornece serviços às entidades dinâmicas. Um recurso pode servir uma ou mais entidades dinâmicas ao mesmo tempo ou uma entidade dinâmica pode ser processada com mais de uma unidade de recurso ao mesmo tempo ou com diferentes recursos simultaneamente. Caso uma entidade dinâmica não puder utilizar de um determinado recurso, ela deverá aguardar por ele em uma fila (Freitas Filho, 2008).
- **Fila ou Lista:** coleção de entidades associadas (permanente ou temporariamente), ordenadas de forma lógica, como primeiro a entrar, primeiro a sair; ou último a entrar, primeiro a sair; ou são classificadas por algum atributo da entidade, como prioridade ou data de vencimento.
- **Atividade:** ação de duração específica utilizando-se de entidades e recursos. Como por exemplo, o tempo de atendimento de um cliente (entidade) em um caixa eletrônico (recurso) em um banco. O tempo de duração da atividade pode ser definido por uma distribuição estatística.
- **Tempo Simulado (Real) e Tempo de Simulação:** a relação entre o tempo simulado e o tempo de simulação está vinculado ao tempo do sistema real simulado e ao tempo de simulação necessário à execução de um experimento no computador (Freitas Filho, 2008). O tempo de simulação pode variar de acordo com o tipo de computador utilizado.

2.1.3 FASES DE UM ESTUDO DE SIMULAÇÃO

O desenvolvimento de um estudo de simulação envolve um conjunto de fases estruturadas, cuja finalidade é garantir que o modelo represente adequadamente o sistema real e produza resultados confiáveis (Chwif; Medina, 2022). Segundo autores como Banks *et al.* (2004) e Chwif e Medina (2022), essas etapas orientam desde a formulação do problema até a análise dos resultados, sendo essenciais para o sucesso do projeto de

simulação. Sendo assim, serão descritas as fases de um estudo de simulação de acordo com o modelo proposto por Chwif e Medina (2022), resumido pelo ciclo de vida de uma simulação apresentado na Figura 2.

Figura 2: Ciclo de Vida de um Projeto de Simulação



Fonte: Chwif (1999, p.10)

A construção de um modelo de simulação passa por três grandes etapas: concepção, implementação e análise. A seguir, são apresentados e descritos os principais passos que compõem essas etapas, segundo os autores e conforme ilustrado na Figura 2.

1. Objetivos e Definição do Sistema: dentro da primeira etapa, na concepção, deve-se entender de forma clara o sistema estudado. A partir desse entendimento, devem ser definidos os objetivos a serem atingidos com a simulação. Para que os objetivos possam ser atingidos, também devem ser determinados o nível de detalhamento, o escopo e as hipóteses do modelo.

2. Modelo Abstrato: após a definição dos objetivos, é iniciada a formulação do modelo. O modelo abstrato é uma concepção mental que busca compreender e estruturar os elementos essenciais do sistema real sem ainda se preocupar com a forma de representação ou implementação computacional.

3. Modelo Conceitual: nesse momento, ainda dentro da fase de concepção, é iniciada a representação do modelo. O modelo conceitual formaliza a compreensão obtida no modelo abstrato a partir de técnicas de representação de modelos de simulação. Essa

representação técnica permite a comunicação clara entre todos os envolvidos no projeto, facilitando a verificação, validação e posterior implementação do modelo computacional.

4. Dados de Entrada: a partir da definição do modelo conceitual, os dados de entrada do modelo podem ser coletados. Deve-se ressaltar a importância da qualidade dos dados que irão alimentar o modelo.

5. Modelo Computacional: nesse momento é iniciada a segunda etapa, chamada de implementação, em que o modelo conceitual é convertido em um modelo computacional através de um *software* de simulação ou de uma linguagem de programação. O modelo computacional implementado deve ser contrastado com o modelo conceitual, com o objetivo de verificar se a sua operação está de acordo com o que foi estabelecido na etapa de primeira etapa (concepção). Partindo para a validação do modelo computacional, alguns resultados devem ser gerados para que seja possível avaliar se o modelo é uma representação acurada da realidade (dentro dos objetivos estipulados e com o nível de detalhamento esperado).

6. Modelo Operacional: dá-se início à terceira e última etapa do estudo, denominada etapa de análise. Nessa fase, o modelo computacional previamente validado é convertido em um modelo operacional, que será utilizado para a realização da experimentação. Isso consiste na execução de diversas rodadas de simulação por meio do *software* adotado, permitindo a observação do comportamento do sistema sob diferentes cenários.

7. Resultados Experimentais: nesta etapa, os resultados obtidos por meio da simulação são analisados com o objetivo de gerar conclusões e recomendações pertinentes ao sistema estudado. Caso os resultados não atendam às expectativas ou não sejam satisfatórios, o modelo poderá ser ajustado, reiniciando-se assim o ciclo de simulação.

2.2 GESTÃO DE ARMAZENAGEM

A gestão de armazenagem é uma atividade essencial dentro da cadeia de suprimentos, pois contribui diretamente para a agregação de valor ao produto e ao serviço prestado (Ballou, 2006). A agregação de valor se dá, principalmente, pela minimização dos custos logísticos e pela transferência desses benefícios aos clientes. Ainda conforme Ballou (2006), os custos logísticos podem representar de 4% a mais de 30% das vendas de uma empresa, o que evidencia a necessidade de uma gestão eficiente. Dessa forma, o objetivo

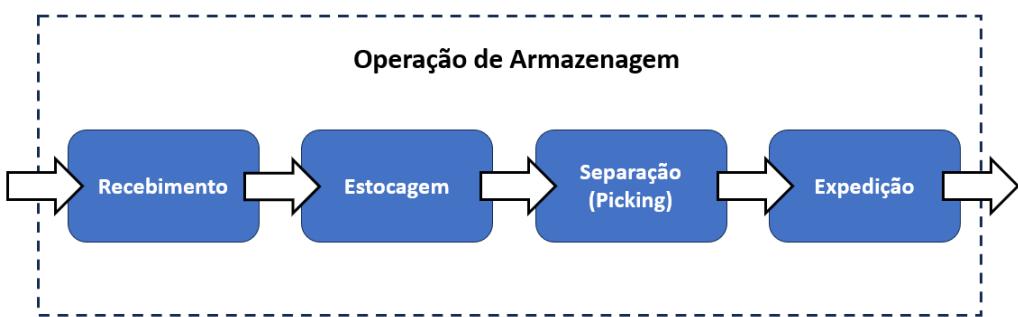
de uma gestão de armazenagem eficiente passa a ser a redução dos custos para atingir o nível de serviço pretendido e a maximização dos lucros.

A armazenagem é o processo logístico que estoca produtos (matérias-primas, produtos em processo e produtos acabados) entre o ponto de origem e o ponto de consumo e fornece informações da condição e disposição dos itens armazenados (Lambert, Stock e Ellram, 1998). O tempo de permanência de mercadorias em um armazém depende dos objetivos da empresa em manter o espaço de armazenagem. Isso porque a estocagem de produtos pode estar relacionada com a sazonalidade do consumo, sazonalidade da produção, variação de preços no mercado e outros tipos de defasagem temporal entre produção e consumo (Alvarenga; Novaes, 2000).

2.2.1 OPERAÇÕES DE ARMAZENAGEM

Segundo Gu *et al.* (2007), há muitos tópicos envolvidos no projeto e na operação de um armazém. Isso porque recursos como espaço, mão de obra e equipamentos precisam ser alocados entre as diferentes atividades do armazém e cada atividade precisa ser implementada, operada e coordenada para atender aos requisitos do sistema em termos de capacidade, produtividade e serviço ao menor custo de recursos (Gu *et al.*, 2007). Para isso, os mesmos autores definiram quais são as atividades chave envolvidas na operação de um armazém, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3: Atividades de Armazenagem



Fonte: Adaptado de Gu *et al.* (2007 p. 2)

Recebimento: é a interface do armazém para o fluxo de entrada de materiais. As etapas de identificação, análise de documentos fiscais, inspeção de qualidade e registro podem ser integradas a essa atividade (Gu *et al.*, 2007).

Estocagem: após o recebimento dos materiais é necessário que eles sejam alocados ao local designado para sua estocagem, por isso essa atividade se preocupa com a organização das mercadorias mantidas no armazém a fim de alcançar alta utilização do espaço e facilitar o manuseio eficiente de materiais. A atribuição do local de armazenamento tem impacto significativo na capacidade de armazenamento, no rastreamento de estoque e na separação de pedidos. Além disso, diferentes políticas de estocagem podem ser utilizadas, como armazenamento aleatório, baseado em classes e dedicado (Gu *et al.*, 2007).

Separação (picking): é o processo de coleta dos produtos em seu local de estocagem conforme os pedidos dos clientes. Essa é uma atividade de grande importância na operação de um armazém já que a separação de pedidos é geralmente reconhecida como a operação de armazenagem mais cara, pois tende a ser muito intensiva em mão de obra ou em capital (Frazelle, 2002).

Expedição: após a separação dos produtos, é a interface do armazém para o fluxo de saída de materiais com destino aos clientes. As etapas de embalagem, verificação e geração de documentos de fiscais podem ser integradas a essa atividade (Gu *et al.*, 2007).

2.2.2 POLÍTICAS DE ESTOCAGEM

Como o objetivo deste trabalho é identificar a melhor política de alocação de produto acabado, também conhecido como o problema de atribuição de local de armazenamento (*Storage Location Assignment Problem – SLAP*), nesta seção apresenta-se algumas das estratégias descritas na literatura.

Como dito no tópico anterior, Gu *et al.* (2007) citam as três principais formas de alocação de produtos em um armazém, sendo de forma aleatória, baseado em classes ou dedicado. A alocação baseada em classes é realizada utilizando as características do produto, como por exemplo, tamanho, peso, taxa de demanda e valor monetário. A localização de um item dentro da área designada a sua classe é geralmente feita usando alguma regra simples, como o local mais próximo, ou aleatoriamente. Entretanto, se o número de classes for igual ao número de produtos, essa política é chamada de Armazenamento Dedicado e se o número de classes for igual a um, é chamado de Armazenamento Aleatório. Sendo assim, o Armazenamento Baseado em Classes pode ter qualquer número

de classes de armazenamento, variando de duas até o número de produtos menos um. Ainda Gu *et al.* (2007), são comumente usadas em operações de depósito duas a cinco classes de armazenamento.

Diferentes critérios podem ser usados para atribuir uma classe a locais de armazenamento. Os três critérios mais frequentemente usados segundo Gu *et al.* (2007) são:

- **Popularidade:** é dada pelo número de operações de armazenamento dividida pelo número de requisições por unidade de tempo. Na política de popularidade, as classes de produtos são divididas por popularidade decrescente, sendo as classes com maior popularidade atribuídas aos locais mais desejáveis.
- **Estoque máximo:** é dado pelo espaço máximo de armazenamento alocado a uma classe de produto. Na política de estoque máximo, as classes de produtos são divididas por estoque máximo crescente e as classes com menor estoque máximo são atribuídas aos locais mais desejáveis.
- **Índice de Cubos por Pedido (COI):** é dada pela razão entre o espaço máximo de armazenamento alocado e o número de operações de armazenamento/requisições por unidade de tempo. Essa política leva em consideração tanto a popularidade quanto sua necessidade de espaço de armazenamento. As classes de produtos são divididas por valor crescente de COI e as classes com o menor COI são armazenadas nos locais mais desejáveis.

Outra importante e frequente forma utilizada para agrupar produtos em classes num armazém é dada pela curva ABC. Segundo Ballou (2006), ela baseia-se no conceito 80-20 do Princípio de Pareto que indica que 80% da receita gerada pelos produtos armazenados provêm de apenas 20% das diferentes mercadorias armazenadas.

Os itens são divididos em três categorias: Classes A, B e C. A Classe A é composta por produtos que compõem o maior valor do estoque, embora correspondam a uma pequena porcentagem do total de itens. Em contraste, a Classe C é composta por produtos que possuem o menor valor do estoque, mas que representam a maior porcentagem do total de itens. Já a Classe B é dada pelos itens de valor intermediário.

Portanto, essa classificação de produtos proporciona um esquema baseado na atividade de vendas, para determinar quais produtos receberão diferentes níveis de tratamento logístico (Ballou, 2006).

2.3 APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO A GESTÃO DE ARMAZENAGEM

A simulação computacional tem se consolidado como uma ferramenta eficaz no apoio à tomada de decisão em sistemas logísticos complexos. Na gestão de armazenagem, seu uso permite representar e analisar, de forma detalhada, o comportamento de processos como recebimento, estocagem, separação e expedição de produtos. Por meio da modelagem de cenários realistas, é possível identificar gargalos, testar diferentes políticas operacionais e avaliar o impacto de mudanças antes de sua implementação no ambiente real. Diversos estudos na literatura demonstram a eficácia da simulação na análise de operações de armazenagem. A seguir, são apresentados alguns exemplos relevantes.

Mendes, Correia e Tozi (2012) aplicaram a metodologia de simulação para avaliar a qualidade e a produtividade dos sistemas logísticos do terminal de cargas (TECA) de importação do Aeroporto Internacional de Campinas/Viracopos. A modelagem do sistema logístico foi realizada por meio do software ARENA. A simulação indicou que mudanças na velocidade das esteiras de armazenagem e a adoção da estratégia de armazenagem por popularidade poderiam proporcionar melhorias significativas nos indicadores de tempo de espera na entrada e saída, no tempo total de armazenagem e na produtividade das operações de armazenagem.

Silva e Scarpin (2017) combinaram a curva ABC de movimentação de produtos com a simulação computacional das operações logísticas em um centro de distribuição (CD). Utilizando o software SIMUL8®, os autores simularam os processos de movimentação, armazenagem e *picking*, propondo melhorias baseadas no giro dos produtos para definir a melhor posição no armazém para cada classe de produto. O estudo também abordou a atuação dos funcionários, com alterações nas regras operacionais que regem as atividades do *picking*. O novo cenário de alocação de produtos simulado pelos autores gerou ganhos de 11% na quantidade de caixas separadas sem aumentar a quantidade de funcionários do armazém, além de diminuir a quantidade de *pallets* utilizados.

Em estudo mais recente, Paula, Carvalho e Silva (2025) investigaram os processos de *picking* de uma empresa varejista por meio de um modelo de simulação que integrou simulação de eventos discretos e simulação baseada em atividades. O modelo foi construído no ambiente do software Anylogic®. Nele, foi possível representar simultaneamente os fluxos de materiais, o deslocamento dos operadores e os efeitos de congestionamento. Diferentes cenários de layout e processos foram testados, sendo os

resultados validados por meio de indicadores reais de produtividade. Os autores observaram que o aumento da produtividade do *picking* depende do equilíbrio entre a redução da distância percorrida e o controle do congestionamento,

Outro exemplo relevante é apresentado por Cassel *et al.* (2002), que descreve a aplicação da simulação computacional no planejamento logístico interno de uma nova unidade de fabricação de móveis. O estudo utilizou o software *eM-Plant Simple++®* para modelar os fluxos físicos e lógicos do processo, considerando restrições, limites e objetivos específicos do projeto. A partir disso, foram simulados diversos cenários com diferentes métodos de manuseio e políticas de alocação de materiais. Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade e a utilidade da simulação como ferramenta de apoio à tomada de decisão em contextos logísticos complexos da manufatura.

Tinelli (2013) também aplicou a simulação computacional na gestão da armazenagem. O projeto teve como objetivo identificar a melhor técnica de alocação de produtos no armazém, comparando três estratégias: alocação aleatória, alocação baseada na classificação ABC e alocação com a ferramenta multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*). A abordagem foi implementada em linguagem C e envolveu a simulação de 1620 tarefas logísticas, como carregamento e descarregamento de mercadorias, com foco no fluxo de entrada e saída de produtos do armazém. Os resultados demonstraram a viabilidade e eficiência do sistema simulado, evidenciada pela redução de distâncias percorridas e do tempo de atendimento. A alocação pelo método ABC resultou em reduções de 8,42% na distância percorrida e 8,43% no tempo de execução das tarefas. Já o uso do AHP proporcionou ganhos ainda maiores, com reduções de 12,81% e 13,47%, respectivamente. O estudo concluiu que o uso de técnicas de alocação otimizadas, aliadas à simulação, contribui significativamente para o desempenho logístico, especialmente em cenários com alto volume de operações.

Mais recentemente, a simulação também passou a ser empregada em análises voltadas à sustentabilidade e à eficiência energética em armazéns. Cannava *et al.* (2025) utilizaram da premissa de que agora a armazenagem desempenha um papel essencial na jornada de descarbonização. Por isso, afim de preencher as lacunas existentes na literatura acerca desse tema, foi desenvolvida uma estrutura baseada em simulação e sua aplicação em um caso empresarial industrial real. Os resultados da simulação demonstraram que as fontes de energia renovável são capazes de reduzir o impacto ambiental e ainda manter um alto desempenho econômico. Em contrapartida, a adoção de um sistema de armazenamento

de energia por bateria melhora o consumo energético, porém com implicações negativas para os indicadores econômicos.

De forma complementar, Alasmari *et al.* (2025) utilizaram a simulação para compreender as operações de um armazém e identificar oportunidades de implementação de uma cadeia de suprimentos circular. O modelo foi construído e validado com dados reais, sendo posteriormente refinado com metodologias de manufatura enxuta, como o mapeamento do fluxo de valor. Os resultados indicaram que a terceirização das atividades de reciclagem pode gerar maior eficiência operacional, promovendo melhor fluidez do sistema e apoiando os princípios da economia circular.

Por fim, Rizqi, Chou e Cahyo (2024) propuseram o conceito de gêmeo digital baseado em simulação para armazéns inteligentes, fundamentado na arquitetura *Asset Administration Shell*. O modelo foi aplicado a um armazém no contexto da Indústria 4.0, integrando ativos como veículos guiados automaticamente, operadores, esteiras, empilhadeiras e estantes de armazenagem. Utilizando o software FlexSim®, foi possível realizar o monitoramento dinâmico das operações, além da simulação e otimização em tempo real. O estudo destaca o potencial dessa abordagem para a padronização e integração de sistemas digitais, ampliando as possibilidades de controle e tomada de decisão em ambientes logísticos complexos.

Portanto, os exemplos apresentados evidenciam que a simulação computacional possui ampla aplicabilidade na gestão da armazenagem, abrangendo desde a definição de políticas de alocação, layout e produtividade operacional até aspectos relacionados à sustentabilidade, eficiência energética e integração com tecnologias da Indústria 4.0. Assim, este trabalho propõe o uso da simulação computacional para avaliar diferentes políticas de alocação de produtos acabados, contribuindo com a literatura ao considerar a estocagem de produtos especiais como os *bags* de alumina.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os procedimentos metodológicos adotados para o cumprimento dos objetivos deste estudo. O desenvolvimento da pesquisa seguiu etapas sucessivas, iniciando-se pela caracterização do objeto de estudo e culminando na análise dos resultados provenientes do modelo de simulação computacional, de acordo com a metodologia proposta por Chwif e Medina (2022).

3.1 CONCEPÇÃO

3.1.1 OBJETIVOS E DEFINIÇÃO DO SISTEMA

A empresa objeto deste estudo é uma indústria de produção de alumina. Seus produtos são comercializados em *big bags* com capacidade de 1200 kg, conforme ilustrado na Figura 4, e atendem a especificações distintas de acordo com a demanda de cada cliente.

Figura 4: Big Bag

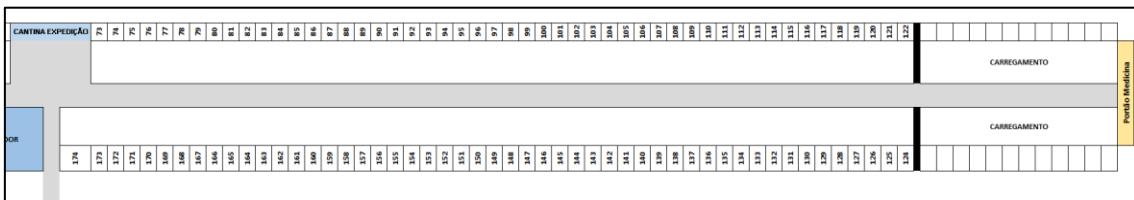


Fonte: Dados fornecidos pela empresa estudada (2025)

Os *big bags* são armazenados no pátio de expedição diretamente sobre o piso, em áreas demarcadas, com possibilidade de empilhamento máximo de dois sacos (um sobre o outro). O layout do pátio de expedição do sistema estudado pode ser visto na Figura 5, as áreas demarcadas citadas anteriormente estão numeradas de 73 até 174. No entanto, a

alocação dos materiais nesse espaço tem se mostrado ineficiente, uma vez que os *bags* requisitados frequentemente estão obstruídos por unidades destinadas a outros clientes ou distantes da doca, onde ocorre o carregamento.

Figura 5: Pátio de Expedição



Fonte: Dados fornecidos pela empresa estudada (2025)

Essa movimentação excessiva implica em dois principais problemas operacionais: (i) aumento no tempo de carregamento dos caminhões, o que gera filas e dificuldade de acomodação dos veículos dentro do perímetro da empresa devido à limitação de espaço e docas; e (ii) risco de avarias nos *big bags*, especialmente rasgos, dada a natureza frágil do material e o manuseio frequente.

Diante desse cenário, este trabalho busca determinar a política de estocagem mais adequada para o pátio de expedição, com o objetivo de reduzir o número de movimentações e o tempo de *picking*/carregamento, contribuindo para o aumento da eficiência operacional, redução de custos e preservação da integridade do produto.

De acordo com a estrutura operacional proposta por Gu *et al.* (2007), a operação de armazenagem envolve um conjunto de atividades interdependentes, entre as quais se destacam o recebimento, a estocagem, a separação e a expedição. Dentre essas, a etapa de estocagem exerce influência direta sobre o desempenho das demais, uma vez que sua configuração determina o fluxo de movimentações internas, o tempo de acesso aos produtos e o nível de utilização dos recursos. Nesse contexto, para avaliar o impacto de diferentes políticas de estocagem sobre o desempenho global do sistema, será realizada a simulação de eventos discretos da operação de armazenagem, permitindo reproduzir o comportamento real das atividades e identificar a alternativa que melhor se adequa às características do pátio de expedição estudado.

3.1.2 COLETA E TRATAMENTO DE DADOS

O modelo conceitual indicou a obtenção de duas principais bases de dados. A primeira relacionada aos dados de expedição e carregamento de *big bags* e a segunda referente aos

dados de produção de produtos acabados direcionados ao pátio de expedição. Sendo assim, os dados utilizados neste estudo foram obtidos diretamente com a empresa objeto de estudo deste trabalho, provenientes de sistemas de informação internos.

3.1.2.1 DADOS DE EXPEDIÇÃO E CARREGAMENTO

Para os dados de carregamento, foram obtidas as seguintes informações: tipo de produto expedido, data, horário inicial de carregamento e a respectiva quantidade de *big bags*, como pode ser visto na Tabela 1. Deve-se citar que cada linha da tabela corresponde a chegada de 1 caminhão à planta empresarial. A base de dados analisada corresponde ao período de 5 de agosto de 2025 até 15 de agosto de 2025. Deve-se ressaltar que no período de tempo analisado foram realizados 42 carregamentos de 13 diferentes tipos de produto e com a movimentação de 775 *big bags* ou 930 toneladas de material. Dessa forma, foi inserido no modelo computacional a tabela mencionada para controlar a chegada de caminhões no sistema.

3.1.2.2 DADOS DE PRODUÇÃO

Os dados de produção utilizados neste trabalho foram limitados aos produtos expedidos entre as datas de 5 até 15 de agosto de 2025. Os produtos enviados aos clientes finais neste período de tempo especificado são provenientes de 4 diferentes tipos de maquinários utilizados na planta operacional. Dessa forma foram obtidas as planilhas de produção dos seguintes maquinários: Micronizador, Moinho de Bolas, Peneira e Secador. A seguir tem-se os tipos de produtos produzidos por cada maquinário. Deve-se ressaltar que os nomes dos produtos foram preservados e substituídos por uma numeração própria.

- Micronizador: Tipo 8 e Tipo 9.
- Moinho de Bolas: Tipo 7, Tipo 10, Tipo 11, Tipo 12 e Tipo 13.
- Peneira: Tipo 1, Tipo 4, Tipo 5 e Tipo 6.
- Secador: Tipo 2 e Tipo 3.

A partir destas bases de dados foi possível obter o intervalo entre chegadas de *big bags* ao pátio de expedição e a respectiva capacidade diária dos maquinários. Após a obtenção desta capacidade foi feito um sequenciamento para trás por se tratar de uma operação de produção sob demanda. Ou seja, o planejamento começa pela data de entrega e calcula para trás para determinar quando a produção deve ser iniciada.

Tabela 1: Cronograma de Chegada de Caminhões

TIPO DE PRODUTO	DATA	HORA INÍCIO	TOTAL BAGS/PALLET
13	05/ago	08:10	7
13	05/ago	11:15	20
7	05/ago	12:15	25
3	05/ago	15:22	20
2	05/ago	16:30	25
2	05/ago	18:10	20
2	05/ago	20:45	25
2	06/ago	08:33	34
12	06/ago	09:20	14
6	06/ago	11:45	12
8	07/ago	09:00	11
5	07/ago	10:50	40
8	07/ago	13:03	20
6	07/ago	16:30	6
10	08/ago	08:30	5
6	08/ago	09:04	2
8	08/ago	09:50	20
8	08/ago	10:30	20
1	08/ago	14:00	20
2	08/ago	15:10	34
2	08/ago	17:10	10
13	08/ago	17:56	20
13	11/ago	18:00	7
8	11/ago	18:43	20
8	11/ago	19:58	1
2	12/ago	09:07	20
9	12/ago	13:50	20
4	12/ago	14:58	1
6	12/ago	15:44	10
12	12/ago	16:33	9
11	12/ago	21:26	20
2	13/ago	14:30	30
2	13/ago	18:00	30
2	14/ago	10:54	30
10	14/ago	11:42	15
6	14/ago	15:30	5
2	14/ago	16:22	34
5	14/ago	18:09	40
2	15/ago	10:42	28
8	15/ago	11:26	20
6	15/ago	18:03	10
8	15/ago	21:00	15

Fonte: Elaborado pela autora com base em dados da empresa estudada (2025)

Assim, foram geradas 4 planilhas de sequenciamento de produção para os 4 maquinários, contendo o horário da chegada do produto acabado e tipo de produto produzido. Prévias destas planilhas podem ser vistas nas Tabelas 2, 3, 4 e 5, referentes ao Micronizador, Moinho de Bolas, Peneira e Secador, respectivamente. Estas planilhas foram inseridas no modelo computacional a fim de controlar a chegada de produtos acabados ao pátio de expedição.

Tabela 2: Prévia da Planilha de Produção do Micronizador

Data	Tipo
23/07/2025 17:00	8
23/07/2025 20:25	8
23/07/2025 23:51	8
24/07/2025 03:17	8
24/07/2025 06:43	8
24/07/2025 10:09	8
24/07/2025 13:34	8
24/07/2025 17:00	8
24/07/2025 20:26	8

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 3: Prévia da Planilha de Produção do Moinho de Bolas

Data	Tipo
30/07/2025 10:20	13
30/07/2025 13:00	13
30/07/2025 15:40	13
30/07/2025 18:20	13
30/07/2025 21:00	13
30/07/2025 23:41	13
31/07/2025 02:21	13
30/07/2025 17:02	13
30/07/2025 19:42	13

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 4: Prévia da Planilha de Produção da Peneira

Data	Tipo
07/08/2025 16:10	6
07/08/2025 17:12	6
07/08/2025 18:14	6
07/08/2025 19:17	6
07/08/2025 20:19	6
07/08/2025 21:22	6
07/08/2025 22:24	6
07/08/2025 23:26	6
08/08/2025 00:29	6

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 5: Prévia da Planilha de Produção do Secador

Data	Tipo
09/07/2025 14:00	3
09/07/2025 16:30	3
09/07/2025 19:00	3
09/07/2025 21:30	3
10/07/2025 00:00	3
10/07/2025 02:30	3
10/07/2025 05:00	3
10/07/2025 07:30	3
10/07/2025 10:00	3

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

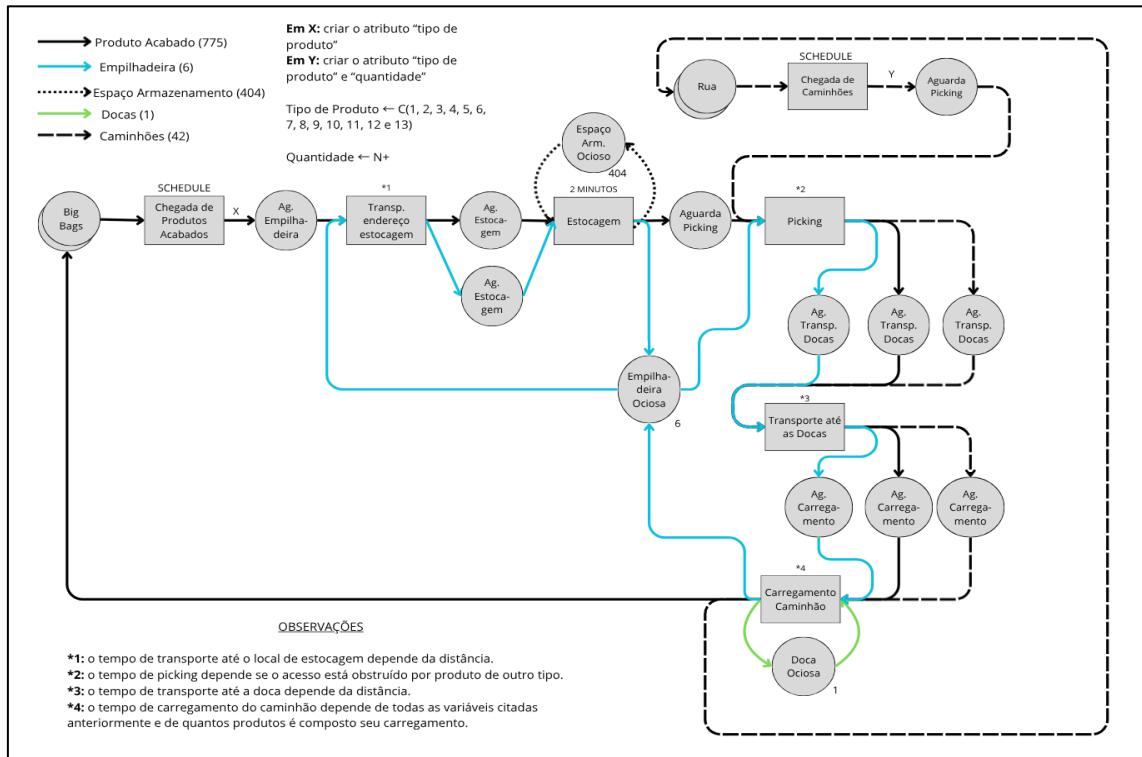
Ressalta-se que, por se tratar de um sistema produtivo do tipo *make to order* (sob encomenda), não foi viável utilizar distribuições de probabilidade no modelo computacional. A adoção dessa abordagem poderia resultar na chegada de caminhões para carregar produtos cuja produção ainda não teria sido concluída.

3.1.3 MODELO CONCEITUAL

Para a definição do modelo conceitual, utilizou-se a ferramenta de representação denominada Diagrama de Ciclo de Atividades (DCA). Essa ferramenta permite a representação gráfica do modelo de simulação, evidenciando as interações entre as diferentes entidades que compõem o sistema e sua participação nas atividades realizadas.

Os elementos básicos que constituem um DCA são as entidades, que englobam tanto os recursos quanto às entidades em processamento, as filas, que sempre antecedem uma atividade e são exclusivas para cada tipo de entidade, e as atividades, que representam os tempos de processamento do sistema. Assim, o processo de armazenagem é caracterizado a partir da identificação de seus principais componentes e de suas relações, conforme apresentado na descrição e no Diagrama de Ciclo de Atividades ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Diagrama de Ciclo de Atividades do Processo de Armazenagem



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

O processo de armazenagem ocorre no pátio de expedição. Os produtos acabados, ao saírem da linha de produção, solicitam transporte por meio de uma das seis empilhadeiras disponíveis. Cada empilhadeira leva o produto até a área de estocagem, composta por 101 baias demarcadas no piso, com capacidade para quatro *big bags* por baia, totalizando 404 espaços de armazenagem. Cada empilhadeira consegue transportar apenas um *big bag* por vez. Os produtos permanecem estocados até que um caminhão chegue e requisite determinado tipo e quantidade de produto. Nesse momento, uma das empilhadeiras disponíveis é acionada para retirar o material do local de estocagem e transportá-lo até a única doca existente, onde ocorre o carregamento conforme a solicitação.

Dessa forma, os componentes do sistema ficaram definidos da seguinte maneira:

- Entidades: produtos acabados (*big bags*) e caminhões;
- Atributos: tipo de produto e quantidade requisitada;
- Recursos: espaço de estocagem, empilhadeiras e doca;
- Atividades: transporte até o endereço de estocagem, estocagem, *picking*, transporte até as docas e carregamento.
- Premissas: fixou-se que em 20% dos casos de *picking*, o *big bag* requerido esteja obstruído por um *big bag* de um diferente tipo de produto acima dele, nestes casos foi adicionado um tempo extra (4 minutos) de movimentação de materiais; velocidade máxima das empilhadeiras 20 km/h.

3.2 IMPLEMENTAÇÃO

3.2.1 MODELO COMPUTACIONAL

O modelo computacional foi desenvolvido no *software* FlexSim®, com base no DCA do sistema, considerando as premissas e os dados previamente ajustados. O desenvolvimento foi dividido em dois módulos: no *Model 3D*, foram implementadas as rotinas de recebimento e estocagem de produtos; enquanto as atividades de *picking* e expedição foram elaboradas no *Process Flow*, de forma integrada ao *Model 3D*, devido à maior complexidade dessas lógicas. A seguir serão apresentadas as modelagens no *Model 3D* e no *Process Flow*.

A modelagem final do Model 3D pode ser visualizada na Figura 7, na qual foram inseridas letras para facilitar a identificação e a descrição dos objetos utilizados na modelagem.

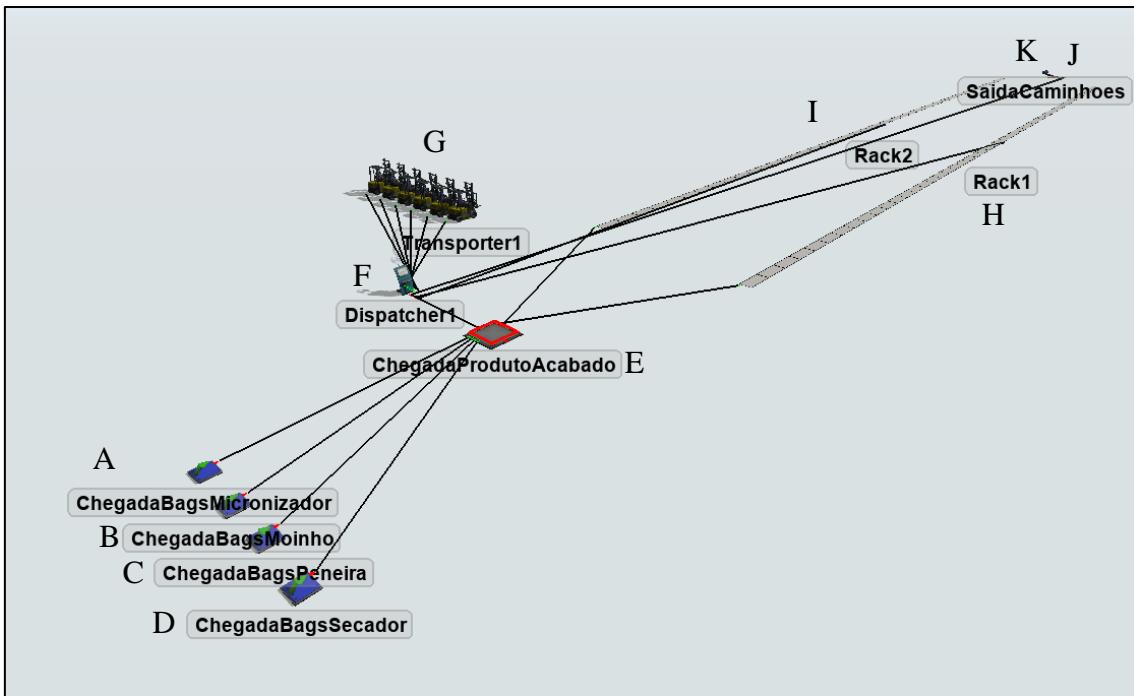
Itens A, B, C, D: objetos do tipo *Source* utilizados para configurar a chegada de produtos acabados provenientes dos 4 maquinários e onde foram inseridas as planilhas de produção apresentadas anteriormente e determinados os respectivos atributos.

Item E: objeto do tipo *Queue*, local onde os *big bags* aguardam transporte para o local de estocagem.

Item F: objeto do tipo *Dispatcher*, utilizado para repassar as requisições de transporte as empilhadeiras.

Item G: conjunto de 6 empilhadeiras.

Figura 7: Modelo 3D



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Itens H e I: objetos do tipo *Rack* configurados como *Floor Storage*, onde é feita a estocagem dos *big bags* e determinada a política de estocagem a ser seguida.

Item J: objeto do tipo *Queue*, utilizado para representar a doca e para onde os produtos acabados são levados quando há solicitação de expedição/carregamento.

Item K: objeto do tipo *Sink*, utilizado para que os produtos já expedidos saiam do sistema.

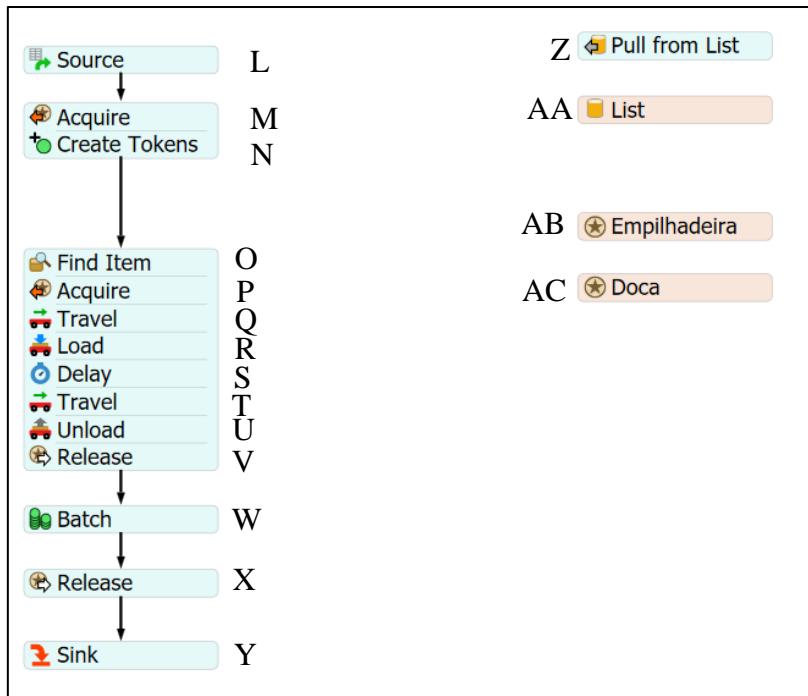
A modelagem final do *Process Flow* pode ser visualizada na Figura 8, na qual foram inseridas letras para facilitar a identificação e a descrição dos objetos utilizados na modelagem.

Item L: objeto do tipo *Source*, utilizado para configurar a chegada de caminhões ao sistema e determinar seus atributos.

Item M: objeto tipo *Acquire*, utilizado para requisitar e ocupar a doca no momento de chegada de um caminhão para a realização do carregamento.

Item N: objeto do tipo *Create Tokens*, utilizado para multiplicar o *token* gerado pelo *Source* pelo número de produtos que o caminhão requisitou. Um *token* é um objeto básico da lógica do FlexSim®, ele é análogo aos objetos movimentados no fluxo 3D, representando lógica de controle e não só fluxo físico (Greenwood, 2020).

Figura 8: Lógica Elaborada no Process Flow



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Item O: objeto do tipo *Find Item*, o qual procura no sistema de armazenagem (*Racks*) o produto requisitado pelo caminhão.

Item P: objeto do tipo *Acquire*, utilizado para requisitar, ocupar e indicar a empilhadeira o local em que o produto requisitado pelo caminhão foi encontrado.

Item Q: objeto tipo do *Travel*, o qual indica que a empilhadeira deve viajar até ao local em que o produto foi encontrado.

Item R: objeto do tipo *Load*, o qual indica que a empilhadeira deve carregar o produto requisitado.

Item S: objeto do tipo *Delay*, utilizado para adicionar tempo de movimentação aos produtos com acesso obstruído por outros tipos de produtos.

Item T: objeto tipo do *Travel*, o qual indica que a empilhadeira deve viajar até a doca do *Model 3D*.

Item U: objeto do tipo *Unload*, o qual indica que a empilhadeira deve descarregar o produto na doca do Model 3D.

Item V: objeto do tipo *Release*, utilizado para desocupar a empilhadeira.

Item W: objeto do tipo *Batch*, utilizado para agrupar os *tokens* de requisição e liberar após a chegada da quantidade requisitada pelo caminhão.

Item X: objeto do tipo *Release*, utilizado para desocupar a doca.

Item Y: objeto do tipo *Sink*, utilizado para que o caminhão saia do sistema após completado o carregamento.

Item Z: objeto do tipo *Pull from List*, o qual retira da lista do *software* os produtos que saírem do sistema de armazenamento.

Item AA: objeto do tipo *List*, o qual representa a lista do *software* que armazena os produtos estocados em sistemas de armazenamento.

Item AB: objeto do tipo *Resource*, utilizado para conectar as empiladeiras do Model 3D as tarefas criadas do *Process Flow*.

Item AC: objeto do tipo *Resource*, utilizado para criar o recurso doca e determinar sua capacidade.

3.2.2 DIMENSIONAMENTO DA SIMULAÇÃO

Considerando que o modelo foi desenvolvido com dados determinísticos, sem a utilização de distribuições de probabilidade, o comportamento do sistema torna-se totalmente previsível a cada execução. Dessa forma, uma única replicação foi suficiente, uma vez que repetições adicionais não resultaram em variação dos resultados obtidos.

No modelo proposto, a simulação tem início em 09 de julho de 2025, data em que se iniciou a produção destinada ao atendimento dos pedidos de expedição. Essa configuração permite respeitar a capacidade produtiva das máquinas e garantir a disponibilidade de produto acabado no momento do carregamento dos caminhões. Considerando que os dados reais de carregamento coletados correspondem ao período de 05 a 15 de agosto de 2025, definiu-se o *warm-up* como o intervalo compreendido entre 09 de julho e 04 de agosto de 2025 (até às 23h59). Dessa forma, apenas os resultados obtidos a partir de 05 de agosto, quando o sistema já se encontra em regime operacional estável, foram considerados para comparação e validação do modelo. A simulação foi finalizada em 15 de agosto de 2025, às 23h59, coincidindo com o término do período observado na operação real.

3.2.3 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

Chwif e Medina (2022) afirmam que duas das formas de verificação do modelo computacional são a animação gráfica e a implementação modular. A animação gráfica consiste em analisar visualmente se o modelo se comporta como na realidade. Já a implementação modular significa construir o modelo em partes e verificar o funcionamento de cada etapa construída. Neste trabalho, as duas formas foram utilizadas em conjunto. Primeiro foram implementados os processos de recebimento e estocagem, e assim verificados se eles se comportavam como esperado pela animação gráfica. Em sequência, foram implementados os processos de *picking* e expedição/carregamento, e assim verificados os funcionamentos a partir da animação gráfica.

Ainda segundo os mesmos autores, uma das formas de validação do modelo computacional é a quantitativa informal. Esse método consiste em comparar resultados da simulação com indicadores da operação real com o objetivo de validar os parâmetros por sua ordem de grandeza. Essa técnica foi utilizada para validar o modelo computacional deste trabalho. A partir de uma entrevista com o operador do setor de carregamento dos caminhões, constatou-se que o carregamento acontece, em média, em 30 minutos. Na simulação do cenário atual, obteve-se o tempo médio de carregamento em 39 minutos, o que permitiu a validação do modelo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da simulação computacional dos diferentes cenários de alocação de produtos no armazém de expedição. Antes da análise dos resultados, são descritas as características de cada cenário modelado, bem como os indicadores utilizados para a comparação de desempenho entre as políticas de estocagem.

O computador utilizado para obtenção dos resultados deste trabalho é um Notebook Acer com 8GB de RAM instalada, 520Gb de armazenamento, com placa de vídeo Intel® Iris® Xe Graphics 128 MB e com processador 11th Gen Intel® Core™ i5-1135G7 @ 2.40GHz 2.42 GHz.

4.1 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS ANALISADOS

Conforme discutido no referencial teórico, Gu *et al.* (2007) destacam três principais formas de alocação de produtos em um armazém: armazenamento aleatório, armazenamento baseado em classes e armazenamento dedicado. Com base nessa classificação, foram elaborados cinco cenários de simulação, descritos a seguir:

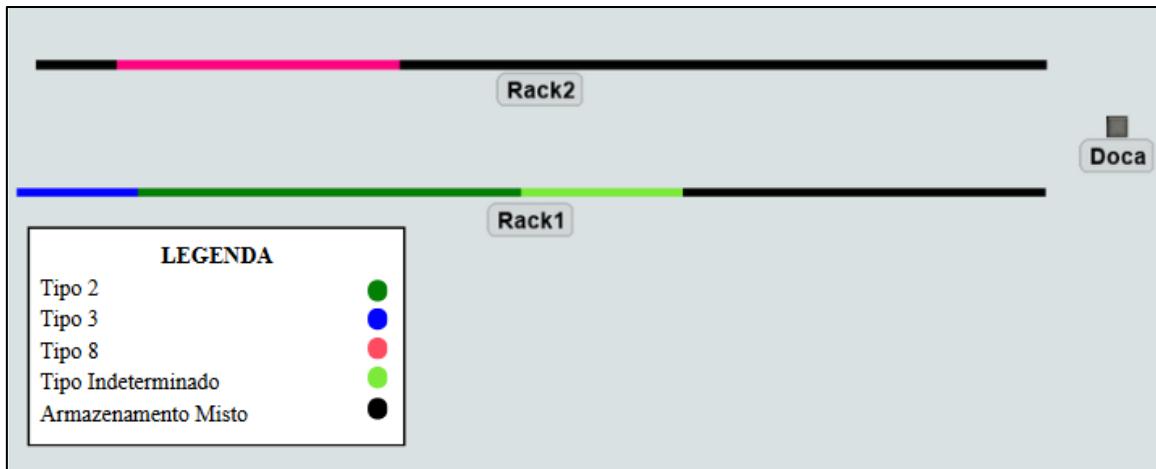
- Cenário 0 (Atual): No cenário atual, existem baias destinadas a quatro tipos de produtos. Os produtos 2, 3 e 8 possuem áreas específicas de armazenamento, assim como um quarto produto que, apesar de ter espaço reservado, não apareceu na janela de tempo analisada neste estudo. O restante das baias é destinado ao armazenamento misto. A quantidade de baias por tipo de produto é apresentada na Tabela 6, enquanto a distribuição dessas baias no pátio de expedição pode ser visualizada na Figura 9.

Tabela 6: Número de Baias por Classe de Produto

Tipo Produto	Número Baias
2	19
3	6
8	14
Tipo Indeterminado	8
Armazenamento Misto	54

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Figura 9: Mapa do Pátio de Expedição do Cenário Atual



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

- Cenário 1 (aleatório): Os produtos são alocados de forma totalmente aleatória nos espaços disponíveis do armazém.
- Cenário 2 (mais próximo disponível): Nesta configuração, cada produto é armazenado no local mais próximo disponível em relação à saída de produtos acabados.
- Cenário 3 (por classes baseadas em tipos de produto e popularidade): Neste cenário, os produtos foram agrupados em classes, conforme seu tipo e frequência de movimentação. Foram definidas cinco classes a partir do tipo de produto, que concentram aproximadamente 80,77% do volume movimentado no período analisado, como pode ser visto na Tabela 7. Cada uma dessas classes possui uma área de armazenagem específica dentro do pátio, de forma a reduzir o número de deslocamentos e o tempo de busca durante o carregamento. A sexta classe foi criada para os demais tipos de produtos, que representam menor participação no total movimentado, e assim foi destinado um espaço comum no armazém, permitindo o armazenamento misto. Ressalta-se que a divisão do número de baias por tipo de produto também obedeceu a proporção do volume movimentado. Dessa forma, o número de baias por classe de produto pode ser observado na Tabela 8, assim como o mapa desta divisão na Figura 10.

Tabela 7: Movimentação por Tipo de Produto

Tipo Produto	Movimentação (%)	Movimentação Acumulada (%)
2	41,29%	41,29%
8	16,39%	57,68%
5	10,32%	68,00%
13	6,97%	74,97%
6	5,81%	80,77%
7	3,23%	84,00%
12	2,97%	86,97%
1	2,58%	89,55%
3	2,58%	92,13%
9	2,58%	94,71%
10	2,58%	97,29%
11	2,58%	99,87%
4	0,13%	100,00%

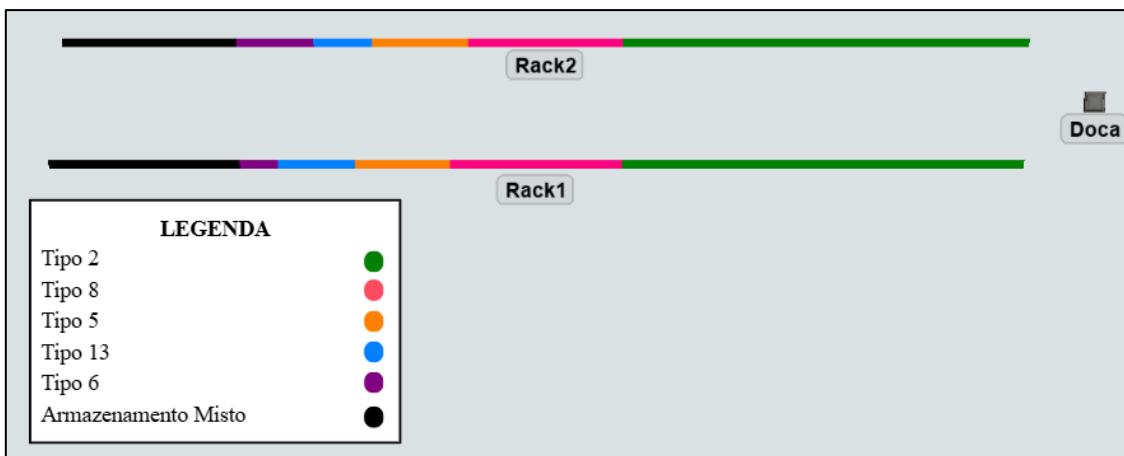
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 8: Número de Baias por Classe de Produto

Tipo Produto	Número Baias
2	42
8	17
5	10
13	7
6	6
Armazenamento Misto	19

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Figura 10: Mapa do Pátio de Armazenagem para o Cenário 3



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

- Cenário 4 (extra): este cenário possui as mesmas características do cenário 3 citadas anteriormente. A única diferença operacional concentra-se no fato de que o número de empilhadeiras foi reduzido de 6 para 5 equipamentos.

4.2 INDICADORES DE DESEMPENHO

A avaliação dos cenários foi realizada com base em indicadores de movimentação interna e eficiência do carregamento, de forma a determinar a política de estocagem mais adequada ao sistema. Os indicadores analisados foram:

- Movimentação das empilhadeiras:
 - Distância total percorrida (m);
 - Taxa de utilização das empilhadeiras (%).
- Carregamento/Expedição:
 - Tempo médio de carregamento (min);
 - Tempo máximo de carregamento (min);
 - Taxa de utilização da doca (%).

Nos tópicos seguintes, são apresentados os resultados obtidos em cada cenário e a comparação entre eles, com o intuito de identificar a política que proporciona menor movimentação interna e maior eficiência nas operações de carregamento.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A simulação dos quatro cenários permitiu avaliar de forma comparativa o impacto das diferentes políticas de estocagem sobre o desempenho operacional do armazém. Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos para cada política, seguidos da discussão dos efeitos observados em relação aos indicadores definidos anteriormente. Os resultados compilados dos quatro cenários simulados podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados dos Cenários Analisados

Indicadores	Cenários				
	Cenário 0 (Atual)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4 (Extra)
Distância Percorrida pelas Empilhadeiras (m)	335.820,11	308.227,14	328.959,06	312.670,98	305.913,14
Taxa de Utilização das Empilhadeiras (%)	14,50%	13,00%	13,17%	13,09%	16,20%
Tempo Médio de Carregamento (min)	39	42	43	38	47
Tempo Máximo de Carregamento (min)	107	82	99	82	91
Taxa de Utilização da Doca (%)	10,32%	11,26%	11,31%	10,03%	12,51%

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

O cenário 1 apresentou a menor distância percorrida pelas empilhadeiras, com 308.227,14 metros percorridos pelas 6 empilhadeiras no período de 5 a 15 de agosto. Desempenho que corrobora a menor taxa de utilização desses equipamentos em comparação aos demais cenários. Entretanto, o tempo médio de carregamento foi o terceiro maior observado entre os cenários, assim como a taxa de utilização da doca. No que diz respeito ao tempo máximo de carregamento, este cenário apresentou o menor entre os cenários analisados. Deve-se citar que o armazenamento aleatório resulta em um aumento de 7,69% no tempo médio de carregamento em comparação ao cenário base, em contrapartida, apresenta uma redução de 23,36% no tempo máximo de carregamento para o período analisado. Quanto à movimentação das empilhadeiras, o cenário 1 apresentou uma redução de 8,22% da distância percorrida pelas empilhadeiras em relação ao cenário 0. Mesmo com algumas melhorias em relação ao cenário atual, o aumento no tempo médio de carregamento em 7,69% tem um impacto significativo na operação, além de não evitar riscos à integridade dos produtos, uma vez que todos permanecem sujeitos a movimentações desnecessárias decorrentes do empilhamento.

No cenário 2, também se verificou redução na distância percorrida pelas empilhadeiras, com uma diminuição de 2,04% em comparação ao cenário atual, o que está alinhado com uma menor taxa de utilização desses equipamentos. Contudo, esse cenário apresentou o maior tempo médio de carregamento, correspondendo a um aumento de 10,26% em relação ao cenário atual, o que resultou, inclusive, na maior taxa de utilização da doca. Ainda assim, o tempo máximo de carregamento se manteve abaixo do valor observado no cenário atual, com redução de 7,48%. Entretanto, assim como no cenário 1, este arranjo não assegura a integridade dos produtos, pois todos estão sujeitos a movimentações extras devido ao empilhamento.

O cenário 3 também apresentou redução na distância percorrida pelas empilhadeiras, com diminuição de 6,89% em relação ao cenário atual. A taxa de utilização dos equipamentos de movimentação igualmente apresentou redução, ficando atrás apenas daquela registrada no cenário 1. Quanto aos tempos de carregamento, houve redução de 2,56% no tempo médio e 23,36% no tempo máximo, ambos inferiores aos observados no cenário atual. Além disso, esse cenário apresentou a menor taxa de utilização da doca. Destaca-se ainda que o cenário 3 obteve os melhores indicadores de carregamento entre os cenários analisados, além de promover a integridade de 80,77% dos produtos, já que essa parcela não fica sujeita a movimentações desnecessárias decorrentes do empilhamento. Para

comparação, o cenário atual protege 60,26% dos produtos movimentados no período analisado.

Com o objetivo de otimizar o uso das empilhadeiras, uma vez que esse recurso apresentou elevadas taxas de ociosidade em todos os cenários avaliados, foi simulado o Cenário 4, mantendo-se a mesma política de estocagem do Cenário 3, porém com uma empilhadeira a menos, reduzindo-se o total de seis para cinco equipamentos. Em comparação ao Cenário 3, verificou-se um aumento de 23,68% no tempo médio de carregamento, que passou de 38 para 47 minutos. O tempo máximo de carregamento também apresentou elevação de 10,98%, contudo permaneceu inferior ao registrado no cenário atual. Em relação à distância percorrida pelas empilhadeiras, observou-se uma leve redução de 2,16% quando comparada ao Cenário 3, enquanto a taxa de utilização das empilhadeiras em operação aumentou para 16,20%. Apesar desse aumento, trata-se ainda de uma taxa de utilização muito baixa, enquanto o acréscimo de 23,68% no tempo médio de carregamento pode gerar impactos operacionais relevantes.

Diante disso, este estudo indica o cenário 3 como o mais adequado ao pátio de expedição analisado, pois apresentou os menores tempos médio e máximo de carregamento, além da menor taxa de utilização da doca. Embora não tenha registrado a menor distância percorrida pelas empilhadeiras, ainda obteve o segundo melhor resultado e apresentou desempenho superior ao cenário atual. Assim, mostrou maior eficiência no carregamento, menor movimentação interna e maior preservação da integridade dos produtos.

Por fim, cabe ressaltar que, para fins comparativos, as taxas de utilização dos recursos (doca e empilhadeiras) demonstram que o modelo de simulação cumpriu sua função. Entretanto, os valores obtidos indicam altos níveis de ociosidade, o que pode não refletir a realidade, já que a janela de dados utilizada foi limitada e não contemplou a produção de produtos acabados expedidos posteriormente ao dia 15 de agosto de 2025.

Além disso, evidencia-se a necessidade de ampliar o período de coleta de dados para refinar a política de alocação baseada em classes por tipo de produto e popularidade. O que, entretanto, não sobrepõe o fato evidenciado pelos resultados obtidos por esse trabalho de que a alocação baseada em classes é a mais indicada ao pátio de expedição estudado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou diferentes políticas de estocagem para o pátio de expedição, utilizando simulação computacional para avaliar seus impactos sobre a movimentação interna, tempos de carregamento e utilização dos recursos. A partir da comparação entre os cenários, verificou-se que a política de alocação baseada em classes apresentou o melhor desempenho global, especialmente no cenário 3, que combinou menores tempos de carregamento, menor utilização da doca e redução significativa da movimentação interna, além de preservar maior parcela da integridade dos produtos armazenados.

Os resultados evidenciam que a forma como o pátio é organizado influencia diretamente a eficiência operacional. Observou-se que cenários que reduzem deslocamentos nem sempre resultam em melhores tempos de carregamento. A análise também mostrou que políticas que concentram produtos de maior rotatividade em áreas de acesso facilitado tendem a melhorar o desempenho do processo como um todo.

Apesar da consistência dos resultados, destaca-se que a base de dados utilizada foi limitada a um curto período, o que pode não refletir integralmente a variabilidade operacional ao longo do ano. Assim, para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar a janela de coleta de dados para incorporar diferentes ritmos de produção e sazonalidades, possibilitando o refinamento das políticas propostas.

Outra proposta para trabalhos futuros consiste em incorporar ao modelo computacional o processo de entrada dos pedidos dos clientes. Como se trata de uma indústria que opera sob o modelo *make to order*, não foi possível definir distribuições estocásticas a partir dos dados coletados. Caso o momento do pedido fosse modelado e desencadeasse os processos subsequentes, como programação da produção e chegada dos caminhões, esse limite poderia ser superado. Dessa forma, atributos como o tipo de produto solicitado e a quantidade requisitada poderiam assumir comportamento estocástico, permitindo representar a variabilidade real do sistema.

Ainda assim, o estudo demonstra o potencial do uso de simulação como ferramenta de apoio à tomada de decisão no contexto logístico, permitindo testar alternativas de forma segura, sem interrupção das operações reais. Conclui-se que a adoção da política de estocagem por classes é a alternativa mais adequada para o pátio de expedição analisado, promovendo melhorias relevantes no desempenho operacional e maior proteção aos produtos movimentados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALASMARI, Loloah; PACKIANATHER, Michael; TUTHILL, Peter; LIU, Ying; GUO, Xiao. **Assessing the circular transformation of warehouse operations through simulation.** Procedia Computer Science, v. 253, p. 1124–1133, 2025. DOI: 10.1016/j.procs.2025.01.174.
- ALVARENGA, A. C.; NOVAES, A. G. N. **Logística aplicada.** 3. ed. São Paulo: Blucher, 2000. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 08 dez 2025.
- BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial.** São Paulo: Editora Bookman, 2006.
- BANKS, Jerry; CARSON II, John S.; NELSON, Barry L.; NICOL, David M. **Discrete-event system simulation.** 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2004.
- CANNAVA, Luca; PEROTTI, Sara; DE CHIRICO, Alessia; NAJAFI, Behzad; RINALDI, Fabio. **Sustainable logistics facilities: a simulation-based approach towards warehouse decarbonization within the food and beverage industry.** Procedia Computer Science, v. 253, p. 1545–1554, 2025. DOI: 10.1016/j.procs.2025.01.216.
- CASSEL, Ricardo A.; CARMO, Francisco Duarte C. F.; CAMPANA, Fabrício L.; SILVA, Marcelo H. C. M. **Simulação da Logística Interna da Área de Armazenagem de uma Empresa do Setor Moveleiro**, ENEGEP, 2002.
- CHWIF, Leonardo. **Redução de modelos de simulação de eventos discretos na sua concepção: uma abordagem causal.** Tese de Doutorado. Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia Mecânica, 1999.
- CHWIF, Leonardo; MEDINA, Afonso C. **Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Prática.** 5. ed. Leanpub, 2022.
- FRAZELLE, Edward H. **World-class Warehousing and Material Handling.** New York: McGraw-Hill, 2002.
- FREITAS FILHO, Paulo José de. **Introdução à modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena.** 2 ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.
- GU, Jinxiang; GOETSCHALCKX, Marc; F. MCGINNIS, Leon. **Research on warehouse operation: A comprehensive review**, European Journal of Operational

Research, Volume 177, Issue 1, 2007, Pages 1-21, ISSN 0377-2217,
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.02.025>.

GREENWOOD, Allen G. **Simulation Software Primer**. 4. ed. Orem, UT: FlexSim Software Products, Inc., 2020.

LAMBERT, Douglas M.; STOCK, James R.; ELLRAM, Lisa M. **Fundamentals of logistics management**. USA: Irwin McGraw-Hill, 1998.

MENDES, D. S.; CORREIA, A. R.; TOZI, L. A. **Análise de alternativas para aumento da produtividade e qualidade operacional de terminais de cargas em aeroportos por meio de simulação computacional**. Journal of Transport Literature, v. 6, n. 2, p. 124–143, abr. 2012.

PAULA, Miguel de Carvalho; CARVALHO, Maria Sameiro; SILVA, Elsa. **Improving warehouse operations: leveraging simulation for efficient layout design and process improvement in a picking by line operation**. Procedia Computer Science, v. 263, p. 481–489, 2025. DOI: 10.1016/j.procs.2025.07.058.

RIZQI, Zakka Ugh; CHOU, Shuo-Yan; CAHYO, Winda Nur. **A simulation-based Digital Twin for smart warehouse: Towards standardization**. Decision Analytics Journal, v. 12, 2024. DOI: 10.1016/j.dajour.2024.100509.

SILVA, Ricardo Moreira da; SCARPIN, Tadeu Cassius. **Gestão de Armazenagem e Movimentação de Materiais por meio de Simulação Discreta: Um Estudo De Caso**. Iberoamerican Journal of Industrial Engineering, Florianópolis, SC, Brasil, v. 9, n. 18, p. 22-47, 2017.

TINELLI, Livia Martinelli. **Otimização do posicionamento de produtos acabados em armazéns inteligentes**. Tese de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da USP. Departamento de Engenharia Mecânica, 2013.