



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

LUCAS MATHEUS DO NASCIMENTO

**MODELAGEM E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE ARMAZENAGEM DE  
PRODUTOS PERECÍVEIS UTILIZANDO SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS**

Recife

2019

LUCAS MATHEUS DO NASCIMENTO

**MODELAGEM E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE ARMAZENAGEM DE  
PRODUTOS PERECÍVEIS UTILIZANDO SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção

**Área de concentração:** Pesquisa Operacional.

**Orientador:** Prof<sup>o</sup>. Dr. Márcio José das Chagas Moura

Recife  
2019

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

N244m Nascimento, Lucas Matheus do.  
Modelagem e análise de um sistema de armazenagem de produtos perecíveis utilizando simulação de eventos discretos / Lucas Matheus do Nascimento. - 2019.  
62 folhas, il. e tabs.

Orientador: Profº. Dr. Márcio José das Chagas Moura.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2019.  
Inclui Referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Produtos perecíveis. 3. Simulação de eventos discretos. 4. Gerenciamento de estoques. 5. Sistemas de armazenagem em racks. I. Moura, Márcio José das Chagas (Orientador). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-182

LUCAS MATHEUS DO NASCIMENTO

**MODELAGEM E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE ARMAZENAGEM DE  
PRODUTOS PERECÍVEIS UTILIZANDO SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção

Aprovada em: 20/02/2019.

**BANCA EXAMINADORA**

---

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

---

Profª. Drª Ísis Didier Lins (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profº. Dr. Rodrigo Bernardo da Silva (Examinador Externo)  
Universidade Federal da Paraíba

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de deixar registrada minha profunda gratidão:

Primeiramente a Deus, o Autor da vida, sem o qual nada disso seria possível;

A meus pais, Silvino e Denise, pelo amor incondicional e suporte, me motivando a estudar e crescer tanto academicamente quanto na vida. Meus irmãos, Moysés e Késia, pela paciência, apoio e orientação nos trabalhos e disciplinas do curso;

A meu orientador, Márcio das Chagas Moura, pela oportunidade de fazer parte de um centro de pesquisa de excelência como o CEERMA-UFPE e pela orientação durante esses anos;

À Vívian pelo carinho, cuidado, apoio e atenção durante a fase final do desenvolvimento dessa dissertação;

A meus amigos do CEERMA-UFPE, João, Caio, July, Rafael, Beatriz, Monalisa, Yuri e Roberto pela ajuda, companheirismo, conselhos e geração de ideias para o desenvolvimento deste projeto;

Ao CEERMA-UFPE, em especial, à professora Ísis Lins, Claudia Von, Fabiana e Joelma pela dedicação diária, nos dando condições de desenvolver esse trabalho;

Aos amigos do Deboa, representados aqui na pessoa do seu Líder, Guilherme Barros, pelo carinho de sempre, preocupação e apoio nos momentos importantes da minha vida;

A todos os professores do Departamento de Engenharia de Produção e ao PPGEF-UFPE pela dedicação, trabalho, seriedade e por me proporcionarem a maior de todas as conquistas no curso: o conhecimento;

À minha professora de inglês, Jessica Lima, pela dedicação, seriedade e compromisso com a educação. O conhecimento adquirido em suas aulas foi fundamental para a conclusão dessa dissertação.

À FlexSim™ Brasil e FlexSim™ USA, pela licença temporária da versão acadêmica para o desenvolvimento do modelo de simulação.

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

## RESUMO

Em sistemas de produtos perecíveis, o grau de complexidade do gerenciamento de estoques aumenta devido às restrições dos produtos quanto à temperatura, validades, restrições sanitárias e alimentícias, por exemplo. Neste contexto, esta dissertação trata um dos principais problemas em sistemas de armazenagem de produtos perecíveis: encontrar um sistema robusto, com alta rotatividade de produtos e que respeite as restrições e características da operação. O objetivo é modelar, simular e propor soluções de melhorias para sistemas de armazenagem de produtos perecíveis em racks de uma indústria alimentícia de grande porte. Para isso, utilizaram-se de modelos de simulação de eventos discretos que foram aplicados ao caso real para modelar o sistema atual do estoque de matéria-prima da indústria, formado por racks do tipo *Drive-in* e confrontá-lo com sistemas similares como o rack do tipo *PushBack*. Através desses modelos, foi possível analisar o caso atual para propor soluções de melhorias através de cenários simulados, mostrando a eficiência dos cenários propostos. Os resultados obtidos mostram que, a longo prazo, a mudança no sistema de armazenagem atual do caso estudado podem trazer ganhos significativos à organização.

Palavras-chave: Produtos perecíveis. Simulação de eventos discretos. Gerenciamento de estoques. Sistemas de armazenagem em racks.

## **ABSTRACT**

In perishable product systems, the degree of complexity of inventory management increases because of product restrictions on temperature, shelf life, sanitary and food restrictions, for example. In this context, this dissertation addresses one of the main problems in storage systems for perishable products: finding a robust system with high product turnover and respecting the restrictions and characteristics of the operation. The objective is to model, simulate and propose solutions for storage systems for perishable products in racks of a large food industry. For this, we used discrete event simulation models that were applied to the real case to model the current inventory system of the raw material of the industry, formed by racks of the type Drive-in and confront it with similar systems as the rack type PushBack. Through these models, it was possible to analyze the present case to propose solutions of improvements through simulated scenarios, showing the efficiency of the proposed scenarios and the results obtained show that, in the long term, the change in the current storage system of the studied case can bring gains to the organization.

**Keywords:** Perishable products. Discrete event simulation. Inventory management. Storage racks systems.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	<i>Sistema de armazenagem Drive-in</i> .....	13
Figura 2 –	<i>Rack industrial</i> .....	17
Figura 3 –	<i>Inter-relações entre as etapas do modelo</i> .....	28
Figura 4 –	<i>Representação da notação de uma rua do rack</i> .....	33
Figura 5 –	<i>Layout do modelo de simulação</i> .....	34
Figura 6 –	<i>Rack Drive-in</i> .....	35
Figura 7 –	<i>Rack PushBack</i> .....	36
Figura 8 –	<i>Representação da modelagem</i> .....	45
Figura 9 –	<i>Gráfico de dispersão do tempo médio de alocação no rack Drive-in</i>	46
Figura 10 –	<i>Remoção dos pallets – Rack Drive-in</i> .....	47
Figura 11 –	<i>Diagrama representativo dos cenários simulados para uma rua do rack Drive-in</i> .....	49
Figura 12 –	<i>Resultado da simulação dos cenários para o rack Drive-in</i> .....	50
Figura 13 –	<i>Diagrama representativo dos cenários simulados para o rack PushBack</i> .....	51
Figura 14 –	<i>Tempos médios de alocação e remoção dos racks</i> .....	52
Figura 15 –	<i>Tempos médios de duração dos cenários para os racks Drive-in e PushBack</i> .....	53
Figura 16 –	<i>Quantidade de pallets alocados vs tempo</i> .....	53
Figura 17 –	<i>Utilização das empilhadeiras</i> .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	<i>Resultados para o estudo de tempos do sistema atual (Rack Drive-in)</i>	38
Tabela 2 –	<i>Resultados para o estudo de tempos do rack PushBack .....</i>	39
Tabela 3 –	<i>Tempos de movimentação dos pallets movidos desnecessariamente.....</i>	40
Tabela 4 –	<i>Resultados do teste de aderência para o rack Drive-in .....</i>	41
Tabela 5 –	<i>Resultados do teste de aderência para o rack PushBack .....</i>	41
Tabela 6 –	<i>Cenários Simulados .....</i>	48
Tabela 7 –	<i>Estatística descritiva dos tempos das empilhadeiras com o pallet para 30 replicações .....</i>	54

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	10
<b>1.1</b>	<b>Descrição do Problema</b>	11
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	16
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	18
1.3.1	Objetivo Geral	18
1.3.2	Objetivos Específicos	18
<b>1.4</b>	<b>Organização da Dissertação</b>	19
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DA LITERATURA</b>	20
<b>2.1</b>	<b>Simulação de Eventos Discretos</b>	20
<b>2.2</b>	<b>Sistemas de Armazenagem em Racks</b>	23
2.2.1	Manuseio de Materiais em Sistemas de Armazenagem em Racks	24
<b>2.3</b>	<b>Sistemas de Armazenagem de Produtos Perecíveis</b>	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	28
<b>3.1</b>	<b>Estudo de Tempos</b>	29
3.1.1	Registro das Informações Necessárias	29
3.1.2	Divisão da Operação em Elementos	29
3.1.3	Coleta e Registro dos Dados	30
3.1.4	Determinação do Número de Ciclos a Serem Cronometrados Inicialmente	31
3.1.5	Verificação do Número de Ciclos	31
<b>3.2</b>	<b>Modelo de Simulação</b>	31
3.2.1	Definição e Planejamento do Problema	31
3.2.2	Formulação e Construção do Modelo	33
3.2.3	Coleta de Dados	36
3.2.4	Testes de Aderência	39
3.2.5	Implementação e Validação do Modelo	42
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	48
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	58
	<b>REFERÊNCIAS</b>	60

## 1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento de estoque é um dos aspectos cruciais de qualquer negócio baseado em produto. Foi relatado por Riad, Elgammal, e Elzanfaly (2018) que os EUA gastam US\$ 1,1 trilhão por ano e que apenas 54% das pequenas e médias empresas rastreiam o estoque e o restante não usa o inventário com métodos pré-definidos. O gerenciamento de estoque é essencial para garantir que a quantidade ideal de estoque seja armazenada pelo tempo ideal (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2010). Isso eliminaria custos desnecessários de manutenção, desatualização ou deterioração, escassez e problemas de capital de giro, além de movimentações desnecessárias.

A eficiência e eficácia das atividades de logística em geral e das redes de distribuição, em particular, determinam a maneira como os armazéns operam suas redes (DE SANTIS et al., 2018). Os mecanismos de controle de produção que existem na literatura são principalmente classificados em dois, puxado e empurrado. As estratégias de produção puxadas são melhores para minimizar o inventário do sistema, enquanto as estratégias empurradas são melhores para maximizar a taxa de transferência (GAURY, KLEIJNEN e PIERREVAL, 2001).

Com a evolução do conhecimento humano e tecnologia, as atividades que devemos realizar em nossos trabalhos vêm se tornando cada vez mais complexas e numerosas, o que leva à necessidade de maior eficiência em soluções e decisões, tanto em tempo utilizado, quanto em qualidade. Estrategicamente, as empresas possuem linhas de produção, que produzem uma grande variedade de produtos, sendo necessários um planejamento da operação e uma gestão funcional de estoques de modo a reduzir o custo de *setup*. Existem diversas estratégias de estocar itens; dentre elas, as mais comuns são a *First in First out (FIFO)* e a *Last in First Out (LIFO)* (OLAITAN; YU; ALFNES, 2017)(ASMUSSEN; GLYNN, 2017).

No FIFO, o primeiro produto que entrou é o primeiro que será retirado, em ordem cronológica, geralmente usado em estoques de giro mediano ou com produtos perecíveis (OLAITAN et al., 2017). Já no LIFO, o último produto que chega é o primeiro a sair, ordem inversa do FIFO. Ele é usado em sistemas onde o estoque com baixo ou alto giro trabalha com uma margem de segurança para atender à demanda nos períodos de pico (ASMUSSEN e GLYNN, 2017).

Para produtos perecíveis, por exemplo, além da regra de alocação e retirada pré-determinada, devem-se considerar as suas restrições de perecibilidade, como data de validade, deterioração, temperatura, proximidade de produtos contaminantes, etc. (KETZENBERG; GAUKLER; SALIN, 2018; SATITI; RUSDIANSYAH, 2018). Todavia, como cada tipo de

produto tem características e restrições particulares como as supracitadas, muitas vezes é inviável, na prática, que a regra global de armazenagem considere todas as restrições do sistema de armazenagem, necessitando, assim, da ação do operador em casos onde a regra inicial não atende as restrições dos produtos ou de regras específicas para aquele tipo de sistema (LIU et al., 2018; ACCORSI; BARUFFALDI; MANZINI 2018; KEIZER et al. 2017).

A finalidade dessa pesquisa é a aplicação de um modelo de simulação em um sistema de estoques de matéria-prima, a qual foi motivada devido às recorrentes perdas financeiras e de produção devido a movimentações desnecessárias dos produtos no estoque. Essa pesquisa de caráter explicativo objetiva, por meio de uma abordagem de modelagem e simulação, descrever o funcionamento do sistema produtivo para identificação dos possíveis problemas, auxiliando os responsáveis a tomarem decisões precisas para solução dos mesmos. A natureza dos dados é quantitativa, embora o conhecimento dos supervisores e operários e análises do funcionamento do sistema também agregaram dados a este projeto.

### **1.1 Descrição do Problema**

Não é de hoje que o estoque é considerado como perda em um sistema produtivo, pois além de ser um capital parado, os itens estocados estão sujeitos a dois fatores básicos: obsolescência e a deterioração (SLACK et al., 2010). Segundo Ferreira, Arruda e Marujo (2018), quando se trata de produtos perecíveis, o fator deterioração torna-se um agravante devido à vida útil dos produtos.

O problema de estoques de produtos perecíveis é que, além da perecibilidade forçar que produtos mais antigos tenham que ser retirados primeiro, o custo de estoques muitas vezes é maior que estoques de produtos não-perecíveis devido às condições de temperatura e umidade em que o produto precisa ser conservado. Logo, melhorar a eficiência desses sistemas é um ponto crucial para as organizações.

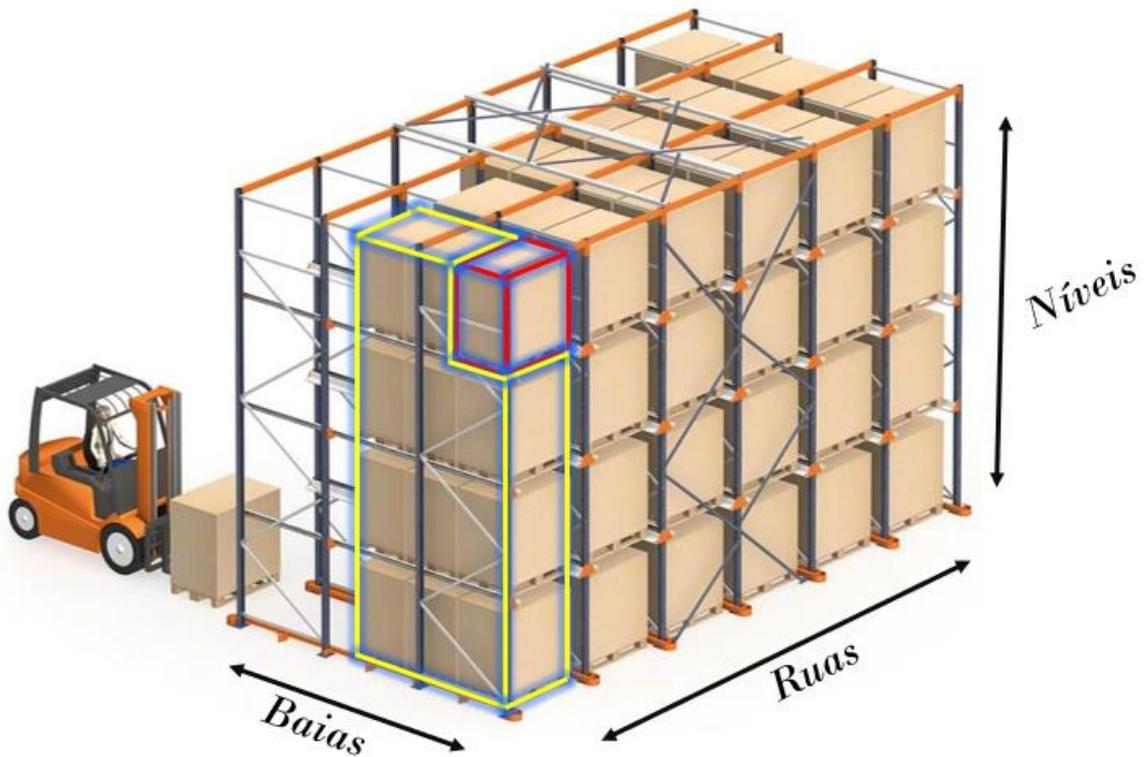
Desta forma, a presente dissertação trata um dos principais problemas em sistemas de armazenagem de produtos perecíveis: encontrar um sistema robusto, com alta rotatividade de produtos e que respeite as restrições de perecibilidade dos produtos tais como proximidade de contaminantes, validade, temperatura, etc. (GILS et al. 2017; MARTELLI; DANDARO, 2015). Por exemplo, uma planta industrial alimentícia, que tenha como matéria-prima o trigo e também produza produtos sem glúten, deve armazenar as matérias-primas desse produto longe do estoque de trigo, pois as partículas do trigo ficam suspensas no ar, o que pode ocasionar a contaminação por glúten.

Visto isto, a essência do problema é que cada planta industrial possui sua gama específica de produtos, cada uma com suas restrições sanitárias e de perecibilidade, ou seja, cada sistema tem suas próprias características de operação. Logo, em muitos desses sistemas, as regras de alocação padrão ainda não conseguem englobar todas as restrições do sistema, sendo necessária a criação de regras de decisão particulares que respeitem as restrições dos produtos.

Na prática, essas regras acabam ocasionando problemas de gestão do estoque, como retrabalho, erros no registro da localização do produto no rack, movimentações desnecessárias, ineficiência no uso do operador, entre outros problemas que serão vistos com detalhes no decorrer desse texto. Outro fator agravante é que, às vezes, mesmo a regra de decisão do sistema não consegue respeitar as restrições dos produtos, sendo necessária a intervenção e conhecimento prévio do operador para ajustar e criar regras de alocação empíricas a depender da situação encontrada (DE FELICE; PETRILLO; ZOMPARELLI, 2016). As consequências dessa variabilidade do sistema vão desde complicações no controle da produção, realocação, queda na eficiência da planta produtiva e até um aumento no número de acidentes de trabalho por não haver regras pré-estabelecidos para as variações do sistema (NIE et al., 2017).

Um dos sistemas de estoque de matéria-prima mais comum em indústrias de grande porte, como alimentícia e farmacêutica, é a armazenagem em racks. A Figura 1, por exemplo, mostra um rack do tipo *drive-in*, o qual tem a LIFO como regra de alocação (SLACK et al., 2010). Todavia, caso o operador precise retirar um produto que não siga essa regra geral, como por exemplo, o produto destacado em vermelho na Figura 1, será necessário retirar os demais produtos à frente e realocá-los depois, modificando totalmente sua configuração inicial.

Figura 1 - Sistema de armazenagem Drive-in



Fonte: Adaptado de <https://www.mecalux.com.br/cargas-paletizadas/armazenagem-drive-in>, acesso em 19 de junho de 2018

Para facilitar o entendimento do leitor, alguns termos essenciais para a compreensão do decorrer desse texto foram ilustrados na Figura 1 e serão descritos a seguir:

- **Níveis:** um nível pode ser entendido como o “andar” de um rack ou como sua subdivisão vertical;
- **Ruas:** As ruas podem ser entendidas como divisões horizontais de um rack. Um rack pode conter várias ruas. Quando se passa em frente ao rack, as ruas são as “entradas” da empilhadeira.
- **Baias:** Baias são os locais onde os pallets são colocados. Cada nível tem uma determinada quantidade de baias a depender do tamanho do pallet que será alocado;
- **Rack:** estrutura composta por níveis, ruas e baias que é facilmente encontrada em sistemas de armazenagem.

Problemas desse tipo podem aumentar drasticamente a ocorrência de erros humanos, segundo Sheikhalishahi, Pintelon e Azadeh (2016), os quais não ocorrem necessariamente por falta de habilidade do operador, mas também são resultantes de outros fatores como o nível de

sonolência e grau de atenção específico da tarefa (LEROY, 2009; SALLINEN; HUBLIN, 2015)). Embora já existam sistemas de armazenagem autônomos, que diminuem a ocorrência de erros humanos como mostrados por Ning et al. (2016) e Sang e Liu (2015), estes ainda são pouco adotados devido ao alto custo de implementação e manutenção, além de ocupar uma grande área na instalação.

Logo, para sistemas como esses, existe uma lacuna para o uso de simulação de processos produtivos devido ao fato de a realocação dos produtos no rack ainda ser feita via conhecimento empírico do operador na maioria dos casos (GILS et al., 2017; CALZAVARA et al., 2017). Nesses casos, o uso da simulação pode prover diversos benefícios de controle ao sistema, além de estimar métricas de interesse e auxiliar a construção de novas regras de alocação ou mesmo na mudança do tipo de sistema de armazenagem utilizado.(GOTI, 2010; ROSS, 2013; SOKOLOWSKI, BANKS, 2009)

Assim como nos sistemas citados, o objeto de estudo dessa dissertação é um sistema de armazenagem manual. O caso de aplicação foi feito em uma planta produtiva de uma multinacional do ramo alimentício que, por questões de confidencialidade, não será identificada no texto dessa dissertação. Essa instalação possui duas linhas de produção que são alimentadas pelo estoque de matéria-prima estudado. Esse estoque apresenta um sistema semelhante ao exposto na Figura 1. Todavia, o sistema de armazenagem de racks do tipo *drive-in* estudado possui 12 ruas, 4 níveis e 6 baias e será melhor exemplificado no decorrer desta dissertação. É importante salientar que as ruas representam a quantidade de entradas que o rack possui, os níveis correspondem aos andares das ruas e as baias correspondem à quantidade de pallets que cada nível comporta, como representado anteriormente na Figura 1. Além disso, a movimentação no rack é feita por empilhadeiras. Quando requerido pela produção, essas empilhadeiras movimentam o material do rack até a linha de produção e reabastecem o rack com matérias-primas que chegam ao armazém.

O estoque armazena 3 tipos de produtos: Alergênico tipo 1, Alergênico tipo 2 e Não-alergênico. Porém, o material alergênico (tipo 1 ou 2) não pode ser estocado acima, nem no mesmo endereço de outro tipo de produto. Como citado anteriormente, em racks do tipo *drive-in* a estratégia adotada para a alocação dos pallets é a LIFO. Todavia, por não haver um procedimento pré-estabelecido para a alocação desses produtos respeitando as restrições supracitadas, adota-se na maioria dos casos a estratégia de alocar a matéria-prima no primeiro espaço disponível que respeite as restrições. A implicação atual dessa estratégia é uma grande quantidade de reconfigurações de ocupação dos racks quando um pedido de matéria-prima é

solicitado pela linha de produção, reduzindo a produtividade e ampliando o *leadtime* do operador de empilhadeira.

Este é um típico sistema de eventos discretos aleatórios. Existem diversos procedimentos analíticos que fornecem informações importantes sobre as variáveis de interesse do sistema, como os modelos de programação inteira mista encontrados no trabalho de Kondili, Pantelides, e Sargent (1993) e modelos heurísticos como encontrado em Landmann e Erdmann (2011), por exemplo, e modelos analíticos como o de De Santis et al. (2018). Todavia, muitos deles são inviáveis na prática quando se trata de sistemas complexos, devido às simplificações que nem sempre conseguem representar a realidade. É nesse ponto que a simulação mostra sua real contribuição para uma organização, não como uma resposta direta à uma ação, mas como uma ferramenta de apoio à decisão auxiliando os responsáveis a entender o modo como o sistema se comporta mediante modificações no seu funcionamento. (SIEGFRIED, 2014; TOLK et al., 2017)

De fato, a simulação de processos produtivos pode ser entendida como a “replicação” de uma operação, processos ou sistemas do mundo real, sendo uma poderosa ferramenta no desenvolvimento de sistemas mais eficientes (ALBRECHT, 2010). Através da simulação, é possível avaliar hipóteses sem testá-las no mundo real e, atualmente, podem-se construir modelos e reconfigurar sistemas em um curto espaço de tempo (SCHRIBER; BRUNNER, 2007). Tal possibilidade de criar e simular fenômenos desejados permite conferir quão representativas seriam as mudanças no sistema real, colaborando, dessa forma, com a tomada de decisões e, conseqüentemente, levando uma série de vantagens competitivas às organizações.

Diante do exposto, segundo Ross (2013) e Albrecht (2010), uma vez construído e validado, um modelo de simulação tem o potencial para apoiar a tomada de decisão em situações difíceis de serem testadas na prática. Assim, como forma de mensurar as variáveis de interesse desses sistemas, propõe-se aqui o uso da simulação de eventos discretos como ferramenta de análise do sistema, a qual permite acompanhar o estado das variáveis de interesse no decorrer da operação para cada estratégia testada. De modo a contornar o problema supracitado, considerando as restrições do sistema na hora de calcular suas variáveis, objetiva-se, através da simulação de eventos discretos, determinar a escolha do melhor sistema de estocagem, seguido pela política de gestão de estoques para a empresa, assim como determinar o impacto que cada sistema gera para a organização.

## 1.2 Justificativa

Como citado anteriormente, existem diversas instalações com sistemas de armazenagem em racks e devido à grande gama de opções no mercado, nem sempre é simples determinar qual das alternativas melhor se adepta ao processo produtivo e às restrições de espaço de uma planta industrial. Quando nos referimos a produtos perecíveis, além dos fatores supracitados, ainda existe a questão da validade dos produtos e exigências sanitárias como restrições para determinar o tipo de sistema de armazenagem a ser escolhido.

Visto isto, a motivação para aplicar simulação de processos produtivos para resolução desse problema é definir as medidas de desempenho operacionais que são determinantes para a escolha do tipo de armazenagem desde o espaço ocupado, utilização das empilhadeiras, eficiência, tempo gasto, etc. Tal motivação objetiva suprir a ausência de dados de que os responsáveis pela gestão do estoque dispõem para mensurar a produtividade, além de identificar e avaliar os gargalos do processo e definir as alternativas de mudanças.

Definir procedimentos e decisões padronizadas a serem adotadas em sistemas em pleno funcionamento nem sempre é simples ou mesmo viável operacional e financeiramente. Modificar o tipo de regra de decisão na alocação dos pallets no rack pode ser testado na prática. Todavia, não se tem garantia se o investimento feito trará o retorno esperado ou até mesmo se isso acarretará em perdas de desempenho da operação, além do tempo gasto para as adequações do sistema à nova regra.

As aplicações de um modelo de simulação são bastante diversas, como pode ser visto na *review* feito por Tolk et al. (2017), partindo desde modelos de manufatura, logística e serviços até mesmo simulações de processos complexos como transporte de fluidos em uma refinaria. O processo de desenvolvimento de um modelo de simulação pode melhorar a solução do problema de forma cooperativa, entre as várias partes de uma organização (ROSS, 2013). A simulação pode promover a comunicação entre essas partes, permitindo aos envolvidos uma melhor visualização dos resultados de suas ideias e o impacto das decisões nos objetivos da organização e nos trabalhos dos demais envolvidos.

Além disso, a motivação para aplicar a SDE no problema em questão é a possibilidade de testar cenários sem a necessidade de implementação dos mesmos no sistema real devido ao fato que definir procedimentos e decisões padrões a serem adotadas no processo em sistemas em pleno funcionamento nem sempre é simples ou mesmo viável operacional e financeiramente falando (ALBRECHT, 2010). Por exemplo, para mover um rack semelhante ao modelo

mostrado na Figura 2, é necessário que ele seja desmontado e remontado no novo local, o que é totalmente inviável em um processo produtivo que dispõe de vários equipamentos desse tipo.

É justamente nesse ponto que o uso de modelos de simulação torna-se uma alternativa rápida, viável e eficaz para embasar a modificação ou não do sistema de gestão de estoques. Uma vez validado, um modelo de simulação de eventos discretos pode conferir uma representatividade ao sistema, de modo a testar cenários de melhoria sem a necessidade de implementá-los na prática (ROSS, 2013; SCHRIBER; BRUNNER, 2007). Portanto, devido às reconfigurações da estrutura física dos racks e da necessidade de testar novas políticas de estoque, torna-se necessário o uso de um modelo de simulação para validar de modo viável as hipóteses testadas no sistema.

*Figura 2 - Rack industrial*



*Fonte:* <http://www.wwcannon.com/storage-racks.php> acesso em 27/02/2018

Para o desenvolvimento do modelo de simulação utilizou-se o software de simulação de eventos discretos FlexSim™ v.2018.2. Ele utiliza tecnologias de processamentos, técnicas de simulação, inteligência artificial, modelos matemáticos e técnicas de manipulação de dados para modelar os mais diversos tipos de sistemas. A escolha do software se deu por conta da facilidade de implementar lógicas de programação para os racks, pois o FlexSim™ possui um objeto específico para a modelagem de Racks em sua biblioteca.

Além disso, o FlexSim™ possui um módulo de modelagem de processos complexos, o *ProcessFlow*, com ele é possível modelar de forma rápida e robusta as restrições e particularidades do sistema, citadas anteriormente nesta dissertação. Por se tratar de um software de código aberto, o FlexSim™ permite ao usuário construir e compilar por meio do Microsoft Visual Studio™ códigos em C++, DLL-Link ou na própria linguagem de programação do software, a FlexScript. Desse modo, essa ferramenta permite que as características e restrições do modelo sejam respeitadas em sua totalidade.

Além das ferramentas supracitadas, através do ExpertFit™, ferramenta de análise de dados anexa ao FlexSim™, é possível fazer testes de aderência em até 32 distribuições de probabilidade para os dados de entrada do modelo. Ao final da simulação, o FlexSim™ pode gerar relatórios estatísticos sobre os parâmetros e variáveis do modelo através das ferramentas *Statistic Collector*, *Experimenter* e *Optimizer*. Isso possibilita ao presente trabalho que os dados gerados pelo modelo sejam estatisticamente testados e gerem relatórios importantes para o entendimento dos resultados do modelo.

### 1.3 Objetivos

Este trabalho está subdividido entre objetivo geral e objetivos específicos, essa seção mostra tais objetivos.

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral modelar, simular e identificar potenciais problemas em uma operação crítica de um sistema de armazenagem visando implementar melhorias de políticas de estoque de produtos perecíveis por intermédio de um modelo de simulação de eventos discretos, a fim de diminuir as perdas por movimentação dos produtos.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um estudo de tempos para conferir a representatividade dos dados de entrada e estimação dos parâmetros do modelo;
- Construir e validar o modelo de simulação para verificar se a modelagem corresponde ao sistema atual, de modo a garantir a representatividade da solução;
- Interpretar os resultados visando identificar as potenciais causas dos problemas da operação estudada;
- Elaborar e implementar no modelo as propostas de melhoria para o sistema estudado;
- Analisar comparativamente os resultados dos modelos atual e proposto.

#### 1.4 Organização da Dissertação

O conteúdo presente em cada capítulo seguinte é brevemente descrito abaixo:

- **Capítulo 2:** Apresenta o referencial teórico necessário para o desenvolvimento da dissertação e uma revisão de literatura sobre os trabalhos semelhantes. Nesse capítulo, disserta-se sobre simulação de eventos discretos, gerenciamento de estoques, sistemas de armazenagem em racks e de estoques de produtos perecíveis;
- **Capítulo 3:** Explica a metodologia que foi utilizada no trabalho e mostra o estudo de tempos realizado;
- **Capítulo 4:** Apresenta as etapas de construção do modelo de simulação, coleta de dados e testes de aderência para os tempos coletados;
- **Capítulo 5:** Contém os principais resultados e uma análise comparativa entre os cenários testados.
- **Capítulo 6:** Contém as considerações finais da dissertação, tais como sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta definições e explicações sobre os principais tópicos deste trabalho: Simulação de eventos discretos, sistemas de armazenagem em racks e sistemas de armazenagens de produtos perecíveis. Além disso, uma análise crítica dos trabalhos presentes na área é apresentada como uma revisão da literatura.

### 2.1 Simulação de Eventos Discretos

A simulação é a experimentação de um sistema real através de modelos, sendo uma ferramenta poderosa no que se refere ao desenvolvimento de sistemas mais eficientes (BIRTA, ARBEZ, 2013; ROSS, 2013). Por serem muito complexos, alguns sistemas não podem ser interrompidos ou mesmo não existem métodos analíticos capazes de modelá-los. Para tais sistemas, a simulação aparece como uma alternativa viável, ágil, eficiente e segura para a solução de problemas. Nesse contexto, a simulação de eventos discretos (*Discrete Event Simulation* -DES) é uma metodologia que utiliza algoritmos, que analisam o comportamento de um sistema a cada instante de tempo em que ocorre uma alteração do seu estado atual (ALBRECHT, 2010), (HUSEBY & NATVIG, 2013).

Ross (2013) ressalta que os elementos fundamentais de um modelo de simulação discreta de eventos são as variáveis e os eventos. Em geral, as variáveis são classificadas como:

1. **Variáveis de tempo T:** Tempo de simulação decorrido;
2. **Contadores:** contam o número de vezes que um determinado evento acontece no período de tempo decorrido T;
3. **Variáveis de estado:** Descrevem o “estado do sistema” no tempo T.

Os eventos ocorrem quando acontecem alterações no estado do sistema em um instante de tempo T. Eventos podem ser caracterizados, por exemplo, por chegadas ou saídas de clientes numa fila, atendimentos, ocorrência de uma interferência num sinal telefônico, acidentes de trabalho, etc. Segundo Ross (2013), sempre que um evento ocorre, os valores das variáveis são modificados ou atualizados e o modelo retorna os dados de interesse do sistema.

O uso de softwares de simulação como o FlexSim™, Simio™, ProModel™ ou Arena™ vem tornando-se cada vez mais comum na resolução de problemas que são inviáveis de ser solucionados analiticamente, isso pode ser constatado nos trabalhos de Attar, Raissi e Khalili-Damghani (2017), Özkan, Nas e Güler (2016), Rakiman e Bon (2013), Zhu et al. (2014), e Chen, Hu e Xu (2013). Baril et al. (2016) afirmam que a simulação de eventos discretos nos últimos anos vem sendo considerada por vários autores como uma ferramenta poderosa para a

solução de problemas, trazendo resultados satisfatórios às partes interessadas, inclusive em sistemas complexos como hospitais e outros serviços. Pode-se constatar isso nos trabalhos de (MIELCZAREK e UZIAŁKO-MYDLIKOWSKA, 2012) e (ÜNLÜYURT e TUNÇER, 2016).

Banks et al. (2014) reiteram o fato de que a simulação possui um vocabulário próprio de terminologias que auxiliam o usuário a comunicar conceitos específicos e definiram alguns conceitos e palavras-chave que o modelador e o usuário devem conhecer para entender o funcionamento da simulação. Alguns desses conceitos definidos por Banks et al. (2014) e que foram considerados importantes para o entendimento desse trabalho, são listados a seguir:

- Sistema: é um conjunto organizado de entidades (pessoas, equipamentos, etc.) que trabalham juntas em direção a um objetivo específico;
- Estado do sistema: Conjunto de variáveis estocásticas e determinísticas que contém as informações necessárias para descrever um sistema em determinado instante;
- Rodada do modelo: significa operar a simulação por um determinado período de tempo com um único conjunto de valores aleatórios;
- Replicações do modelo: número de vezes que o modelo opera num determinado período de tempo;
- Tamanho da rodada: tempo total simulado durante a rodada de um modelo;
- Evento discreto: é uma ação instantânea que ocorre em um único momento. A ocorrência desse evento pode causar mudanças no estado do sistema;
- Evento contínuo: é uma ação que não cessa. Eventos contínuos envolvem uma taxa temporal de mudança.

A ocorrência desses eventos discretos e contínuos descrevem o tipo do modelo de simulação a ser estudado. Segundo Sokolowski e Banks (2009), um modelo de simulação pode ser considerado como discreto ou contínuo. Num modelo de simulação contínua, o sistema sofre uma alteração a cada fração de tempo. Já num modelo de simulação discreta, consideram-se somente eventos em que as variáveis do sistema se alteram, ou seja, o tempo entre eventos não é relevante. De modo a “discretizar” o tempo se referindo apenas aos tempos de ocorrência dos eventos, esse tipo de modelo é chamado por muitos autores de simulação de eventos discretos.

Um modelo de simulação ainda pode ser considerado como determinístico ou estocástico. Modelos determinísticos são aqueles que não contém nenhuma variável aleatória como parâmetro, ou seja, não possuem variabilidade de modo que um sinal de entrada sempre vai gerar um determinado sinal de saída. Já um modelo estocástico possui ao menos uma variável aleatória como parâmetro de entrada e, conseqüentemente, sua saída também é aleatória, de

forma que as saídas do modelo são estimativas da situação real (ALLEN, 2011; ROSS, 2013; SOKOLOWSKI, BANKS, 2009)

Tolk et al. (2017) também trazem uma importante análise sobre os avanços na modelagem e simulação nos trabalhos da Winter Simulation Conference nos últimos 50 anos. Neste trabalho eles mostram desde a evolução das linguagens de programação, de otimizações em cenários de incerteza, ao uso de *Big Data* e da simulação comportamental e social em softwares de simulação. Além disso, Tolk et al. (2017) também mostram o crescimento das publicações em simulação no decorrer dos anos.

Gils et al. (2017) mostram no seu trabalho a importância da simulação em sistemas de armazenagem através de um *review* em modelos de sistemas de armazenagem. Nesse *review* eles mostram que 51% dos modelos presentes nos trabalhos analisados por eles eram modelos de simulação, enquanto 21% eram analíticos e 28% de programação matemática. Nesta análise, Gils et al. (2017) ressaltam que no decorrer dos anos o uso de modelos de simulação vem crescendo exponencialmente na área de armazenagem.

Segundo Banks et al. (2014), estados comuns do sistema podem ser classificados como ociosos, ocupados, bloqueados, em processamento, etc. os eventos podem ser a chegada ou saída de um cliente, o término do serviço, quebra de máquinas, etc. Os itens processados muitas vezes podem ser produtos físicos, mas também podem ser documentos, tarefas, mensagens, etc. Esses itens são processados através de uma série de lógicas de processamento que podem ser pré-configuradas ou customizadas pelo usuário, as quais são chamadas de fluxo de processo.

Este trabalho irá utilizar um software de simulação de eventos discretos para modelar o problema em questão: o FlexSim™. Chen & Hu & Xu (2013), definem o Flexsim™ como “uma integração típica entre a tecnologia de realidade virtual e a simulação orientada a objetos discretos”. O Flexsim™ foi utilizado por Chen & Hu & Xu (2013) como uma plataforma para o desenvolvimento de uma tecnologia de simulação de realidade virtual discreta orientada a objetos para simular o planejamento e construção de programa de terminal de ônibus de uma estrada. Sheng (2010) também utilizou o Flexsim™ para simular um terminal rodoviário, com o foco na identificação dos gargalos para otimizar o valor do frete do terminal.

Zhu et al. (2014) definem que o Flexsim™ é um software que utiliza tecnologias de processamentos, técnicas de simulação, inteligência artificial e técnicas de manuseio de dados. Eles citam que o Flexsim™ é adequado para processos de fabricação, armazenamento e entrega, sistema de transporte e outros campos de estudo. No trabalho de Zhu et al. (2014), eles utilizam a simulação como uma ferramenta para estabelecer a alocação ótima de um centro de

distribuição cuja função objetivo é minimizar as distâncias percorridas e os bloqueios das ordens de retiradas em um sistema de armazenagem de produtos perecíveis, assim como o do presente trabalho.

## 2.2 Sistemas de Armazenagem em Racks

Muitos fatores influenciam a eficiência das operações em uma planta industrial, mas um dos principais fatores é o layout do estoque. Um depósito com um bom layout pode reduzir significativamente o custo das operações. Logo, o processo de planejamento do layout do sistema de armazenagem é um ponto crucial na construção de uma instalação fabril (KOHLER, LUKIC e NENADIC, 2014).

Grande parte dos armazéns utilizam esse tipo de sistema para maximizar o espaço que eles têm disponível para estoque. A eficiência de todo o fluxo de material é otimizada somente através de um planejamento preciso do seu sistema de armazenagem. Por se tratar de uma armazenagem vertical, esse tipo de sistema possui as mais diversas configurações a depender do tipo de produto a ser estocado e isso pode ser um fator crucial na determinação de qual modelo a ser adotado e, conseqüentemente, o desempenho operacional do sistema como um todo (PAVEL, CHRAMCOV e JEMELKA, 2016).

Por essa razão, cada vez mais autores na literatura têm como alvo de suas pesquisas o comportamento de sistemas de armazenagem. Neste contexto, estão os modelos de armazenagem em racks. Por exemplo, encontram-se modelagens de sistemas desse tipo nos trabalhos de Calzavara et al. (2017), Gu, Goetschalckx e McGinnis (2010), Kohler, Lukic e Nenadic (2014), Ning et al. (2016), Pavel et al. (2016) e de Sang e Liu (2015). O trabalho de Pavel et al. (2016) tem uma proposta semelhante ao problema trabalhado na presente dissertação. Eles comparam dois tipos de tecnologias de armazenagem em pallets: sistema de rack estático e sistema de rack móvel, aplicados em uma empresa do ramo automotivo, mostrando as principais vantagens e desvantagens dos dois sistemas quando simulados no caso real. Diferentemente, do presente trabalho, Pavel et al. (2016) tratam de produtos não-perecíveis e, desta forma, não precisam estar de acordo com as normas de segurança alimentícia e da vigilância sanitária. Além disso, Pavel et al. (2016) utilizam algoritmos de aproximação que tem como uma das principais restrições o uso de um produto uniforme com o mesmo peso e medida.

Sang e Liu (2015) modelaram e simularam um sistema de racks do tipo *Shuttle*, semelhante ao rack *PushBack* modelado por esse trabalho, a principal diferença entre eles é que

o *Shuttle* possui robôs que alocam os pallets nas baias do rack, enquanto o *PushBack* faz isso através de roletes, com menor precisão, porém com menor custo também. Assim como este trabalho, Sang e Liu (2015) fizeram essa modelagem através de um software de simulação de eventos discretos, o Automod™ e com isso puderam simular diferentes cenários como, por exemplo, variando o número de empilhadeiras usadas.

De Santis et al. (2018) propõem um novo algoritmo metaheurístico de roteamento para minimizar a distância de deslocamento de operadores em armazéns manuais. O algoritmo é baseado na metaheurística de otimização de colônia de formigas (ACO) combinada e integrada ao algoritmo Floyd-Warshall (FW). Eles aplicaram esse algoritmo em um sistema de armazenagem em racks e obtiveram resultados satisfatórios quando comparado a outros algoritmos utilizados para problemas de minimização de distância, como o problema do caixeiro viajante. O presente trabalho pode ser usado em conjunto com o algoritmo de De Santis et al. (2018) para modelar um sistema de armazenagem como um todo, já que o presente trabalho foca na movimentação no interior do rack e De Santis et al. (2018) na movimentação no armazém como um todo, sendo assim complementares.

Já o presente trabalho pretende resolver o problema de determinação do tipo de sistema de racks para produtos perecíveis, com mais restrições que o trabalho de Pavel et al. (2016) e para modelos de racks diferentes do analisado por Sang e Liu (2015). Assim, para contornar isso, esta dissertação utiliza simulação de eventos discretos para a modelagem e comparação de dois tipos diferentes de sistemas de estocagem para produtos diversificados com restrições de alocação entre eles, o que será melhor explicado no decorrer do texto.

### 2.2.1 Manuseio de Materiais (*Material Handling*) em Sistemas de Armazenagem em Racks

Segundo Metahri et al. (2017) as recentes tecnologias de manuseio de materiais permitem que as indústrias controlem e gerenciem seus inventários e isso não é exceção em sistemas de racks. Embora existam sistemas automatizados, como citados por Boysen, Briskorn e Emde (2017) e por Metahri et al. (2017) em que o manuseio de materiais é mais consolidado, a maioria dos tipos de racks ainda dependem de empilhadeiras e operadores para realizar as movimentações dos produtos, fazendo com que estudos de manuseio de materiais ainda sejam bastante importantes para a melhoria da armazenagem e movimentação em racks estejam crescendo cada vez mais, como é ressaltado por Daria et al. (2017) .

Assim como no presente trabalho, Calzavara et al. (2017) realizam um estudo para mais de um tipo de rack. No entanto, Calzavara et al. (2017) utilizam alguns indicadores ergonômicos como forma de mensurar o desempenho para esses tipos de sistema. Já este trabalho possui uma

abordagem mais abrangente, focando nos indicadores de desempenho do sistema de armazenagem como um todo e não apenas os fatores ergonômicos, contribuindo de modo complementar a trabalhos como o de Calzavara et al. (2017).

O sistema de armazenagem alvo do estudo da presente dissertação ainda está sujeito a uma interferência muito forte da decisão do operador nas regras de movimentação nos racks. Grosse et al. (2015) trazem uma importante análise sobre os fatores humanos em sistemas de armazenagem e como esses fatores influenciam no planejamento das regras de alocação. Assim como Grosse et al. (2015), Elbert et al. (2017) mostram os efeitos do comportamento humano em estoques, no entanto, com foco na interferência do operador na eficiência das regras de roteamento. O presente trabalho busca através da simulação diminuir a interferência do operador sobre a regra de alocação e retirada do sistema de armazenagem, como será visto com mais detalhes no decorrer desse texto.

### **2.3 Sistemas de Armazenagem de Produtos Perecíveis**

Segundo Ferreira et al. (2018), quando se trata de produtos perecíveis, o fator deterioração torna-se um agravante devido à vida útil dos produtos. Itens que possuem um tempo de vida útil máximo como carnes, frutas, legumes, trigo, pães, flores e sangue humano, por exemplo, são considerados produtos perecíveis (BEHZADI et al., 2018; LIU et al., 2018).

Existem quatro grandes áreas de pesquisa na literatura de gerenciamento de estoques para produtos perecíveis: políticas de pedidos (ordens de serviço), políticas de emissão, políticas de descarte e políticas de preços. A maioria das pesquisas estão na área de política de pedidos, o presente trabalho está associado a essa área pois o problema em questão é modelar as ordens de serviço (pedidos) no estoque de matéria-prima de produtos perecíveis (FERREIRA et al., 2018).

Modelagens de produtos perecíveis necessitam de uma boa combinação de dois fatores chave: demanda e taxa de deterioração do produto. Liu et al. (2018), por exemplo, desenvolveram um modelo de programação dinâmica para otimizar os pedidos e as realocações nos sistemas de armazenagem de indústrias agrícolas. Já Ferreira et al. (2018) utilizaram uma abordagem via Processos Markovianos para modelar a gestão de estoques de itens perecíveis em situações de emergências humanitárias.

Assim como Ge, Gray e Nolam (2015), Riad et al. (2018) mostram uma análise muito interessante para uma gestão eficiente de armazenagens de produtos perecíveis usando a *Internet of Things* (IoT), que, assim como a simulação, é um dos pilares da indústria 4.0 (LIN;

YANG, 2018). Behzadi et al. (2018) também mostram uma análise de trabalhos, que utilizam a simulação em sistemas de armazenagem de produtos perecíveis.

Zhu et al. (2014) trazem uma abordagem de otimização via FlexSim™ de um processo de um centro de distribuição de uma cadeia de frios. O artigo analisa os dados de saída para identificar os gargalos e inatividades do processo e, posteriormente, faz ajustes para que o sistema obtenha um resultado ótimo através do Experimenter do FlexSim™, o que o torna uma referência importante para a modelagem e simulação de processos semelhantes ao estudado por esse trabalho.

Keizer et al. (2017) propõem um projeto de redes logísticas para produtos perecíveis com taxa de decaimento heterogênea. Como o decaimento de produtos perecíveis, por exemplo, alimentos, muitas vezes não é uniforme, a heterogeneidade na degradação da qualidade do produto também deve ser considerada. Keizer et al. (2017) mostram como a restrição de perecibilidade dos produtos bem como sua heterogeneidade, podem ser integrados em um modelo de projeto de rede de suprimentos. Apesar de não considerar a taxa de decaimento, os produtos estudados pelo presente trabalho são heterogêneos e possuem restrições entre si, assim como em Keizer et al. (2017).

Ge, Gray e Nolan (2015) trazem uma interessante comparação entre modelos analíticos e soluções via simulação para a otimização de cadeias de suprimento na agricultura. Estes autores mostram que as especificações de sistemas complexos requerem que o modelo seja cada vez mais detalhista e que um modelo de simulação consiga considerar as incertezas e as variações do sistema de armazenagem de forma eficaz.

Os trabalhos analisados nessa revisão de literatura mostram a amplitude da aplicação de modelos matemáticos para o estoque de produtos perecíveis. Os problemas vão desde indústrias agrícolas e alimentícias, como Ge, Gray e Nolan (2015) até casos de emergências humanitárias e gestão hospitalar, como mostrado também por Guo et al. (2018) e Ünlüyurt e Tunçer (2016).

Embora os trabalhos supracitados sejam de grande relevância para a literatura, existem diversas restrições e hipóteses a serem consideradas devido à modelagem via modelos analíticos, como as probabilidades de estado constantes de um Processo Markoviano mostrado por Ferreira et al. (2018), por exemplo. Atualmente, assim como o presente trabalho, diversos autores identificam a simulação como uma ferramenta crucial para a modelagem de sistemas complexos.

Além de modelos de programação matemática como o de Liu et al. (2018), é fácil encontrar na literatura modelos de programação linear para o planejamento de cadeias de

suprimento de produtos perecíveis, como encontrado em Ivanov et al. (2016). Além disso, Fahimnia et al. (2015) trazem um importante *review* sobre modelos quantitativos para a gestão de riscos em cadeias de suprimentos, mostrando como são realizadas as estatísticas iniciais dos modelos, análises dos dados e métodos que vêm sendo aplicados na literatura.

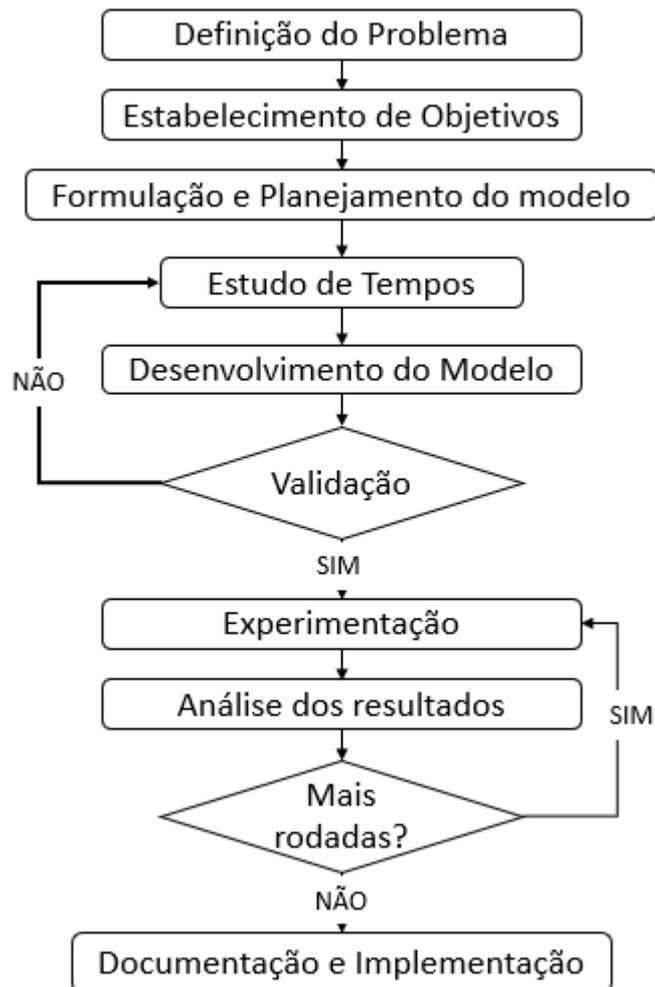
Ante à relevância dos problemas de alocação de produtos perecíveis, o presente trabalho busca melhorar o desempenho operacional e diminuir a movimentação de materiais em sistemas de estoque desses produtos. Para isso, assim como nos trabalhos de Ge, Gray e Nolam (2015), Guo et al. (2018), Liu et al. (2018), Sang e Liu (2015) e Zhu et al. (2014), este trabalho utiliza modelos de simulação para identificar eventuais problemas do sistema e propor soluções de melhoria de modo a mitigá-los ou mesmo extingui-los.

### 3 METODOLOGIA

Após definir o tema e o problema de estudo, o trabalho em questão utilizou técnicas de documentação direta para realizar uma pesquisa de campo com o intuito de coletar dados *in loco*. Além disso, também utilizou técnicas de observação direta intensiva para observação do sistema a fim de identificar e obter provas a respeito de objetos sobre os quais os gestores possuem apenas um conhecimento geral sobre o sistema.

Para o desenvolvimento do modelo de simulação, utilizou-se a seguinte abordagem para definir as etapas adequadas à natureza do problema, presentes em trabalhos como os de Banks et al. (2014), Sokolowski e Banks (2009), Zhu et al. (2014) e definidos também por Hillier e Lieberman (2015). A Figura 3 mostra as inter-relações entre as etapas.

Figura 3 – Inter-relações entre as etapas do Modelo



Fonte: adaptado de Banks et al. (2014)

### 3.1 Estudo de Tempos

Na etapa de coleta dos dados, foram realizadas medições dos tempos de alocação e retirada dos pallets nos seus respectivos níveis do rack. Para garantir que os dados coletados fossem representativos do sistema, foi realizado um planejamento detalhado do estudo de tempos.

Segundo Barnes (2009), o estudo de tempos é usado na determinação do tempo necessário para uma tarefa ser executada. Embora o estudo de tempos tenha seu foco na determinação dos tempos-padrão, ele é usado atualmente para outras finalidades como estabelecer programações, auxiliar o planejamento, calcular eficiências, ociosidades, entre outros. O estudo de tempos é um processo de amostragem e, conseqüentemente, quanto maior o número de ciclos, mais representativos serão os resultados obtidos para a atividade em estudo (MONTGOMERY; RUNGER, 2014). Algumas das fases definidas por Barnes (2009) e Greene (2013) foram usadas pelo presente trabalho para elaborar o estudo de tempos. Essas fases são mostradas a seguir.

#### 3.1.1 Registro das Informações Necessárias

Todas as informações que devem ser incluídas no estudo de tempo devem ser cuidadosamente registradas. Para o sistema em questão, informações como o número de ordens de serviço solicitadas pela operação ao sistema de armazenagem, número de funcionários, quantidade de baias e racks disponíveis, *modus operandi*, etc. foram consideradas nesse estudo.

#### 3.1.2 Divisão da Operação em Elementos

Uma das melhores maneiras de descrever uma operação é subdividi-la em um determinado número de elementos mensuráveis, tornando o estudo de tempos mais robusto. Deve-se, então, detalhar uma descrição completa do método observado.

A atividade estudada inicia-se com a alocação dos pallets com a matéria-prima nos racks e termina no momento em que o pallet é levado à linha de produção. As operações foram subdivididas em 6 elementos. O registro do método utilizado, assim como a quantidade de medições iniciais para cada elemento são descritos a seguir.

- Alocar o pallet no nível  $i$ :
  - Descrição do Método: registrar no cronômetro o tempo exato em que a empilhadeira se posiciona à frente do rack até o momento em que o seu garfo retorna à posição inicial;
  - Amostragem inicial: 10 ou mais ciclos para cada nível  $i$ ;

- Retirar o pallet do nível  $i$  ao ser solicitado:
  - Descrição do Método: registrar no cronômetro o tempo exato em que a empilhadeira se posiciona à frente do rack até o momento em que o pallet está fora do rack e o garfo da empilhadeira na posição inicial;
  - Amostragem inicial: 10 ou mais ciclos para cada nível  $i$ ;
- Colocar o pallet não usado no chão;
  - Descrição do Método: registrar no cronômetro o tempo desde que a empilhadeira retira o pallet do rack e começa a se movimentar para realocá-lo até o momento em que ela coloca o pallet no chão;
  - Amostragem inicial: 10 ou mais ciclos;
- Levar o pallet solicitado à operação:
  - Descrição do Método: registrar no cronômetro o tempo desde que a empilhadeira retira o pallet do rack, e leva-o à operação;
  - Amostragem inicial: 10 ou mais ciclos;
- Retornar ao rack:
  - Descrição do Método: registrar o tempo desde que a empilhadeira deixa o pallet na operação até retornar aos racks;
  - Amostragem inicial: 10 ou mais ciclos;
- Realocar no rack os pallets não solicitados e que foram movimentados;
  - Descrição do Método: registrar o tempo desde que a empilhadeira pega o rack no chão e os aloca na baia do rack;
  - Amostragem inicial: 10 ou mais ciclos;

### 3.1.3 Coleta e Registro dos Dados

Nesta fase, são coletados os dados necessários através de cronometragens. Para o presente trabalho, esses dados foram cronometrados presencialmente no local de estudo devido ao fato de os dados que a empresa dispunha para a análise eram apenas tempos médios e empíricos sobre a operação.

Para um modelo de simulação, isso pode ser um problema na fase de validação, podendo causar problemas quanto à representatividade do modelo em relação ao sistema real, de modo que se achou necessário realizar a coleta e registro dos tempos presencialmente e baseado em amostragens e métodos descritos por Barnes (2009), garantindo assim que os tempos coletados sejam representativos

### 3.1.4 Determinação do Número de Ciclos a Serem Cronometrados Inicialmente

O estudo de tempos é um processo de amostragem, ou seja, quanto maior o número de ciclos, mais representativos serão os resultados obtidos das atividades de estudo (MONTGOMERY; RUNGER, 2014). Para a determinação da amostragem inicial, utilizou-se o procedimento definido por Barnes (2009), o qual relata que para atividades com menos de 2 minutos de duração, é recomendável que a amostragem inicial tenha, ao menos, 10 medições.

### 3.1.5 Verificação do Número de Ciclos

O número de medidas a serem coletadas depende diretamente da variabilidade das medidas, da precisão desejada ( $\epsilon$ ) e do nível de confiança ( $\alpha$ ). O método utilizado para a quantidade de ciclos medidos necessária foi constatado segundo a seguinte fórmula definida por (Barnes, 2009), de forma a garantir 95% de confiança ( $\alpha$ ) de que o tempo real está  $\epsilon\%$  para mais ou para menos do valor médio obtido nas medições de tempo (BARNES, 2009; MONTGOMERY; RUNGER, 2014).

$$N = \left( \frac{TS}{\epsilon \bar{x}} \right)^2 \quad (3.1)$$

Em que:

$N$  = Número mínimo de ciclos que devem ser cronometrados;

$S$  = Desvio padrão amostral da amostra preliminar de tamanho  $n$ ;

$\epsilon$  = Precisão, ou seja, a variação admissível do tempo médio real em relação à média obtida na amostra, com a confiança desejável.

$T$  = Número obtido na tabela da distribuição *t-Student* com  $n - 1$  graus de liberdade na coluna 0,025 (cauda simples, equivalente a 0,05 com cauda dupla; uma vez que foi escolhida a confiança de 95%).

$\bar{x}$  = Média Amostral da amostra preliminar

## 3.2 Modelo de Simulação

Neste tópico, explica-se melhor as etapas necessárias para o desenvolvimento do modelo de simulação.

### 3.2.1 Definição e Planejamento do Problema

Esta é a principal etapa de um modelo de simulação. É nela em que são definidos o escopo e a formulação do problema, os objetivos do modelo, quais os meios que serão utilizados para

a sua modelagem, além de determinar o esboço do modelo conceitual (HILLIER e LIEBERMAN, 2015).

O presente trabalho tem como escopo a modelagem e simulação de um sistema de racks *Drive-in* composto por 12 ruas com 4 níveis e 6 baias, ou seja, um sistema que comporta até 288 pallets. Esses racks fazem parte do sistema de armazenagem de matéria-prima da planta industrial estudada e esse sistema abastece duas linhas de produção e a alocação e retirada dos pallets é definida pela necessidade da linha de produção e baseada na perecibilidade dos produtos, ou seja, para um mesmo tipo de produto, o mais perecível é retirado com prioridade.

O principal problema é que o rack *Drive-in* opera com a regra de alocação LIFO, ou seja, embora a prioridade de retirada seja do produto com maior perecibilidade e, conseqüentemente, com mais tempo armazenado no rack, a regra de alocação e retirada desse tipo de rack determina que o último item a entrar será o primeiro a sair, o que origina diversas perdas por movimentação de material toda vez que um pallet que está localizado na parte de trás do rack necessite ser retirado, o que é agravado devido à validade dos produtos, já que produtos próximos à data de validade precisam ser retirados primeiro, independente de onde estejam localizados no rack.

Como apresentado na Figura 1, nesse sistema, podem ocorrer casos em que para retirar o pallet, localizado no último nível e na última baia, seja necessário retirar todos os demais pallets devido ao fato de a empilhadeira precisa entrar no rack para retirar pallets localizados em posições mais profundas e os pallets à frente bloqueiam o acesso dela ao pallet que se deseja retirar. Como era de se esperar, para contornar casos extremos como esse, os operadores usam da sua experiência para realocar os pallets de modo que os produtos mais antigos fiquem o quanto mais à frente e em níveis mais baixos do rack. Todavia, por se tratar de uma indústria alimentícia, a alocação dos produtos no rack segue diversas normas sanitárias. Por exemplo, produtos do tipo alergênico não podem ser estocados acima nem ao lado de outros tipos de produtos.

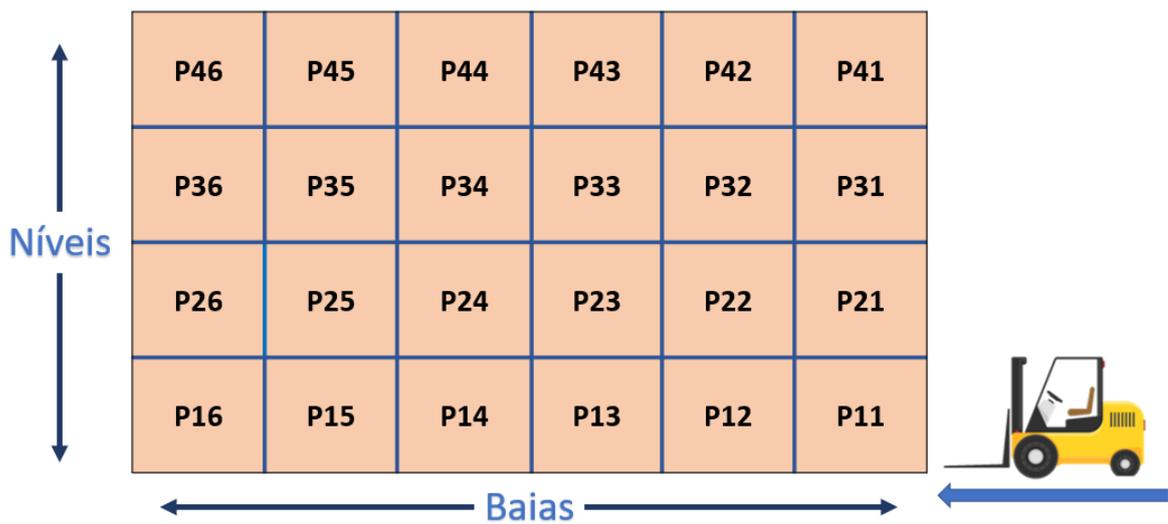
Dessa forma, para realizar a classificação dos produtos durante a realocação, o operador precisa considerar as restrições sanitárias, a perecibilidade e os tipos de produtos. Em um sistema onde uma única rua comporta 24 pallets, é bastante difícil determinar a alocação ideal para o rack. Além disso, ao realocar os pallets, é preciso registrar a mudança no sistema de controle da operação, o que resulta em diversos problemas de pallets que não foram registrados e constam no sistema que estão em uma posição diferente da que realmente estão.

Para contornar esses problemas, o presente trabalho avalia o desempenho de diferentes tipos de racks, confrontando as suas regras de alocação e avaliando quais dentre as opções é mais viável para a organização. Para isso, foi feito um gêmeo digital do sistema no FlexSim que simula o processo de alocação e remoção de racks com estratégias LIFO e FIFO. Isso será melhor explanado no próximo tópico. Para facilitar o entendimento, considera-se a seguinte notação para identificar a posição do pallet no rack:

$$P_{ij} = \text{posição do pallet no rack, em que: } i = \text{nível} ; j = \text{baia}$$

A Figura 4 exemplifica a representação descrita acima.

Figura 4 – Representação da notação de uma rua do rack



Fonte: essa pesquisa (2018)

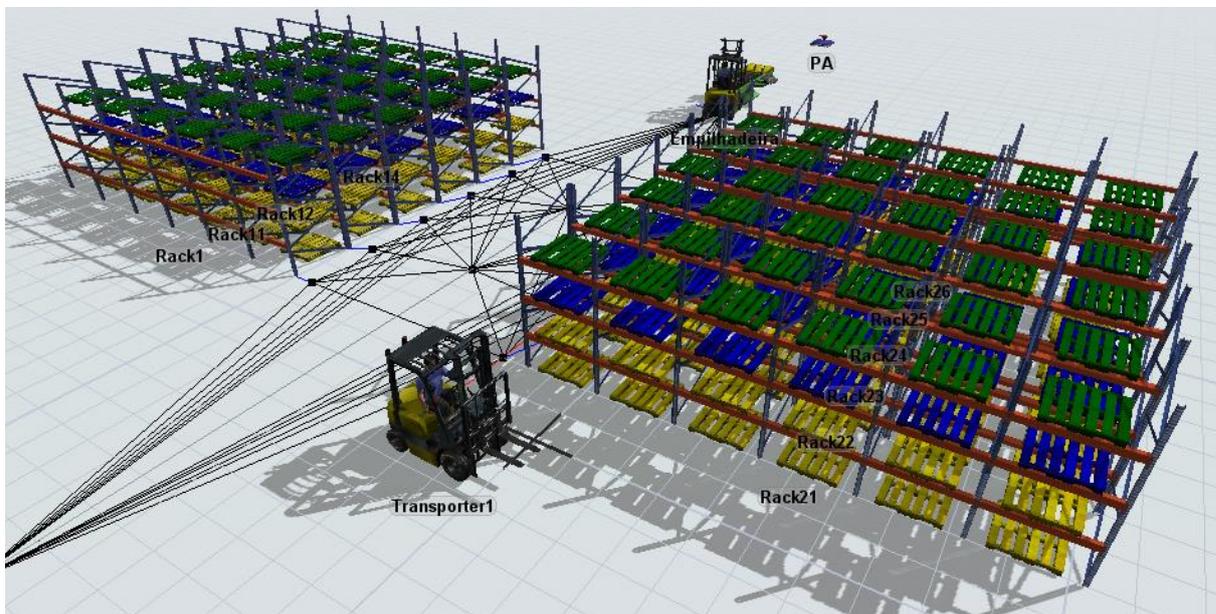
### 3.2.2 Formulação e Construção do Modelo

Esta é a etapa operacional do modelo de simulação. É aqui onde o modelo ganhará forma e será traduzido em linguagem de programação. Nesta fase, primeiramente, é realizada a coleta de dados aprofundada para definir as variáveis, componentes, relações, parâmetros da simulação (MIGUEL, 2011). Nessa etapa, parte-se de uma visão macro e depois incrementa-se sua complexidade passando a ter uma dimensão micro do sistema, sem exceder o nível de detalhamento necessário para alcançar os objetivos decididos na fase de planejamento (Allen, 2011). Zhu et al. (2014) relatam que modelos de simulação de eventos discretos devem definir as entidades do sistema com precisão usando diagramas de fluxo ou diagramas em rede, além de definir o modo de chegadas das entidades, a disciplina da fila, o modelo de serviço, entre outros.

O sistema atual possui uma disciplina LIFO. Existe outro sistema de armazenagem complementar ao estudado, que recebe os produtos dos caminhões e armazena em diversas pilhas de embalagens do tipo “Big Bag”. Desse modo, o sistema de racks é sempre alimentado por esse armazém, considerando assim que as chegadas do modelo de simulação são infinitas, ou seja, sempre há material para ser alocado nos racks.

As Figuras 5 e 6 ilustram o sistema atual estudado. Pode-se notar que as diferenças de cores entre os pallets simbolizam os tipos de produtos, sendo amarelo, azul e verde representantes dos produtos alergênico tipo 1, alergênico tipo 2 e não alergênico, respectivamente. Existem restrições entre esses tipos de produtos. O material alergênico (tipo 1 ou 2) não pode ser estocado acima nem no mesmo nível de outro tipo de produto. Desse modo, considerou-se que o material não-alergênico (representado na cor verde) é alocado no nível mais alto do rack, o nível 4, ou seja, ele ocupa as posições  $P_{41}, P_{42}, \dots, P_{46}$ .

*Figura 5 - Layout do modelo de simulação*



*Fonte: essa pesquisa (2018)*

Figura 6 - Rack Drive-in



Fonte: Jungeinrich (2018)

Na mesma instalação, existem outros tipos de racks. Dentre eles, o rack tipo *PushBack*, o qual possui roletes na sua base e tem um declive entre 3 e 5 graus em geral. Nesse tipo de sistema, se já houver pallets alocados em um nível do rack, o novo pallet a ser alocado terá que empurrar a unidade anteriormente depositada contra a inclinação. Esse tipo de rack também possui a lógica LIFO para cada nível. Porém, por se tratar de um sistema onde ao retirar um pallet da posição  $P_{31}$  como mostrado na Figura 7, o pallet que estava anteriormente na posição  $P_{32}$  descera para a posição  $P_{31}$  por gravidade.

Figura 7 - Rack PushBack



Fonte: Jungeinrich (2018)

Dessa forma, além de ter um tempo médio de alocação e retirada menor que o rack *drive-in* devido ao fato que a empilhadeira precisa apenas colocar o pallet na primeira posição do rack, para retirar um pallet da posição  $P_{46}$ , no *PushBack*, por exemplo, serão necessários remover apenas os pallets em posições à frente dele no mesmo nível ( $P_{45}, P_{44}, P_{43}, P_{42}$  e  $P_{41}$ ), enquanto no *drive-in*, além dos pallets no mesmo nível, todos os pallets abaixo também precisam ser removidos, já que a empilhadeira precisa entrar no rack para retirar o pallet. Durante o dia são necessários retirar, em média, 41 produtos do sistema *drive-in* e leva-los à operação.

Visto isso, para coletar a quantidade de tempos necessária para representar a retirada de cada uma das 24 posições dos racks, seriam necessários vários dias de coleta dos dados ou até mesmo semanas para realizar a coleta. Para contornar esse problema, foi realizado um estudo de tempos onde apenas os tempos de alocação e retirada para cada nível foi considerado, sob a hipótese de que a variação entre os tempos de retiradas para cada baía do nível é modelada por uma distribuição de probabilidade, o que será visto com detalhes no próximo tópico.

### 3.2.3 Coleta de Dados

Difícilmente, dispõe-se de um banco de dados que contenha todas as informações necessárias ao modelo. Quanto mais complexo o modelo de simulação, mais dados sobre o sistema real são necessários. Como citado anteriormente, devido ao alto fluxo de retiradas e às

288 posições disponíveis dos racks, esta fase pode levar um tempo razoável para ser realizada. Hillier e Lieberman (2015) ainda afirmam que uma coleta de fatos fundamentais, informações e estatísticas são necessárias antes de realizar a coleta dos dados do processo.

Para o problema em questão, primeiramente, foram coletados dados brutos sobre o desempenho do sistema, assim como o tempo médio de alocação e remoção constante para todas as posições do rack, tempos de movimentação e velocidade da empilhadeira. Após verificar com os responsáveis pelo processo que a modelagem desenvolvida correspondia ao sistema real, foi realizada uma coleta dos tempos reais de alocação e retirada dos pallets nos racks.

Todavia, seria inviável financeira e operacionalmente coletar os tempos relativos às alocações e remoções das 24 posições das ruas do rack *drive-in* pois, segundo Barnes (2009), para atividades com menos de 2 minutos, o ideal é que a coleta inicial tenha, ao menos, 10 medições. Para isso, seriam necessárias 480 medições (10 alocações e 10 remoções para cada uma das 24 baias do rack).

O problema é que para garantir que cada baia possua as 20 medições necessárias, seriam necessários vários dias observando o processo ou teríamos que forçar o operário a retirar os pallets do rack apenas para coletar os tempos, o que é inviável financeiramente. Por exemplo, o pallet localizado na posição  $P_{46}$  (nível 4, baia 6) raramente é movimentado, já que esta é a posição mais profunda do rack e sua movimentação depende da retirada de todos os pallets à sua frente, o que leva bastante tempo para acontecer no dia-a-dia da operação. Em geral, esses racks são forçados a serem removidos devido à sua data de validade ser mais próxima da data de outros pallets à frente.

Para contornar esse problema, a modelagem considerou que os tempos seriam coletados por níveis e não para cada baia e, dessa forma, seria viável econômica e operacionalmente realizar uma análise estatística de modo a encontrar uma distribuição de probabilidade que se ajuste aos dados coletados e represente com precisão a variabilidade de cada nível do *drive-in*. Para o rack *PushBack*, todos os pallets são removidos de posições  $P_{i1}$ , ou seja, para cada nível, também se tem apenas uma atividade coletada.

Para realizar a coleta dos dados de tempo necessários para o modelo, utilizou-se a técnica de cronometragem *in loco* através de um aplicativo de cronometragem múltipla disponível gratuitamente, o SportsTimer Lite™. Feita a cronometragem, os dados foram compartilhados na nuvem em arquivos de texto, os quais foram adicionados à uma base de dados idealizada por

essa dissertação em formato de planilha do Excel. Dado isso, os resultados do estudo de tempos descrito no tópico 3 para o rack *drive-in* são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados para o estudo de tempos do sistema atual (Rack Drive-in)

<b>Rack Drive-in – Alocação no rack</b>				
	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>	<b>Nível 4</b>
<b>Média (<math>\bar{x}</math>)</b>	25,5	35,81	59,85	77,16
<b>Desvio Padrão (s)</b>	11,951	10,34	19,63	21,10
<b>Tamanho da amostra preliminar</b>	12	11	14	12
<b>Valor T</b>	2,200	2,228	2,160	2,20
<b>Erro (<math>\epsilon</math>)</b>	0,2	0,2	0,2	0,2
<b>Tamanho da amostra necessário</b>	27	11	13	10
<b>Rack Drive-in – Remoção do rack</b>				
	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>	<b>Nível 4</b>
<b>Média (<math>\bar{x}</math>)</b>	28,2	36,4	41,1	52,83
<b>Desvio Padrão (s)</b>	13,389	13,953	12,00	16,54
<b>Tamanho da amostra preliminar</b>	10	10	10	12
<b>Valor T</b>	2,262	2,262	2,262	2,200
<b>Erro (<math>\epsilon</math>)</b>	0,2	0,2	0,2	0,2
<b>Tamanho da amostra necessário</b>	29	19	11	12

Fonte: essa pesquisa (2018)

Assim como feito para o sistema atual (Rack *Drive-in*), também foi feita uma coleta para os racks do tipo *PushBack* que também eram utilizados na planta industrial em outra operação. Como todos os volumes são paletizados, considerou-se que o tamanho e o peso dos produtos para os dois tipos de racks são o mesmo, logo, os tempos de alocação e remoção do rack *PushBack* podem ser utilizados para uma futura análise comparativa com o rack *Drive-in*, embora seja de outra operação e o rack *PushBack* estudado tenha apenas 3 níveis. Os dados do estudo de tempos feito para o rack *PushBack* estão na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados para o estudo de tempos do rack PushBack

<b>Rack PushBack – Alocar no rack</b>			
	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>
<b>Média (<math>\bar{x}</math>)</b>	16,8	18,6	26,5
<b>Desvio Padrão (s)</b>	5,34	2,17	3,27
<b>Tamanho da amostra preliminar</b>	10	10	10
<b>Valor T</b>	2,262	2,262	2,262
<b>Erro (<math>\epsilon</math>)</b>	0,2	0,1	0,1
<b>Tamanho da amostra necessário</b>	13	7	8
<b>Rack PushBack – Remoção do rack</b>			
	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>
<b>Média (<math>\bar{x}</math>)</b>	16,17	19,3	28,4
<b>Desvio Padrão (s)</b>	4,11	3,65	4,69
<b>Tamanho da amostra</b>	12	10	10
<b>Valor T</b>	2,200	2,262	2,262
<b>Erro (<math>\epsilon</math>)</b>	0,2	0,15	0,12
<b>Tamanho da amostra necessário</b>	8	9	10

Fonte: essa pesquisa (2018)

Vale salientar que para o rack *PushBack*, o erro em relação a média é variável, pois para essa medição a variabilidade dos dados é menor, podendo ser considerados erros que variam entre 10% e 20%, ao contrário do rack *Drive-in* cujo erro é constante e igual a 20%. Outro detalhe importante é que o tempo de alocação para o nível 1 de ambos os racks necessita de mais amostras para serem aprovados no estudo de tempos, porém, devido a impossibilidade de coleta de novos dados, considerou-se que os tempos coletados são representativos com um erro maior.

Em geral, os tempos de alocação e retirada de níveis mais altos necessitam de menos amostras para a representatividade dos dados. Isso se dá pois o coeficiente de variação ( $S/\bar{x}$ ) é

maior para os tempos de níveis mais baixos do rack, de modo a necessitar de mais amostras para os primeiros níveis do rack (MONTGOMERY & RUNGER, 2014)

Além disso, por ser necessário remover os pallets à frente para retirar o pallet selecionado, é necessário considerar-se também o tempo de movimentação desses pallets ao serem realocados em frente ao rack. Essa atividade no Drive-in foi separada em duas partes de acordo com a distância que a empilhadeira precisa percorrer para guardar temporariamente esses pallets: Próximo ao rack; distante do rack. Para o rack *PushBack*, foi considerado apenas um tempo pois na operação estudada, existe um espaço para essa movimentação de materiais. A Tabela 3 mostra os tempos para essas movimentações.

*Tabela 3 - Tempos de movimentação dos pallets movidos desnecessariamente*

<b>Tempo de movimentação dos pallets movidos desnecessariamente</b>			
	<b>Drive-in (Perto)</b>	<b>Drive-in (Longe)</b>	<b>Push-Back</b>
<b>Média (s)</b>	14.83	45.89	21.32
<b>Desvio Padrão (s)</b>	3.417	3.91	2.84
<b>Tamanho da amostra</b>	18	19	14
<b>Valor T</b>	2.109	2.101	2.160
<b>Erro (<math>\epsilon</math>)</b>	0.12	0.1	0.1
<b>Tamanho da amostra necessário</b>	17	4	9

*Fonte: essa pesquisa (2018)*

### 3.2.4 Testes de Aderência

Para utilizar os dados de tempo dos subprocessos coletados e conferidos pelo estudo de tempos, foram realizados testes de aderência a distribuições de probabilidade. Isso possibilita que os tempos dos processos no modelo sejam gerados através das distribuições que mais se adequam aos dados, o que se traduz em um comportamento mais próximo do real. Esse teste foi feito por intermédio da ferramenta de análise de dados do FlexSim™, ExpertFit. É importante salientar que todas as distribuições de probabilidade foram aprovadas em três testes de aderência: Anderson-Darling, Kolmogorov-Smirnov e Chi-Square (MONTGOMERY; RUNGER, 2014). A Tabela 4 traz as distribuições de probabilidades para cada atividade do rack *drive-in* com a nomenclatura do FlexSim™. Análogo ao teste feito para o *drive-in*, a Tabela 5 mostra o resultado do teste de aderência feito para as atividades do rack *PushBack*.

Tabela 4 - Resultados do teste de aderência para o rack drive-in

<b>Rack drive-in – Resultados do teste de aderência</b>	
<b>Atividade</b>	<b>Distribuição de Probabilidade</b>
<b>Colocar o pallet no nível 1</b>	<b>Johnson Bounded</b> (10.665, 46.216, 0.270, 0.470)
<b>Colocar o pallet no nível 2</b>	<b>Johnson Bounded</b> (23.911, 78.453, 1.333, 0.806)
<b>Colocar o pallet no nível 3</b>	<b>Log-Logistic</b> (0.000, 57.189, 5.526)
<b>Colocar o pallet no nível 4</b>	<b>Beta</b> (1.410, 109.810, 3.732, 1.608)
<b>Retirar o pallet do nível 1</b>	<b>Johnson Bounded</b> (11.945, 97.493, 1.661, 0.944)
<b>Retirar o pallet do nível 2</b>	<b>Beta</b> (19.549, 57.309, 0.522, 0.637)
<b>Retirar o pallet do nível 3</b>	<b>Beta</b> (24.108, 63.082, 0.873, 1.129)
<b>Retirar o pallet do nível 4</b>	<b>Beta</b> (23.577, 75.345, 0.926, 0.710)
<b>Realocar o pallet da frente (perto)</b>	<b>Johnson Bounded</b> (9.962, 19.593, 0.008, 0.442)
<b>Realocar o pallet da frente (longe)</b>	<b>Beta</b> (37.328, 61.100, 2.959, 5.257)

Fonte: essa pesquisa (2018)

Tabela 5 – Resultados do teste de aderência para o rack PushBack

<b>Rack PushBack – Resultados do teste de aderência</b>	
<b>Atividade</b>	<b>Distribuição de Probabilidade</b>
<b>Colocar o pallet no nível 1</b>	<b>Beta</b> (10.952, 25.513, 0.405, 0.609)
<b>Colocar o pallet no nível 2</b>	<b>Johnson Bounded</b> (12.311, 23.674, -0.301, 1.211)
<b>Colocar o pallet no nível 3</b>	<b>Beta</b> (18.152, 35.859, 3.519, 3.934)
<b>Colocar o pallet no nível 4</b>	<b>Johnson Bounded</b> (31.633, 38.451, 0.022, 0.672)
<b>Retirar o pallet do nível 1</b>	<b>Weibull</b> (7.610, 9.416, 2.000)
<b>Retirar o pallet do nível 2</b>	<b>Johnson Bounded</b> (14.690, 25.237, 0.185, 0.465)

Rack PushBack – Resultados do teste de aderência	
Atividade	Distribuição de Probabilidade
Retirar o pallet do nível 3	<i>Log-logistic</i> (0.000, 28.167, 11.187)
Retirar o pallet do nível 4	<i>Weibull</i> (0.000, 38.690, 9.094)
Realocar o pallet da frente	<i>Johnson Bounded</i> (17.095, 24.608, -0.183, 0.350)

Fonte: essa pesquisa (2018)

### 3.2.5 Implementação e Validação do Modelo

O potencial dos resultados que podem ser obtidos via simulação levou o presente trabalho a adotar o FlexSim™ como ferramenta de implementação do modelo estudado. A validação deve confirmar a representatividade do modelo quando comparado ao sistema real através de testes e comparações com parâmetros conhecidos, como será mostrado a seguir.

Para facilitar o entendimento da implementação do modelo de simulação, é importante definir alguns conceitos, elementos e lógicas de modelagem no FlexSim™. No decorrer deste tópico, serão introduzidos os conceitos fundamentais e as lógicas implementadas para simular o sistema de racks estudado. Dentre os principais conceitos do FlexSim™, citam-se:

- I. ***Chegadas***: Definem o modo, a frequência e a quantidade de produtos que chegam no sistema em determinado instante de tempo. As chegadas podem ser aleatórias ou pré-determinadas na construção do modelo.
- II. ***FlowItens***: objetos, pessoas ou informações que são transformados no decorrer da simulação. No presente trabalho, esses recursos são os pallets com a matéria-prima que serão movimentados nos racks.
- III. ***Fixed Resources***: são os objetos que simulam os locais físicos onde acontecem as alterações nas variáveis do sistema. Neste trabalho, os racks, por exemplo, são considerados como locais. Além disso, alguns *Fixed Resources* foram introduzidos no modelo para forçar alterações nos *FlowItens* e auxiliar na modelagem dos racks. Os *Fixed Resources* do modelo construído são:
  - ***Source***: além de gerar as chegadas dos pallets no modelo, o *source* foi usado para gerar variáveis aleatórias entre 0 e 1 que são usadas para a geração dos cenários da simulação.
  - ***Queue***: o *queue* tem uma função muito importante no modelo de simulação do FlexSim™, além de simular filas e o estoque inicial do sistema em estudo,

ele também foi usado para receber as variáveis aleatórias criadas no *source* e gerar os cenários aleatórios para a simulação.

- **Separator:** o *separator* foi usado para duplicar os pallets com as variáveis geradas aleatoriamente de modo que os dois tipos de racks (*Drive-in* e *PushBack*) recebessem os itens com as mesmas restrições, ou seja, ele garante que o mesmo cenário é simulado em ambos os racks em uma mesma replicação da simulação.
- **Rack:** como era de se esperar, eles foram usados para simular os racks *Drive-in* e *PushBack*. Através de lógicas inseridas nas funções de alocação e remoção do rack, foi possível através de modelos do módulo *Process Flow* do FlexSim™ que as restrições entre os tipos diferentes de produtos fossem respeitadas na alocação.

- IV. **Mobile Resources:** São todos os objetos que se movem através do modelo para executar tarefas definidas por algum *Fixed Resource*, como Empilhadeiras, operadores, robôs, elevadores, etc. Nesse projeto, a empilhadeira é um recurso importante do modelo de simulação pois nela serão simulados os tempos de alocação e remoção a depender do local do rack que o pallet será retirado.
- V. **Conexões:** são mecanismos de evolução da simulação, ou seja, as conexões definem o fluxo dos *flowitens* no modelo de simulação, além disso, elas também definem vínculos entre *Fixed* e *Mobile Resources*.
- VI. **Process Flow:** Módulo avançado do FlexSim™ que permite que sejam criadas regras avançadas e sequências de tarefas complexas. Para o presente projeto, o *Process Flow* foi usado para criar as restrições entre os tipos de produtos na alocação do rack, por exemplo, quando um tipo não pode ser alocado no mesmo nível que outro por restrições sanitárias.
- VII. **Global Tables:** basicamente, são planilhas que facilitam a gestão de dados de entrada e saída do modelo. Nesse trabalho, usou-se *global tables* para salvar as restrições entre os produtos.
- VIII. **Statistic Collector:** ferramenta que permite a geração de dados de saída do modelo de modo flexível e robusto. Através dele, pôde-se gerar os dados de saída que serão analisados nos resultados da simulação.
- IX. **Experimenter:** ferramenta avançada de geração de experimentos e para a otimização de problemas encontrados na simulação. Nesse trabalho, usou-se o *Experimenter* para

gerar as replicações do modelo, tal como a geração de gráficos de variáveis selecionadas no modelo.

- X. *User Commands*: Essa ferramenta permite que lógicas de programação avançadas programadas em C++ sejam inseridos na simulação. Para este trabalho, utilizou-se dessa ferramenta para gerar a análise comparativa e os dados para cada replicação feita no *Experimenter*.

Visto isto, podemos então descrever a modelagem do problema no FlexSim™. O problema inicia na chegada de matéria-prima na fábrica, todavia, por existir um estoque anterior aos racks, considerou-se que as chegadas do modelo são infinitas. Após isso, 4 sources classificam os tipos de itens como Alergênico Tipo 1, Alergênico Tipo 2 ou Não-Alergênico.

Para gerar os cenários aleatórios, quatro *queues* são usados para gerar variáveis aleatórias uniformes entre 1 e 6 cuja função é determinar a quantidade de itens que serão alocados ou removidos dos racks. Cada *queue* é responsável por um nível do racks. Através disso, a cada replicação geram-se cenários aleatórios de ordens de serviço. Além disso, o modelo também é capaz de gerar resultados para ordens de serviço reais caso se queira analisar um caso específico, como será visto mais adiante no capítulo 4 desta dissertação.

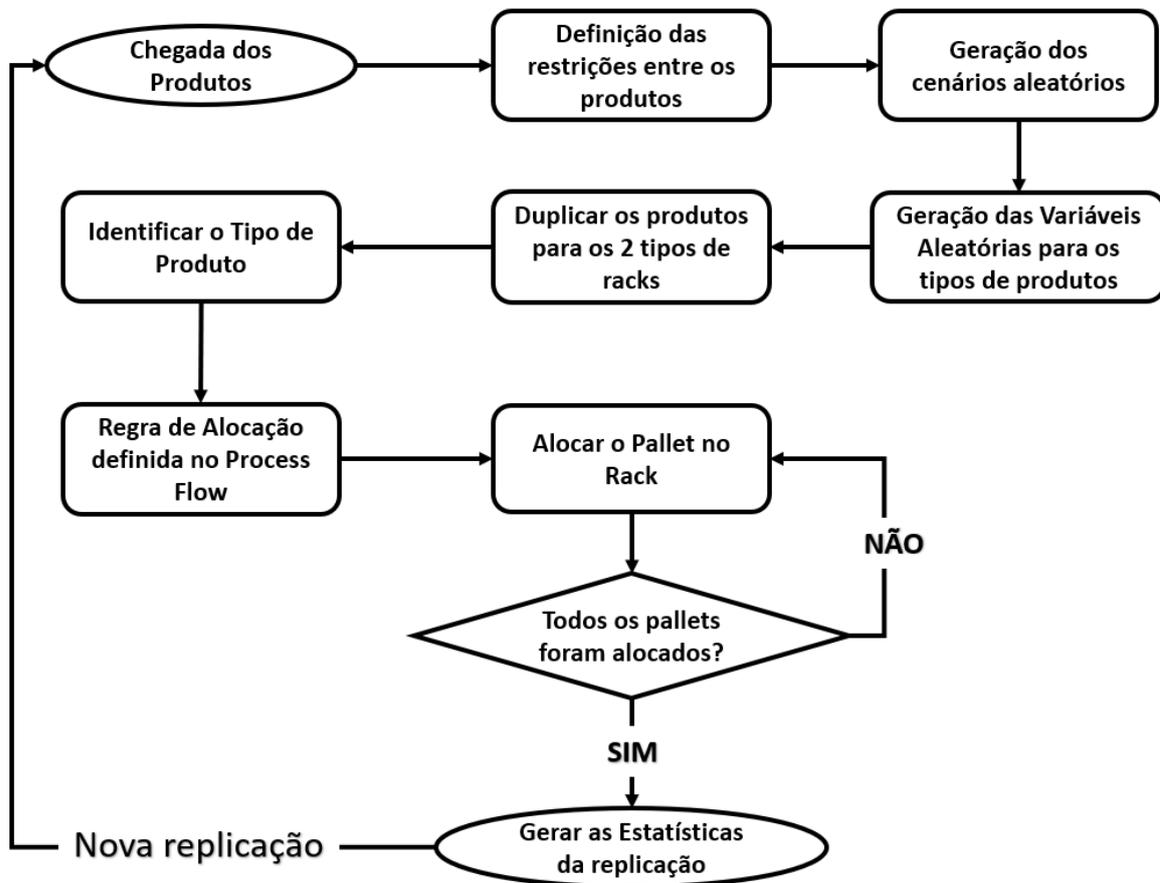
Após gerar os cenários aleatórios, quatro *separators* foram usados para duplicar os cenários para os dois tipos de racks analisados, de modo que a mesma replicação gere os dados do mesmo cenário para cada rack, facilitando assim a análise dos resultados. Para modelar as restrições dos produtos, foram feitos dois modelos no *process flow*, os quais determinam, a depender do tipo de produto e suas restrições em qual nível do rack ele será alocado.

A empilhadeira recebe essa informação e aloca ou remove o pallet selecionado, a depender da situação desejada com o tempo de alocação ou remoção específico para cada nível. Além disso, também é considerado no modelo o tempo necessário para que a empilhadeira vá ao estoque inicial buscar os pallets a serem alocados e o tempo da movimentação dos pallets durante a remoção do rack.

Para gerar os dados de saída do modelo três ferramentas foram usadas: *Statistic Collector*, *Experimenter* e *User Commands*. O *Statistic Collector* é usado para recolher informações como tempo médio de alocação, utilização da empilhadeira e tempo total de cada cenário. Por exemplo, para cada replicação do modelo. O *Experimenter* é usado para o mesmo propósito, porém, além de gerar as replicações, ele agrupa os dados de todas as replicações do modelo. Por fim, foi usado um *script* no *User Commands* para coletar as estatísticas geradas

pelo *Experimenter* e salvar em planilhas do Excel™. A Figura 8 traz a representação da modelagem descrita.

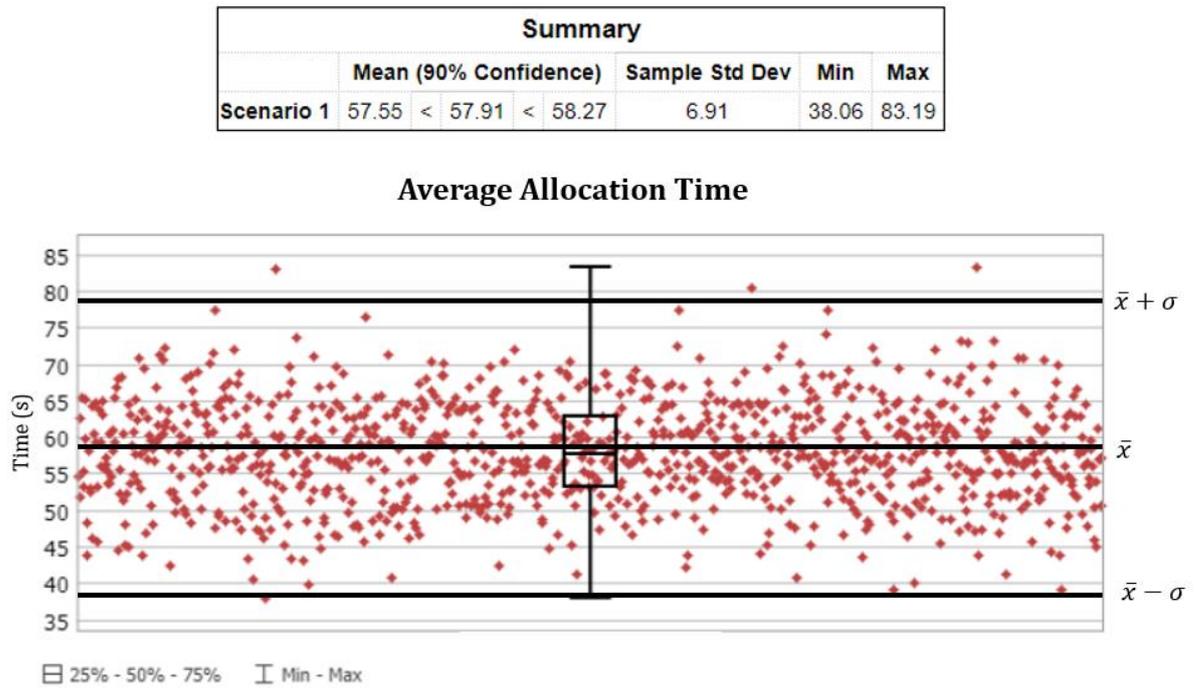
Figura 8 - Representação da modelagem



Fonte: essa pesquisa (2018)

Para realizar a validação dos resultados da simulação, foram gerados no *Experimenter* relatórios que mostram os dados dos resultados de cada replicação da simulação. Para realizar a validação, o modelo foi replicado 1000 vezes. O parâmetro considerado para a validação do modelo foi o tempo médio de alocação no rack e para verificar se os resultados do modelo coincidem com o sistema real, uma amostra piloto foi coletada, a qual tem média  $\bar{x} = 58,16s$  e desvio-padrão  $\sigma = 21,22s$  para o caso do rack *Drive-in*. A alta variabilidade desse parâmetro se dá devido à diferença do tempo de alocação para cada nível do rack. Cada ponto na Figura 9 representa uma replicação e, apesar de alguns *outliers*, pode-se observar que a maioria dos resultados está dentro da variabilidade real do sistema.

Figura 9 - Gráfico de dispersão do tempo médio de alocação no rack Drive-in



Fonte: esta pesquisa (2018)

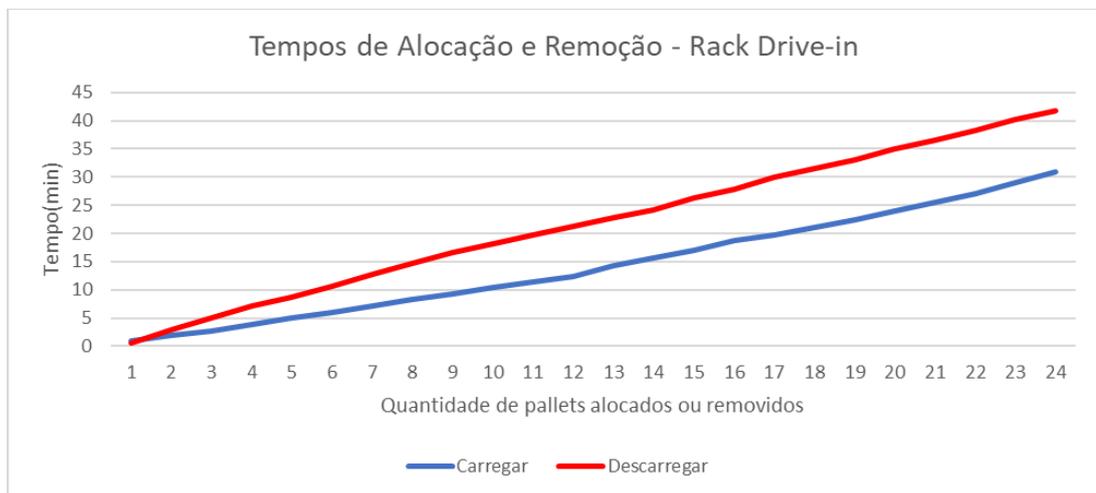
Após realizar o estudo de tempos e a construção e validação do modelo de simulação para o caso real supracitadas nesse capítulo, é possível rodar o modelo de simulação, coletar seus dados para identificar os problemas do sistema e possíveis soluções e cenários de melhoria.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como já falado anteriormente, o sistema de armazenagem atual da planta industrial estudada, é formado por 12 ruas do tipo drive-in com 4 níveis e 6 baias, totalizando 288 possíveis posições para alocar os pallets. Para o modelo de simulação, considerou-se que as chegadas do modelo são infinitas, ou seja, sempre existem pallets a serem alocados nos racks. Nesse sistema, a empilhadeira opera em apenas uma rua por vez. Logo, para realizar a análise, considera-se a simulação de ordens de serviço para uma das ruas, que possui 24 baias.

A Figura 10 mostra dois casos muito comuns na prática. No primeiro, o rack está completamente vazio e começa a ser preenchido com os pallets e, no segundo, acontece o procedimento oposto, ou seja, o rack está cheio e precisa ser esvaziado. Pode-se notar no gráfico que a alocação dura cerca de 30 minutos e a remoção, por ser um processo mais delicado, dura cerca de 40 minutos. Vale salientar que para as análises feitas não são consideradas variações do processo como paradas, por exemplo.

Figura 10 - Remoção dos pallets - Rack *drive-in*



Fonte: essa pesquisa (2018)

Como forma de exemplificar o funcionamento do *Drive-in*, foram testados 7 cenários reais para análise e posterior comparação com o rack *PushBack*. Esses cenários modelam diferentes combinações de ordens de serviço, forçando situações que podem ser encontradas na planta industrial e são mostrados na Tabela 6. Objetiva-se com esses casos analisar casos extremos como o cenário 2 que precisa que praticamente todos os pallets sejam removidos a casos mais simples, como o cenário 3 no qual o operador só precisa remover os pallets que foram solicitados na operação.

Tabela 6 - Cenários Simulados

<b>Cenários Simulados</b>	<b>Pallets a serem removidos</b>
<b>Cenário 1</b>	P35, P23, P12, P13, P14
<b>Cenário 2</b>	P46, P45, P36
<b>Cenário 3</b>	P31, P21, P22, P11
<b>Cenário 4</b>	P32, P21, P24, P23
<b>Cenário 5</b>	P16, P13, P12, P35
<b>Cenário 6</b>	P13, P23, P33
<b>Cenário 7</b>	P31, P32, P33, P34

*Fonte: essa pesquisa (2018)*

A Figura 11 é uma representação visual dos cenários, onde as baias destacadas em vermelho representam os pallets a serem removidos por conta de uma ordem de serviço e as guias destacadas em amarelo são os pallets que não foram solicitados na ordem de serviço, mas precisam ser movidos para retirar os pallets requeridos.

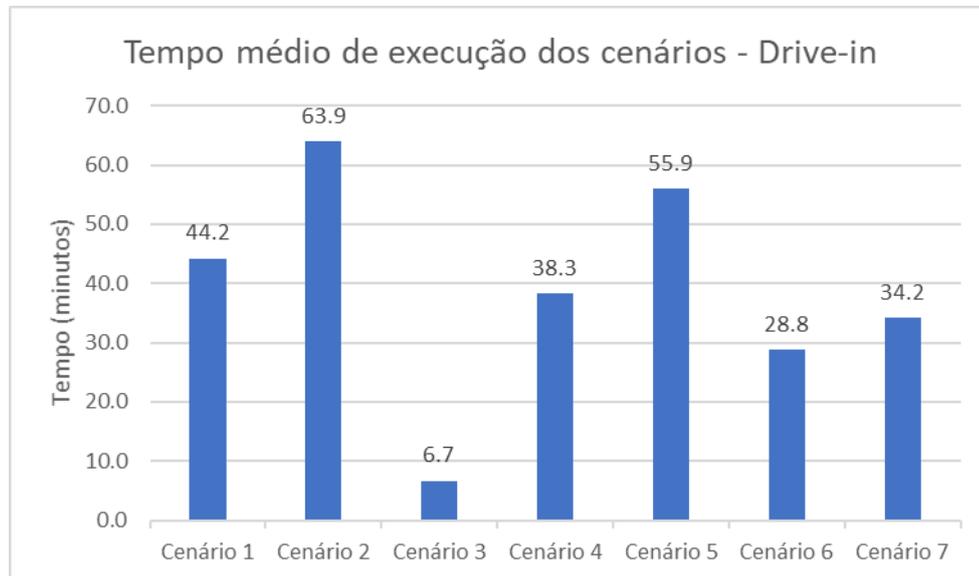
Figura 11- Diagrama representativo dos cenários simulados para uma rua do rack drive-in

<b>Cenário 1</b> <b>Drive-In</b>	P46	P45	P44	P43	P42	P41	
	P36	P35	P34	P33	P32	P31	
	P26	P25	P24	P23	P22	P21	
	P16	P15	P14	P13	P12	P11	
<b>Cenário 2</b> <b>Drive-In</b>	P46	P45	P44	P43	P42	P41	
	P36	P35	P34	P33	P32	P31	
	P26	P25	P24	P23	P22	P21	
	P16	P15	P14	P13	P12	P11	
<b>Cenário 3</b>	P46	P45	P44	P43	P42	P41	
	P36	P35	P34	P33	P32	P31	
	P26	P25	P24	P23	P22	P21	
	P16	P15	P14	P13	P12	P11	
<b>Cenário 4</b>	P46	P45	P44	P43	P42	P41	
	P36	P35	P34	P33	P32	P31	
	P26	P25	P24	P23	P22	P21	
	P16	P15	P14	P13	P12	P11	
<b>Cenário 5</b>	P46	P45	P44	P43	P42	P41	
	P36	P35	P34	P33	P32	P31	
	P26	P25	P24	P23	P22	P21	
	P16	P15	P14	P13	P12	P11	
<b>Cenário 6</b>	P46	P45	P44	P43	P42	P41	
	P36	P35	P34	P33	P32	P31	
	P26	P25	P24	P23	P22	P21	
	P16	P15	P14	P13	P12	P11	
<b>Cenário 7</b>	P46	P45	P44	P43	P42	P41	
	P36	P35	P34	P33	P32	P31	
	P26	P25	P24	P23	P22	P21	
	P16	P15	P14	P13	P12	P11	

Fonte: essa pesquisa (2018)

Foram geradas 20 replicações para cada cenário. Os tempos médios de execução para são mostrados na Figura 12. Pode-se observar que existem casos, que ultrapassam ou se aproximam de uma hora de duração como os cenários 2 e 5, o que é insatisfatório operacional e financeiramente para a empresa, que precisa disponibilizar recursos e pessoal para essa movimentação.

Figura 12 - Resultado da simulação dos cenários para o drive-in



Fonte: essa pesquisa (2018)

Para analisar a robustez e o desempenho operacional do sistema adotado atualmente pela organização, os mesmos cenários foram testados para o rack do tipo *PushBack*. Por não haver como coletar dados para o nível 4 no sistema estudado, devido ao fato que os racks *PushBacks* do sistema de armazenagem estudado possuem no máximo 3 níveis, adotou-se uma estimativa conservadora que o tempo de alocação do nível 4 é igual à soma dos tempos dos níveis 1 a 3 ponderados por um fator de correção, igual a soma dos tempos dos níveis 2 e 3 dividido por uma constante  $c = 1.3$ , de modo que tenhamos uma boa estimativa de tempo para o nível 4. Desta forma, a Figura 13 traz uma representação visual dos pallets que necessitam ser removidos e movimentados nos respectivos cenários para o rack *PushBack*.

Na Figura 13, observa-se que a quantidade de pallets que precisam ser movimentados para remover os pallets selecionados pela ordem de serviço cai drasticamente. Para os 7 cenários, foi imprescindível mover desnecessariamente 78 pallets para o rack *Drive-in*. Já no rack *PushBack*, foi preciso mover apenas 33 pallets, uma redução de 42.3%.

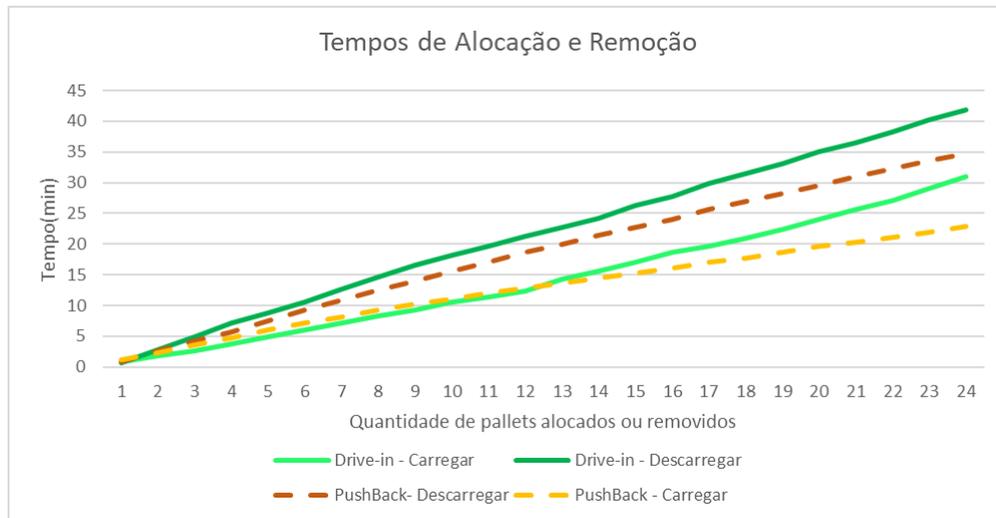
Figura 13 - Diagrama representativo dos cenários simulados para o rack PushBack

<b>Cenário 1</b>	P46	P45	P44	P43	P42	P41	
	P36	P35	P34	P33	P32	P31	
	P26	P25	P24	P23	P22	P21	
	P16	P15	P14	P13	P12	P11	
<b>Cenário 2</b>	P46	P45	P44	P43	P42	P41	
	P36	P35	P34	P33	P32	P31	
	P26	P25	P24	P23	P22	P21	
	P16	P15	P14	P13	P12	P11	
<b>Cenário 3</b>	P46	P45	P44	P43	P42	P41	
	P36	P35	P34	P33	P32	P31	
	P26	P25	P24	P23	P22	P21	
	P16	P15	P14	P13	P12	P11	
<b>Cenário 4</b>	P46	P45	P44	P43	P42	P41	
	P36	P35	P34	P33	P32	P31	
	P26	P25	P24	P23	P22	P21	
	P16	P15	P14	P13	P12	P11	
<b>Cenário 5</b>	P46	P45	P44	P43	P42	P41	
	P36	P35	P34	P33	P32	P31	
	P26	P25	P24	P23	P22	P21	
	P16	P15	P14	P13	P12	P11	
<b>Cenário 6</b>	P46	P45	P44	P43	P42	P41	
	P36	P35	P34	P33	P32	P31	
	P26	P25	P24	P23	P22	P21	
	P16	P15	P14	P13	P12	P11	
<b>Cenário 7</b>	P46	P45	P44	P43	P42	P41	
	P36	P35	P34	P33	P32	P31	
	P26	P25	P24	P23	P22	P21	
	P16	P15	P14	P13	P12	P11	

Fonte: essa pesquisa (2018)

Além disso, como mostrado anteriormente, por ter um tempo de alocação e remoção menor que o *drive-in*, o rack *PushBack* possui um desempenho melhor em todos os cenários testados pelo presente trabalho, desde a alocação com o rack vazio, da remoção do rack cheio até os 7 cenários testados. A Figura 14 traz uma análise comparativa dos tempos de alocação do rack vazio e de remoção do rack cheio, respectivamente, para os racks *Drive-in* e *PushBack*.

Figura 14 – Tempos médios de alocação e remoção dos racks

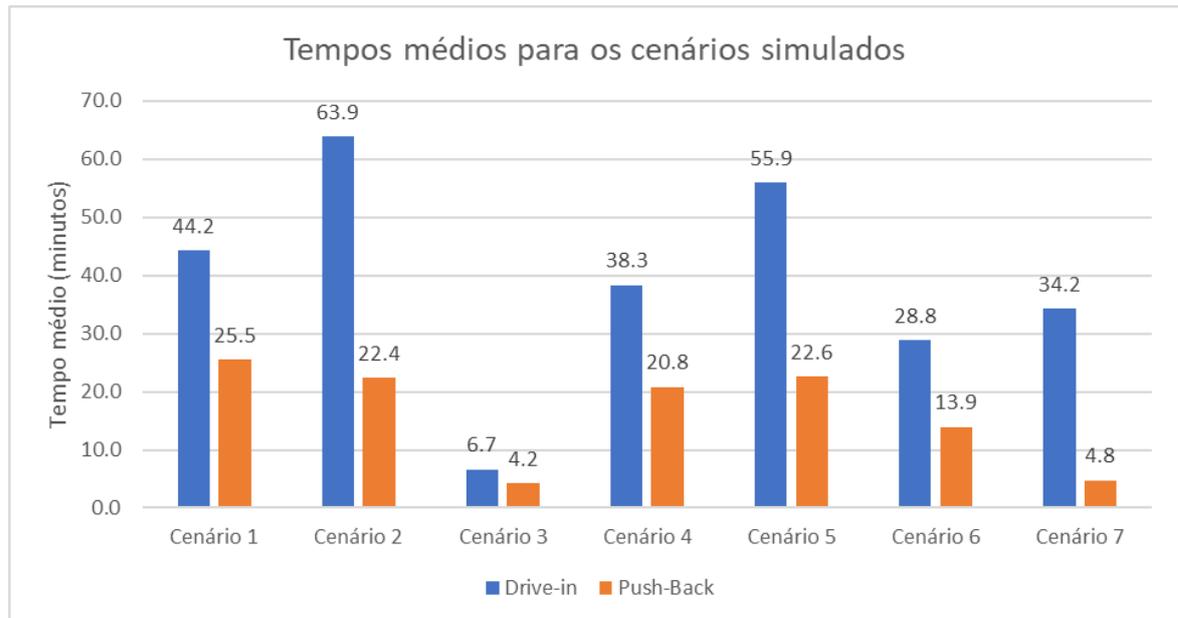


Fonte: essa pesquisa (2018)

Embora os gráficos acima mostrem o bom desempenho do *PushBack* frente ao sistema atual, o maior impacto na operação está quando simulamos os cenários para o *PushBack*. A Figura 14 mostra a comparação entre os tempos médios de duração de cada cenário para cada tipo de pallet, vale salientar que foram realizadas 20 rodadas de simulação para computar os valores do gráfico.

Fica evidente o melhor desempenho operacional do rack *PushBack* frente ao *Drive-in*. No pior cenário do rack *PushBack*, o maior tempo de execução é de 25.5 minutos. No cenário 2, por exemplo, tem-se uma diferença de 64.94% do tempo de execução da ordem de serviço. Até mesmo no cenário 3, em que não são necessários movimentações adicionais, o *PushBack* possui um melhor tempo operacional.

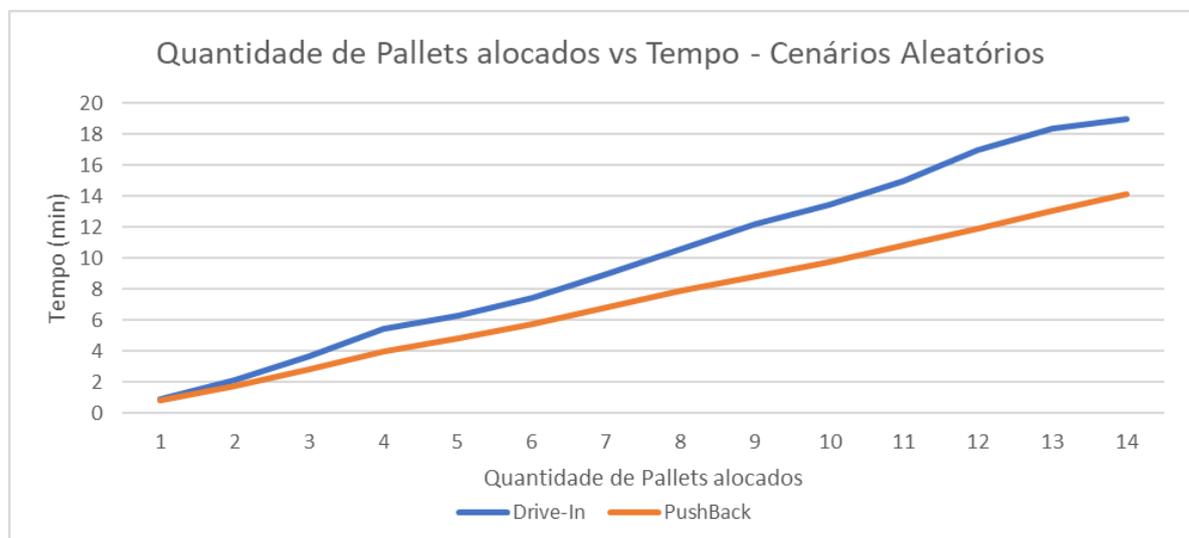
Figura 15 - Tempos médios de duração dos cenários para os racks drive-in e PushBack



Fonte: essa pesquisa (2018)

Além dos cenários reais mostrados acima, também foram simulados cenários aleatórios para exemplificar os desempenhos do modelo de simulação perante as mais diversas situações. A Figura mostra o tempo médio de alocação dos pallets para 10 replicações do modelo de simulação. Pode-se observar que caso sejam necessários alocar mais de 2 pallets o rack *PushBack* tem um desempenho melhor que o *Drive-in*, corroborando com os resultados dos cenários reais supracitados.

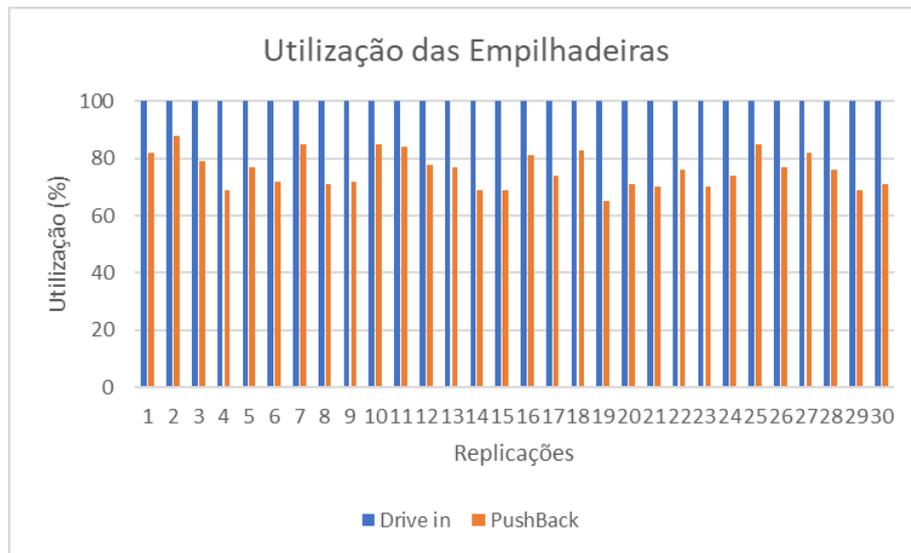
Figura 16 – Quantidade de pallets alocados vs tempo



Fonte: essa pesquisa (2018)

Outra variável de interesse desse sistema é a utilização das empilhadeiras. Para analisar essa variável, foram geradas 30 replicações. Vale salientar que o tempo total da simulação é sempre igual ao tempo máximo de alocação do último rack a alocar todos os pallets. A Figura 17 mostra que para as 30 replicações da simulação, em todas elas a empilhadeira do rack *PushBack* teve uma menor taxa de utilização para realizar a mesma operação que a empilhadeira operando no rack *Drive-in*.

Figura 17 - Utilização das Empilhadeiras



Fonte: essa pesquisa (2018)

A Tabela 7 mostra as estatísticas descritivas dos tempos médios que as empilhadeiras passam com os pallets, ou seja, os tempos que as empilhadeiras gastam para carregar ou descarregar os pallets nos respectivos racks para as 30 replicações.

Tabela 7 - Estatística descritiva dos tempos das empilhadeiras com o pallet para 30 replicações

	Média (s)	Desvio-padrão (s)	Mínimo (s)	Máximo (s)
<b>Empilhadeira Drive-in</b>	57.91	6.91	38.06	83.18
<b>Empilhadeira PushBack</b>	32.36	2.10	24.61	40.02

Fonte: essa pesquisa (2018)

Esses resultados mostraram que, em média, ao operar o rack *PushBack* a empilhadeira processa a mesma ordem de serviço gastando 23.96% a menos de tempo. O custo fixo médio por hora de uma empilhadeira para essa operação é de aproximadamente R\$39,06, ou seja, por

se tratar de uma instalação que funciona 24h por dia, para um único operador, anualmente o rack *PushBack* custa R\$260.175,40 enquanto o *Drive-in* custa R\$342.187,50, ou seja, para apenas um operador o *PushBack* custa R\$82.012,07 a menos que o rack *Drive-in*. Embora a análise e a simulação tenham sido feitas para apenas um operador, o sistema atual da empresa conta com 2 empilhadeiras operando os racks *Drive-in*, ou seja, a economia atual considerando apenas o custo direto da empilhadeira é de R\$164.024,20

Outra solução alternativa à compra do rack *PushBack* é a troca dos racks de operações diferentes na mesma planta industrial. Como falado anteriormente, o sistema atual do estoque de matéria-prima é formado por racks do tipo *Drive-in*, porém o estoque de produto final da mesma planta produtiva é formado por racks do tipo *PushBack*. O rack *Drive-in* é recomendado para estoques de produto final pois esse tipo de rack permite que lotes com mesmas características, como por exemplo o tipo do produto, sejam alocados em uma mesma rua e permaneçam lá até que sejam carregados na expedição da fábrica.

Dessa forma, como alternativa à compra de um rack *PushBack* para o estoque de matéria-prima, é possível trocar os racks do estoque de produto acabado para o estoque de matéria-prima e vice-versa. Assim, o custo de comprar um novo rack é mitigado apenas com o custo operacional de trocar o local dos racks já disponíveis dentro da planta industrial.

Visto isso, outros benefícios atrelados ao uso do rack *PushBack* podem ser inferidos. Por exemplo, no rack *PushBack* são necessárias no máximo cinco movimentações de pallets para a retirada de um pallet, enquanto no *Drive-in* esse número pode chegar a vinte e três movimentações. Logo, o problema de se precisar realocar os pallets movidos desnecessariamente tanto em locais próximos quanto longes agora seria resumido a realocar os pallets apenas em locais próximos à operação do rack. Embora o *PushBack* necessite de uma manutenção maior que o *Drive-in* os benefícios operacionais mostrados acima podem justificar a troca por um rack *PushBack*.

Nesse capítulo, pôde-se ver os resultados das simulações para os indicadores de desempenho determinados a priori e, através da análise dos resultados, mostrou-se que por ser operacionalmente mais eficiente, o rack *PushBack* ocupará menos espaço na planta industrial, diminuindo assim os custos indiretos com a manutenção do estoque. Sua eficiência também possibilita que o fluxo de matéria-prima seja mais controlável, permitindo que a planta industrial opere com um estoque de matéria-prima menor.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho tratou de um problema muito comum em sistemas de armazenagem com várias restrições, que é determinar dentre as alternativas disponíveis, qual delas melhor se adequa às particularidades da operação. Neste trabalho, foram considerados a modelagem e simulação de dois tipos de racks comumente utilizados em indústrias de grande porte: o *Drive-in* e o *PushBack*, visando identificar qual deles melhor se adequa ao sistema.

Através do uso da simulação de eventos discretos, foi possível modelar um sistema de armazenagem em racks real, o que permitiu testar 9 casos que ocorrem na rotina da operação em dois diferentes tipos de racks, *Drive-in* e *PushBack*. Vale salientar que o modelo de simulação desenvolvido é capaz de simular outros tipos de racks além do *Drive-in* e do *PushBack*, os quais foram considerados na análise em questão pelo fato de existirem sistemas dos dois tipos no caso estudado.

Desse modo, foi possível mostrar através do estudo que o sistema operacional atual (*Drive-in*) da empresa estudada está gerando custos desnecessários de movimentação. O *PushBack* realiza a mesma operação com menos movimentações, reduzindo em média 24% do tempo necessário para a execução de uma ordem de serviço.

Embora a implementação dessa solução no sistema real possa ser bastante expressiva economicamente, acredita-se que, a longo prazo, a substituição do rack *Drive-in* por um modelo mais flexível pode trazer ganhos significativos à organização. O presente trabalho mostrou que o rack *PushBack*, por exemplo, realiza a mesma atividade com 76.04% do tempo gasto no *Drive-in*, o que gera anualmente apenas com o uso da empilhadeira uma economia de aproximadamente 164 mil reais. Considerando que a troca de um sistema custa, em média, 700 mil a 1 milhão de reais, somente com o menor uso da empilhadeira e sem considerar os custos indiretos da manutenção do estoque esse valor seria pago em, no máximo, 6 anos de operação. Além disso, também foi mostrado que é possível fazer uma troca entre os sistemas de armazenagem de produto acabado e o de matéria-prima, o que teria um impacto econômico menor.

Este trabalho tem como principal limitação o fato de o escopo ser voltado a apenas um operador, além dos dados de tempo serem bastante escassos, necessitando que a análise fosse feita apenas por níveis e não para cada baía específica do rack e apenas para os racks do tipo *Drive-in* e *PushBack*. Como sugestões de trabalhos futuros, propõe-se ampliar o escopo do modelo de simulação para os demais operadores, assim como inserir no modelo o estoque

inicial de matéria-prima, processo esse que é anterior aos racks e modelar outros tipos de racks além dos analisados.

Além disso, embora esse modelo tenha sido testado em um caso prático, ele pode ser adaptado com facilidade para outras operações semelhantes, além de ser facilmente adaptado para outros tipos de racks. Outra sugestão seria atrelar ao modelo de simulação a técnica de aprendizagem de máquina para monitoramento e classificação em tempo real do grau de perecibilidade via *Support Vector Machines* de modo a criar uma regra de decisão que aloque os produtos mais perecíveis em baias mais acessíveis, o que pode gerar ganhos ainda mais expressivos no desempenho geral da planta produtiva

## REFERÊNCIAS

- Accorsi, R., Baruffaldi, G., & Manzini, R. Picking efficiency and stock safety: A bi-objective storage assignment policy for temperature-sensitive products. **Computers and Industrial Engineering**, 115(September 2017), 240–252, 2018.
- Albrecht, M. C. Introduction to Discrete Event Simulation. **Introduction to Discrete Event Simulation**, 2010.
- Allen, T. T. **Introduction to Discrete Event Simulation and Agent-based Modeling: Voting Systems, Health Care, Military and Manufacturing**. Springer (Vol. 1). Springer, 2010.
- Asmussen, S., & Glynn, P. W. On preemptive-repeat LIFO queues. **Queueing Systems**, 87(1–2), 1–22, 2017.
- Attar, A., Raissi, S., & Khalili-Damghani, K. A simulation-based optimization approach for free distributed repairable multi-state availability-redundancy allocation problems. **Reliability Engineering and System Safety**, 157(July 2016), 177–191, 2017.
- Banks, J., Carson II, J. S., Nelson, L., & Nicol, D. M. Discrete-Event System Simulation. Pearson (5th ed., Vol. 5). Pearson, 2014.
- Baril, C., Gascon, V., Miller, J., & Côté, N. Use of a discrete-event simulation in a Kaizen event: A case study in healthcare. **European Journal of Operational Research**, 249(1), 327–339, 2016.
- Barnes, R. M. **Motion and Time Study Design and Measurement of Work** (7th ed.). Wiley, 2009.
- Behzadi, G., O’Sullivan, M. J., Olsen, T. L., & Zhang, A. **Agribusiness supply chain risk management: A review of quantitative decision models**. *Omega* (United Kingdom), 79, 21–42, 2018.
- Birta, L. G., & Arbez, G. **Modelling and simulation: Exploring Dynamic System Behaviour**. Springer (1th ed., Vol. 1). Springer, 2013.
- Boysen, N., Briskorn, D., & Emde, S. Parts-to-picker based order processing in a rack-moving mobile robots environment. **European Journal of Operational Research**, 262, 550–562, 2017.
- Calzavara, M., Glock, C. H., Grosse, E. H., Persona, A., & Sgarbossa, F. Analysis of economic and ergonomic performance measures of different rack layouts in an order picking warehouse. **Computers and Industrial Engineering**, 111, 527–536, 2017
- Chen, L.-H., Hu, D.-W., & Xu, T. Highway Freight Terminal Facilities Allocation based on Flexsim. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, 96(Cictp), 368–381, 2013.
- Daria, B., Martina, C., Alessandro, P., Fabio, S., Valentina, V., Daria, B., ... Valentina, V.

Fatigue and recovery : Fatigue and recovery : research opportunities in order picking systems and recovery : **IFAC-PapersOnLine**, 50(1), 6882–6887, 2017.

De Felice, F., Petrillo, A., & Zomparelli, F. A Hybrid Model for Human Error Probability Analysis. **IFAC-PapersOnLine**, 49(12), 1673–1678, 2016.

de Keizer, M., Akkerman, R., Grunow, M., Bloemhof, J. M., Haijema, R., & van der Vorst, J. G. A. J. Logistics network design for perishable products with heterogeneous quality decay. **European Journal of Operational Research**, 262(2), 535–549, 2017.

De Santis, R., Montanari, R., Vignali, G., & Bottani, E. An adapted ant colony optimization algorithm for the minimization of the travel distance of pickers in manual warehouses. **European Journal of Operational Research**, 267(1), 120–137, 2018.

Elbert, R. M., Franzke, T., Glock, C. H., & Grosse, E. H. Computers & Industrial Engineering The effects of human behavior on the efficiency of routing policies in order picking : The case of route deviations. **Computers & Industrial Engineering**, 111, 537–551, 2017.

Fahimnia, B., Tang, C. S., Davarzani, H., & Sarkis, J. Quantitative models for managing supply chain risks: A review. **European Journal of Operational Research**, 247(1), 1–15, 2015.

Ferreira, G. O., Arruda, E. F., & Marujo, L. G.. Inventory management of perishable items in long-term humanitarian operations using Markov Decision Processes. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, 31, 460–469, 2018.

Gaury, E. G. A., Kleijnen, J. P. C., & Pierreval, H. A Methodology to Customize Pull Control Systems. **Journal of the Operational Research Society**, 52(7), 789–799, 2001.

Ge, H., Gray, R., & Nolan, J. Agricultural supply chain optimization and complexity: A comparison of analytic vs simulated solutions and policies. **International Journal of Production Economics**, 159, 208–220, 2015.

Goti, A. **Discrete Event Simulations** (1th ed.). Sciyo, 2010.

Greene, J. **Time and Motion Study: What, Why and How-to**. Createspace, 2013.

Grosse, E. H., Glock, C. H., Eric, H., Glock, H., Neumann, W. P., & Giersch, K. Human Factors Design : A in Order Picking System Design : Design : **IFAC-PapersOnLine**, 48(3), 320–325, 2015.

Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 203(3), 539–549, 2010.

Guo, Y., Wood, J., Pan, W., & Meng, Q. Inventory optimization of airport perishable emergency supplies with replacement strategy facing stochastic occurrence time by CVaR approach. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, 31(May), 170–183, 2018.

Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. **Introduction to Operational Research**, 2015.

Huseby, A. B., & Natvig, B. Discrete event simulation methods applied to advanced importance measures of repairable components in multistate network flow systems. **Reliability Engineering and System Safety**, 119, 186–198, 2013.

Ivanov, D., Pavlov, A., Dolgui, A., Pavlov, D., & Sokolov, B. Disruption-driven supply chain (re)-planning and performance impact assessment with consideration of pro-active and recovery policies. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 90, 7–24, 2016.

Ketzenberg, M., Gaukler, G., & Salin, V. Expiration dates and order quantities for perishables. **European Journal of Operational Research**, 266(2), 569–584, 2018.

Kohler, M., Lukic, I., & Nenadic, K. Creation of Warehouse Models for Different Layout Designs. **International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems**, 5, 9–13, 2014.

Kondili, E., Pantelides, C. C., & Sargent, R. W. H. A general algorithm for short-term scheduling of batch operations-I. MILP formulation. **Computers and Chemical Engineering**, 17(2), 211–227, 1993.

Landmann, R., & Erdmann, R. H. Uma abordagem heurística para a programação da produção na indústria de fundição com utilização da lógica fuzzy. **Gestão & Produção**, 18(1), 119–130, 2011.

Leroy, S. Why is it so hard to do my work? The challenge of attention residue when switching between work tasks. **Organizational Behavior and Human Decision Processes**, 109(2), 168–181, 2009.

Lin, C. C., & Yang, J. W. Cost-efficient Deployment of Fog Computing Systems at Logistics Centers in Industry 4.0. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 14(10), 4603–4611, 2018.

Liu, H., Zhang, J., Zhou, C., & Ru, Y. Optimal purchase and inventory retrieval policies for perishable seasonal agricultural products. **Omega (United Kingdom)**, 79, 133–145, 2018.

Martelli, L. L., & Dandaro, F. Planejamento e controle de estoque nas organizações. **Revista Gestão Industrial**, 11, 170–185, 2015

Metahri, D., Mohamed, O., Ahmed, B., El, B. P. M., Mohamed, O., Ahmed, B., & El, B. P. M.. Optimization of Free-Fall-Flow-Rack Automated Storage and Retrieval System Dimensions. **IEEE**, 1–6, 2017.

Mielczarek, B., & Uziako-Mydlikowska, J.. Application of computer simulation modeling in the health care sector: A survey. **Simulation**, 88(2), 197–216, 2012.

Montgomery, D., & Runger, G.. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. Wiley, 2014.

Nie, B., Huang, X., Chen, Y., Li, A., Zhang, R., & Huang, J.. Experimental study on visual detection for fatigue of fixed-position staff. **Applied Ergonomics**, 65, 1–11, 2017.

Ning, Z., Lei, L., Saipeng, Z., & Lodewijks, G.. An efficient simulation model for rack design in multi-elevator shuttle-based storage and retrieval system. **Simulation Modelling Practice and Theory**, 67, 100–116, 2016.

Olaitan, O., Yu, Q., & Alfnes, E.. Work in Process Control for a High Product Mix Manufacturing System. **Procedia CIRP**, 63, 277–282, 2017.

Özkan, E. D., Nas, S., & Güler, N.. Capacity Analysis of Ro-Ro Terminals by Using Simulation Modeling Method. **Asian Journal of Shipping and Logistics**, 32(3), 139–147.

Pavel, K., Chramcov, B., & Jemelka, M.. Using of simulation for comparison of technologies for pallets storing Using of Simulation for Comparison of Technologies for Pallets Storing. In **AIP Conference Proceedings 1738**, 2016.

Rakiman, U. S. Bin, & Bon, A. T.. Production line: Effect of different inspection station allocation. **Procedia Engineering**, 53, 509–515, 2013.

Riad, M., Elgammal, A., & Elzanfaly, D.. Efficient Management of Perishable Inventory by Utilizing IoT. 2018 **IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation**, ICE/ITMC 2018 - Proceedings, 1–9, 2018.

Ross, S. M.. **Simulation** (5th ed.). Academic Press, 2013.

Sallinen, M., & Hublin, C.. Fatigue-Inducing Factors in Transportation Operators. **Reviews of Human Factors and Ergonomics**, 10(1), 138–173, 2015.

Sang, B., & Liu, Y.. Simulation modeling of shuttle racking system based on automod. **International Conference on Advanced Mechatronic Systems, ICAMechS, 2015–Octob**, 90–95, 2015.

Satiti, D., & Rusdiansyah, A.. Model of refrigerated display-space allocation for multi agro-perishable products considering markdown policy. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 337(1), 2018.

Schriber, T. J., & Brunner, D. T.. Straus testifies on CAM and bioterrorism, research progress update released. In **Proceedings - Winter Simulation Conference 2007** (Vol. 8, pp. 28–30), 2007.

Sheikhalishahi, M., Pintelon, L., & Azadeh, A. Human factors in maintenance : a review. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, 2016.

Siegfried, R.. **Modeling and Simulation of Complex Systems: A Framework for efficient Agent-Based Modeling and Simulation**. Springer (1th ed., Vol. 1). Springer, 2014.

Slack, N., Chambers, S., & Johnston, R.. **Operations management** (6th ed.). Person, 2010.

Sokolowski, J. A., & Banks, C. M.. **Principles of Modeling and Simulation: A Multidisciplinary Approach**. Wiley (1st ed., Vol. 1). Wiley, 2009.

Tolk, A., Fowler, J., Shao, G., & Yucesan, E. **Advances in Modeling and Simulation: Seminal Research from 50 years of Winter Simulation Conferences**. Springer, 2017.

Ünlüyurt, T., & Tunçer, Y. . Estimating the performance of emergency medical service location models via discrete event simulation. **Computers and Industrial Engineering**, 102, 467–475, 2016.

van Gils, T., Ramaekers, K., Caris, A., & de Koster, R. B. M.. Designing efficient order picking systems by combining planning problems: State-of-the-art classification and review. **European Journal of Operational Research**, 267(1), 1–15, 2017.

Zhu, X., Zhang, R., Chu, F., He, Z., & Li, J..A flexsim-based optimization for the operation process of cold-chain logistics distribution centre. **Journal of Applied Research and Technology**, 12(2), 270–278, 2014