



Melhoria dos processos de armazenagem através de automação e simulação computacional

ANA CATARINA DA ROCHA CORREIA
julho de 2025

**MELHORIA DOS PROCESSOS DE ARMAZENAGEM
ATRAVÉS DE AUTOMAÇÃO E SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL**

Ana Catarina da Rocha Correia

2025

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

MELHORIA DOS PROCESSOS DE ARMAZENAGEM ATRAVÉS DE AUTOMAÇÃO E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Ana Catarina da Rocha Correia

Estudante n.º 1190349

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão da Cadeia de Abastecimento, realizada sob a orientação da Doutora Marisa João Guerra Pereira e coorientação da Doutora Maria Teresa Ribeiro Pereira.

2025

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

AGRADECIMENTOS

A realização deste projeto só foi possível graças ao apoio, incentivo e contributo de diversas pessoas que, direta ou indiretamente, desempenharam um papel essencial ao longo deste percurso. A todas elas, expresso o meu mais sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, agradeço ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) por me ter proporcionado uma experiência académica enriquecedora que contribuiu para o meu crescimento, tanto a nível profissional como pessoal. É um instituto que se destaca pela qualidade de ensino e capacidade de preparar os estudantes para os desafios de um mercado de trabalho exigente e em constante transformação.

Um agradecimento especial à minha orientadora e coorientadora nesta dissertação, Prof.^a Marisa Pereira e Prof.^a Maria Teresa Pereira, respetivamente, por toda a orientação, apoio e conselhos ao longo deste percurso desafiante.

Agradeço à organização onde foi desenvolvido o estudo de caso, por ter disponibilizado os recursos e meios necessários, bem como a toda a equipa, cujo contributo e apoio foram fundamentais para a concretização deste projeto.

Um agradecimento igualmente especial a todos os docentes que me transmitiram conhecimentos sólidos essenciais para fortalecer os valores de profissionalismo e dedicação que espero levar e manter comigo no mercado de trabalho.

Um agradecimento do fundo do coração aos meus amigos, em especial à Cláudia, ao Arthur, à Isa, ao ano de 019, à Mariana, à Alice, à Isabel, à Luísa, ao Nuno Ascensão, à Teresa Castro, ao Nuno Costa e à Joana Costa pela motivação e todo o apoio ao longo desta etapa.

Ao Francisco, por ter estado a meu lado em todas as fases deste percurso, desde as mais exigentes às mais tranquilas, e por me ter proporcionado um apoio e ajuda incondicional.

Aos meus pais, que sempre me transmitiram os melhores valores e a quem devo tudo o que sou hoje. Por todos os ensinamentos, conselhos, preocupação e apoio, mas essencialmente por nunca deixarem de acreditar em mim, quando eu própria duvidava... Obrigada não basta.

À restante família, com um carinho especial pelo avô Arlindo, que sempre acompanhou o meu percurso com muito orgulho e que, se pudesse, estaria certamente a meu lado neste momento – este feito também é um bocadinho teu. Ao Nuno e à Sofia, agradeço o apoio constante e pelas palavras de incentivo.

A todos, agradeço terem contribuído para a conclusão de um capítulo tão importante e que acredito marcar também o início de uma nova vida.

página propositadamente em branco

RESUMO

A presente dissertação centra-se na análise e melhoria dos processos logísticos de armazenagem de uma empresa do setor de transportes, e propõe a aplicação da metodologia PDCA em articulação com simulação computacional como ferramentas de apoio à decisão. O estudo nasce da necessidade crescente de responder aos desafios de eficiência operacional e redução de erros associados à gestão tradicional de armazéns, ainda fortemente dependente da intervenção humana.

Numa primeira fase, foi realizada uma revisão bibliográfica detalhada sobre armazenagem, metodologias de melhoria contínua, inovação tecnológica e ferramentas de simulação. Esta fundamentação permitiu enquadrar a investigação na realidade atual das cadeias de abastecimento, onde a digitalização e a automação se apresentam como elementos-chave para a competitividade. Em seguida, foi aplicado um caso de estudo à empresa Europackers, onde se procedeu ao mapeamento dos processos logísticos existentes e se identificou pontos críticos que comprometiam a eficiência global do sistema.

Com base na metodologia PDCA, foram definidas ações de melhoria e desenvolvidos modelos de simulação para as soluções propostas no *software JaamSim*, versão 2024.9.00, testando-se três cenários distintos: processo manual (estado atual), processo semiautomático e processo totalmente automatizado. As simulações foram realizadas em ambiente tridimensional (3D), o que permitiu uma representação visual mais realista dos processos, e a análise dos resultados foi complementada com códigos desenvolvidos em *Python*, que possibilitaram o tratamento estatístico dos dados e a geração automatizada de gráficos comparativos.

Os resultados evidenciam ganhos significativos de eficiência nos cenários com maior grau de automatização, com destaque para a redução dos tempos de processamento, redução de trabalhadores (requalificação para outras tarefas) e menor dependência do esforço físico dos colaboradores necessários. Estes ganhos validam a aplicação conjunta da metodologia PDCA e da simulação computacional como estratégia eficaz para a modernização e melhoria dos processos de armazenagem.

Este trabalho contribui, assim, para a consolidação do conhecimento na área da gestão logística e cadeia de abastecimento e oferece uma abordagem prática e replicável para organizações que procuram alinhar-se com as exigências atuais do mercado, onde a melhoria contínua sustentada por dados e tecnologia é fulcral para a sobrevivência e posicionamento das mesmas.

Palavras-chave: Armazenagem, Simulação Computacional, PDCA, Automatização, Eficiência Operacional

página propositadamente em branco

ABSTRACT

This dissertation focuses on the analysis and optimization of warehousing logistics processes within a transport sector company, proposing the integrated use of the PDCA methodology and computer simulation as decision-support tools. The study responds to the increasing need for greater operational efficiency and error reduction in warehouse management, which is still largely dependent on manual operations.

The research begins with a comprehensive literature review on warehousing systems, continuous improvement methodologies, technological innovation, and simulation tools. This review frames the study within the evolving context of supply chains, where digitalization and automation are essential for competitiveness. A study was carried out at the company Europackers, involving the mapping of the current logistics processes and the identification of critical inefficiencies affecting the overall system performance.

Following the PDCA methodology, specific improvement actions were defined and simulation models were developed in JaamSim (version 2024.9.00). Three distinct scenarios were tested: the current manual process, a semi-automated process, and a fully automated process. These simulations were conducted in a three-dimensional (3D) environment for enhanced realism, and the analysis was supported by Python scripts for statistical processing and automated generation of comparative performance graphs.

The simulations enabled a robust comparison of the scenarios, assessing processing times, workforce utilization, physical effort, responsiveness, and internal organization. The results clearly highlight efficiency improvements in the more automated scenarios, including shorter processing times, reduced physical demands, and the potential for workforce reallocation to higher-value tasks. These outcomes validate the effectiveness of combining PDCA with computer simulation as a strategic approach for modernizing warehousing operations.

This work contributes to the field of logistics and supply chain management by presenting a data-driven, technology-supported methodology that is both practical and replicable, supporting organizations in meeting current market demands through continuous improvement and operational excellence.

Keywords: Warehousing, Computer Simulation, PDCA, Automation, Operational Efficiency

página propositadamente em branco

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	V
Resumo.....	VIII
Abstract	X
ÍNDICE.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABELAS	XVII
ÍNDICE DE EQUAÇÕES	XIX
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XXI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Problema de investigação, enquadramento e pertinência	1
1.2. Questões e objetivos de investigação.....	2
1.3. Opções metodológicas.....	3
1.4. Estrutura do trabalho.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Armazenagem	6
2.1.1. Importância da armazenagem na cadeia de abastecimento	7
2.1.2. Desafios comuns na armazenagem	8
2.2. Metodologia PDCA	8
2.2.1. Evolução e conceito da metodologia PDCA.....	9
2.2.2. Adaptação do PDCA para operações de armazenamento.....	10
2.3. Atividades e métodos de armazenagem	12
2.3.1. Principais atividades	12
2.3.2. Métodos de armazenagem	16
2.4. Mapeamento de Processos de armazenagem	17
2.5. O impacto da inovação tecnológica nas operações logísticas de armazenagem	19
2.6. Metodologias para priorização de ações de melhoria na armazenagem.....	21
2.7. Simulação de processos com o <i>software Jaamsim</i>	22
3. CASO DE ESTUDO	26
3.1. Apresentação da empresa	26
3.2. Problema inicial e proposta de solução.....	27
3.3. Mapeamento de processos	28
3.4. Simulação e Análise do Processo Logístico	31
3.5. Resultados.....	33
3.6. Análise de Resultados	51

4. CONCLUSÃO	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXOS	60
ANEXO A – Simulação 3D Semiautomático	60
ANEXO B – Simulação 3D Automático	61
ANEXO C – Mapeamento de Processos	62
ANEXO D - Tempos Cronometrados e Estatísticas das Etapas do Processo Manual.....	63
ANEXO D.1 – Registo de Cronometragens: Descarga Manual de Caixas.....	64
ANEXO E - Número mínimo de cronometragens necessárias para cada processo	65
ANEXO F – Custos de Investimento	66

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo PDCA. Fonte: Cavalcante (2023).....	10
Figura 2: Atividade de Recepção Fonte: MaxtonLogistica (2021).....	13
Figura 3: Atividade de Alocação Fonte: Mecalux (2025).....	13
Figura 4: Atividade de Armazenagem Fonte: TAWI (2025).....	14
Figura 5: Atividade de Picking Fonte: MaxtonLogistica (2021).....	14
Figura 6: Atividade de Embalar e Etiquetar Fonte: Mecalux (2022).....	15
Figura 7: Atividade de Divisão e agregação Fonte: OnBlox (2023).....	15
Figura 8: Atividade de Expedição Fonte: MaxtonLogistica (2021).....	16
Figura 9: Tempos Totais dos Processos Comuns – Cenário Semiautomático.....	36
Figura 10: Tempos Totais dos Processos Comuns – Cenário Automático.....	36
Figura 11: Tempos Individuais dos Processos Comuns - Cenário Semiautomático.....	37
Figura 12: Tempos Individuais dos Processos Comuns - Cenário Automático.....	37
Figura 13: Tempo Total dos Processos das Caixas (% por Tempo Total Tipo de Caixas) - Cenário Semiautomático.....	38
Figura 14: Tempo Total dos Processos das Caixas (% por Tempo Total Tipo de Caixas) - Cenário Automático.....	39
Figura 15: Tempos Individuais Processos Comuns - Cenário Semiautomático.....	40
Figura 16: Tempos Individuais Processos Comuns - Cenário Automático.....	40
Figura 17: Tempo Total nas Transportadoras de Rolos - Cenário Semiautomático e Automático..	41
Figura 18: Número de Caixas por Simulação.....	42
Figura 19: Tempos Totais dos Processos Comuns - Cenário Semiautomático e Automático.....	43
Figura 20: Tempos Totais dos Processos Individuais - Cenário Semiautomático e Automático.....	44
Figura 21: Tempo Total por Simulação - Comparação de todos os cenários.....	45
Figura 22: Tempo médio Total por Tipo de Caixa - Cenários Semiautomático e Automático.....	45
Figura 23: Desvio padrão do número de caixas por tipo de caixa.....	46
Figura 24: Desvio padrão do Tempo Total por Tipo de Caixa.....	47
Figura 25: Número de Caixas em Fila de Espera - Cenário Semiautomática.....	48
Figura 26: Número de caixas em Fila de Espera - Cenário Automático.....	48
Figura 27: Tempo Total de Intervenção Humana por Simulação - Cenário Semiautomático e Automático.....	49
Figura 28: Comparação dos Tempos Totais dos Processos - Cenário atual, semiautomático e automático.....	50

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Principais elementos da notação BPMN. Fonte: (Johann & Diedrich)	18
Tabela 2: Ganho de Eficiência (%) dos Processos Automático e Semiautomático em Relação ao Processo Atual.....	35

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1: Determinação do número mínimo de cronometragens com base na distribuição normal	34
Equação 2: Cálculo do Ganho de Eficiência (%)	34

página propositadamente em branco

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

PDCA	Planear, Executar, Verificar, Agir (<i>Plan-Do-Check-Act</i>)
FIFO	Primeiro a entrar, primeiro a sair (<i>First-In-First-Out</i>)
LIFO	Último a entrar, primeiro a sair (<i>Last-In-First-Out</i>)
PDSA	Planear, Executar, Estudar, Agir (<i>Plan-Do-Study-Act</i>)
BPMN	Notação de modelagem de processos de negócios (<i>Business Process Modeling Notation</i>)
AGVs	Veículos Guiados Automaticamente (<i>Automated Guided Vehicle</i>)
WMS	Sistema de Gestão de Armazém (<i>Warehouse Management System</i>)
IoT	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)
QR code	Código de Resposta Rápida (<i>Quick Response Code</i>)

página propositadamente em branco

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o problema principal que suporta esta dissertação, bem como o contexto que justifica a sua realização. É ainda feito um enquadramento teórico que evidencia a relevância do tema e abordadas as razões que impulsionaram a realização deste projeto. Por fim são descritos os objetivos que se pretendem alcançar, bem como as opções metodológicas adotadas ao longo do trabalho e estrutura do relatório.

1.1. Problema de investigação, enquadramento e pertinência

O problema de investigação centra-se, essencialmente, na necessidade de desenvolver uma melhoria nos processos de armazenagem numa empresa de logística e identificar a forma adequada de os melhorar.

A gestão eficiente de armazenagem tem um papel essencial na competitividade e sustentabilidade das cadeias de abastecimento. O aumento da complexidade das operações, derivado da diversificação de cargas, da maior frequência de trabalhos e da necessidade de maior rapidez, determina que a melhoria dos processos de armazenagem seja uma prioridade.

A literatura destaca que a armazenagem desempenha um papel importante na eficiência das cadeias de abastecimento e é fundamental para reduzir custos e melhorar o desempenho operacional. Estudos mostram que otimizar processos logísticos contribui diretamente para o sucesso das organizações Pereira & Araújo (2016).

Desta forma, este trabalho pretende dar resposta a esta necessidade das empresas de logística, numa era marcada pela globalização e pela digitalização. Estes fatores têm pressionado as empresas a adotar diferentes soluções que combinem a redução de custos e a excelência nas operações. Para que isto seja possível, a metodologia PDCA (Planear, Executar, Verificar, Agir) destaca-se como uma metodologia, que permite atingir uma abordagem bem estruturada e contínua, capaz de identificar problemas, implementar melhorias e monitorizar resultados.

O ciclo PDCA surge como uma metodologia para estruturar melhorias contínuas na gestão de armazéns. No caso desta ser aplicada corretamente, permite identificar falhas, testar soluções e ajustar processos, o que torna os processos mais eficientes e organizados Garza-Reyes et al. (2018). Este método permite que as empresas se adaptem conforme as exigências e procura do mercado. Adicionalmente, o ciclo PDCA já demonstrou impactos positivos na produtividade e na redução de desperdícios em diferentes setores.

A simulação é uma ferramenta essencial na logística, permite modelar, prever e otimizar processos como transporte, armazenagem e produção. A sua importância reside na capacidade de testar cenários, identificar falhas e apoiar decisões com base em dados fiáveis. Quando aplicada aos processos logísticos, ajuda a reduzir desperdícios, melhorar a

eficiência e antecipar problemas, o que contribui para uma gestão mais ágil e precisa Fedorko et al. (2025). Desta forma, a simulação também se afirma como um recurso estratégico fundamental para a modernização e o aumento da eficácia dos sistemas logísticos.

A crescente e permanente necessidade de inovação na gestão de armazenagem, especialmente em empresas com grande volatilidade na procura e limitações de espaço, foi o que permitiu a identificação da relevância deste estudo. Com o foco na melhoria de processos, pretende-se criar condições para que as operações sejam mais ágeis e eficientes.

A solução proposta assenta essencialmente na metodologia PDCA e na simulação computacional e propõe um modelo contínuo de melhoria, adaptável a diferentes contextos empresariais, flexível, capaz de gerar resultados concretos e dar resposta às necessidades do setor.

Estudos recentes mostram que uma melhor gestão de armazéns pode ser alcançada através do uso de tecnologias e da adoção de metodologias de melhoria contínua, como o Planear, Executar, Verificar e Agir (PDCA) Al-Saad et al. (2023). A automação e a análise de dados são cada vez mais utilizadas para reduzir desperdícios e aumentar a eficiência, o que faz com que os armazéns se tornem mais inteligentes e alinhados com as novas exigências atuais e, para isso, a simulação computacional é uma ferramenta essencial para analisar e otimizar o fluxo logístico, o que contribui para uma tomada de decisão mais assertiva. Segundo Straka et al. (2019), uma das principais vantagens da simulação computacional é a possibilidade de analisar situações que não poderiam ser testadas na prática, seja por questões de segurança ou por qualquer outro tipo de limitações. Nesse mesmo sentido, estudos como o de Tubis & Rohman (2023) demonstram que a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 e simulação 3D, permite não só uma visualização realista do ambiente logístico, mas também uma medição precisa do desempenho antes e depois de intervenções.

Ao associar o ciclo PDCA com ferramentas digitais da Indústria 4.0, como sensores e análise de dados, é possível criar um sistema de melhoria contínua automatizado e eficiente. Govindan et al. (2022) destacam que estas abordagens combinadas resultam em ganhos objetivos de produtividade, redução de custos e melhor gestão de recursos nos armazéns.

Neste contexto, a utilização de ferramentas como a simulação 3D, a análise de dados com *Python* e a metodologia PDCA reforçam a capacidade de resposta das soluções propostas, ao combinar visualização realista, melhoria contínua e suporte analítico.

1.2. Questões e objetivos de investigação

A pergunta de investigação a ser respondida ao longo do projeto é: "Como é possível melhorar os processos do fluxo logístico interno de uma empresa, utilizando a metodologia PDCA com o apoio da simulação computacional?"

Esta pergunta estará presente ao longo de todo o projeto e considera as diversas abordagens descritas na revisão bibliográfica. Desta forma, o objetivo geral é contribuir para a melhoria

de atividades no armazém numa empresa logística, através da aplicação da metodologia PDCA com apoio da simulação computacional, tendo como objetivos específicos:

- Realizar uma análise detalhada e diagnóstico dos processos de armazenagem, recorrendo ao mapeamento de processos;
- Definir conjunto de ações para os cenários considerados;
- Elaborar simulações computacionais para comparar, entre si, os tempos de execução dos processos logísticos nos diferentes cenários simulados;
- Propor ações de melhoria com base nos diagnósticos realizados e sua priorização;
- Desenvolver modelos de acordo com as ações priorizadas, tendo em conta os resultados obtidos;
- Avaliar o impacto económico das soluções simuladas.

1.3. Opções metodológicas

De forma a atingir os objetivos anteriormente referidos, foi escolhida a metodologia PDCA que é conhecida pela sua eficiência na melhoria contínua de processos. A escolha desta abordagem deve-se ao seu carácter cíclico, que permite planejar, implementar e ajustar soluções de forma sistemática, o que garante a análise de cada etapa individual de forma a melhorar as atividades de armazenagem.

O plano de investigação foi desenvolvido por fases, começando com um diagnóstico detalhado da situação atual da empresa, através do mapeamento de processos e da identificação dos principais pontos críticos, o que corresponde à etapa de planeamento. De seguida, na fase de execução, foi desenvolvido um modelo de simulação computacional que representou os processos reais da empresa e possibilitou o teste de diferentes cenários propostos. A etapa de verificação foi abordada na secção de resultados, através da análise dos impactos e das melhorias obtidas com a aplicação das propostas simuladas. Por fim, a fase de ação consistiu na definição de recomendações práticas ajustadas às necessidades da empresa, com base nos dados analisados, com o objetivo de promover a melhoria contínua dos processos.

A aplicação do PDCA foi complementada pelo recurso a ferramentas como o mapeamento de processos, utilizando a notação de modelagem de processos de negócios, do inglês Business Process Modeling Notation (BPMN). Esta combinação veio proporcionar um acompanhamento constante e flexível, e permitiu identificar melhorias e realizar ajustes, quando necessário (Santos Queiroz et al., 2019).

Este projeto realça a importância da integração entre tecnologias de apoio à decisão e ferramentas de análise, como a simulação computacional. Estudos indicam que a aplicação combinada do PDCA com outras ferramentas de melhoria contínua resulta em melhorias significativas na gestão logística e na redução de falhas operacionais Chojnacka-Komorowska & Kochaniec (2019).

Adicionalmente, os desafios operacionais associados à movimentação e organização de cargas, bem como a crescente adoção de tecnologias como sistemas guiados autônomos, do inglês Automated Guided Vehicle (AGV)s, sistemas de gestão de armazenamento, do inglês Warehouse Management System (WMS) e Internet das coisas do inglês Internet of Things (IoT), sustentaram as decisões metodológicas ao longo do projeto. Estes elementos contribuíram para uma visão abrangente e coerente da realidade logística, o que sustentou a proposta de soluções alinhadas com as boas práticas do setor.

1.4. Estrutura do trabalho

Este relatório está dividido em quatro capítulos. O primeiro apresenta a introdução, onde são descritos o enquadramento do tema, os objetivos, a metodologia e a questão de investigação. O segundo capítulo corresponde à revisão bibliográfica, onde são abordados os principais conceitos relacionados com a armazenagem, o ciclo PDCA, a simulação e outras ferramentas de apoio à decisão. O terceiro capítulo descreve o caso de estudo, incluindo o diagnóstico, a proposta de solução e os modelos de simulação. Nesta fase, são também explorados os modelos tridimensionais construídos no *JaamSim*, bem como os códigos *Python* aplicados à análise dos dados simulados. Ainda neste capítulo, é apresentada a análise comparativa dos cenários manual, semiautomático e automático, onde são destacados os ganhos em eficiência, tempo e consistência operacional. Foram também realizadas estimativas de investimento e retorno, com o objetivo de comprovar a viabilidade económica da automação. O quarto e último capítulo apresenta as conclusões do trabalho, onde se destacam os principais contributos, as limitações identificadas e sugestões para futuros desenvolvimentos. Por fim, o relatório inclui ainda anexos com elementos complementares que apoiam a compreensão e a validação do projeto.

página propositadamente em branco

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Armazenagem

Ao longo dos anos, conseguimos observar uma clara evolução no que toca à organização logística das empresas. Assistimos à passagem de sistemas pouco eficientes e de grande descoordenação entre as atividades da cadeia de abastecimento para modelos bem estruturados, eficientes e focados na integração e interligação de todas as etapas envolvidas.

No artigo "*Business Logistics Management*", escrito por Ballou (2004), é explicado que a armazenagem é uma parte essencial da cadeia de abastecimento. A sua função principal é manter os produtos em *stock* de forma eficiente e organizada. Os autores defendem que um bom sistema de armazenagem só é possível se garantir a disponibilidade dos produtos, reduzir os custos operacionais e melhorar o atendimento às necessidades dos clientes. Em resumo, a armazenagem assegura que os produtos estão disponíveis no momento e lugar certos, e ajuda a tornar os processos logísticos mais eficientes.

Xu et al. (2012) acrescenta ainda que o armazém não só desempenha um papel essencial, como assegura a ligação entre os vários intervenientes da cadeia logística contribuindo para alcançar uma vantagem competitiva.

Segundo Ballou (2004), a armazenagem envolve guardar e movimentar produtos de um determinado local para outro. Assim, com o aumento de variedade de artigos, entregas mais frequentes e a necessidade de rapidez e precisão, esta atividade ganhou um destaque nas organizações. Afirma ainda que uma gestão eficaz na armazenagem contribui para a redução de custos e também para uma tomada de decisão mais informada sobre o uso de recursos e correspondentes gastos.

De acordo com Gu et al. (2007), a armazenagem é uma das atividades logísticas que visa garantir o fluxo eficiente e eficaz de bens, serviços e informações desde o ponto de origem até o ponto de consumo.

Conforme destaca Rouwenhorst et al. (2000), decisões como local de estabelecimento do armazém ou nível de automação impactam diretamente a fluidez de informações, o atendimento de prazos e a competitividade global. Assim, a armazenagem passa a ser um nó estratégico da cadeia de abastecimento, e não apenas um ponto de *stock*.

Em síntese, a armazenagem evoluiu de uma função meramente operacional para um elemento estratégico da cadeia de abastecimento. Uma boa gestão contribui para um fluxo logístico mais rápido, eficiente e adaptado às necessidades do mercado, melhorando substancialmente os processos por meio do uso de tecnologias, organização adequada e procedimentos bem definidos.

2.1.1. Importância da armazenagem na cadeia de abastecimento

A logística é crucial no processo de armazenamento, uma vez que é necessário ter um sistema bem estruturado para garantir a manutenção da matéria-prima e todos os itens necessários. O armazenamento de produtos finalizados deve ser feito com agilidade para acompanhar a procura do mercado e as suas alterações.

Desta forma, a logística funciona como um elo estratégico que garante a eficácia e a continuidade dos processos. Assim os armazéns, mais que apenas um local físico onde se armazenam mercadorias, são instrumentos essenciais que favorecem a estabilidade, diminuem as despesas e aprimoram o serviço do cliente. Desta forma, as organizações são capazes de lidar com desafios internos e externos, e asseguram uma maior capacidade de adaptação.

Tal como Burinskiene (2015) explica, a função deste serviço é receber materiais de diversos fornecedores, executar atividades de valor agregado e garantir a satisfação dos clientes. Nesse sentido, a gestão de armazenagem torna-se fulcral para o cumprimento destes objetivos.

Conforme destaca Masenssine et al. (2020), esta boa gestão só é alcançada se resultar na diminuição de custos, no aumento de eficiência e aumento da satisfação dos clientes. Com uma gestão eficaz, é possível melhorar a organização das operações, maximizar o uso do espaço disponível e manter um controlo rigoroso a nível de *stocks*, facilitando a integração entre as diferentes etapas da logística.

Uma das inúmeras vantagens desta atividade de armazenar, como refere Ballou (2004) é a redução de incertezas, uma vez que ajuda a gerir oscilações na procura e nos prazos de entrega, o que garante que o funcionamento seja estável na cadeia de abastecimento. Este autor explica ainda que a mesma melhora o atendimento ao cliente, pois garante a disponibilidade de produtos e permite que as entregas sejam realizadas de forma mais rápida. Uma outra vantagem é a economia de escala, na medida em que possibilita às empresas adquirir ou produzir mercadorias em grande escala, reduz consideravelmente os custos unitários a longo prazo e aumenta a margem de lucro.

Em síntese, a armazenagem atua como se fosse um componente estratégico para a continuidade e competitividade nas cadeias de abastecimento. Só com a gestão organizada dos armazéns, é que estes deixam de ser meros locais físicos e se transformam em instrumentos de enorme importância para a diminuição de despesas, aumentam a satisfação das necessidades dos clientes e são ainda uma ferramenta de resiliência das empresas perante desafios internos e externos. Acresce que, como destacado pelos autores anteriormente citados, a armazenagem contribui para a estabilidade operacional, uma vez que permite atender às oscilações do mercado. Assim, ter boas práticas de armazenagem não é só uma necessidade para o bom funcionamento, é também uma estratégia importante para o sucesso das empresas.

2.1.2. Desafios comuns na armazenagem

A armazenagem depara-se com alguns obstáculos que podem afetar negativamente as empresas em alguns aspetos, como a manutenção, restrições financeiras, risco de obsolescência ou ocorrências de roubos ou incêndios. Outros problemas comuns nesta atividade podem ser as questões ambientais, como o alto consumo de energia e emissões de dióxido de carbono, ou ainda questões de segurança e fuga de informações. Todos estes fatores tornam a gestão de armazéns uma tarefa especialmente complexa.

No artigo "*Business Logistics Management*", escrito por Ballou (2004), o autor enfatizou algumas limitações ligadas à armazenagem, tais como custos adicionais relacionados com a gestão de inventários, uso do espaço físico, utilizações de energia, recursos humanos e sistemas de gestão. Acrescenta ainda que o risco dos produtos se tornarem obsoletos, especialmente na área de alta inovação, é significativo, o que pode originar que artigos guardados por um longo período possam ficar danificados ou mesmo tornar-se inúteis. Existe ainda o risco de exposição a outros perigos, como incêndios ou furtos. Este autor, defende que uma avaliação cuidadosa dos custos de armazenamento e transporte é bastante relevante para estabelecer a quantidade adequada de produtos e a localização mais estratégica dos armazéns numa rede de logística.

As empresas enfrentam grandes desafios devido ao aumento de complexidade de operações logísticas, que podem levar a um grande impacto nos custos de armazenamento.

A diversificação de produtos, o aumento da frequência das entregas e a necessidade de atender aos pedidos de forma mais rápida resultam no aumento de despesas, como por exemplo no aluguer de armazéns, mão de obra e depreciação de equipamentos. A procura irregular faz com que existam picos que frequentemente sobrecarregam a capacidade dos armazéns, o que exige que as empresas mantenham espaços sobredimensionados e/ou subutilizados na maior parte do tempo.

A armazenagem é uma área fulcral da logística, mas repleta de desafios, com custos elevados, riscos operacionais e impactos ambientais significativos. Desta forma, é cada vez mais evidente a necessidade de um planeamento estratégico focado em superar estas dificuldades otimizando recursos e evitando desperdícios. Só assim, e com um investimento estratégico bem gerido, uma empresa pode aumentar a sua competitividade e contribuir diretamente para o seu sucesso.

2.2. Metodologia PDCA

O ciclo PDCA, ou também designado como planejar, fazer, verificar e executar, é uma metodologia bastante utilizada quando a intenção é melhorar a qualidade e os processos de forma contínua. Este segue uma abordagem cíclica que facilita a identificação de problemas, aplica soluções e avalia os resultados, permitindo ajustes e melhorias. É uma

metodologia essencial para organizar as tarefas, evitar possíveis erros e aumentar a eficiência de diversas áreas.

Segundo Andrade (2018), o ciclo PDCA tem mostrado a sua utilidade para o mercado, devido à resolução e extinção de problemas em simultâneo, o que evita o aparecimento de novos por falta de prevenção. Esta versatilidade torna-o indispensável para as organizações, pelo menos as que procuram melhorar os seus processos e resultados.

De acordo com Song & Fischer (2020), o ciclo PDCA é uma metodologia importante para melhorar as operações, mas normalmente é usado de forma semanal ou mensal. No entanto, estes autores referem que, ao aplicá-lo diariamente, é possível alcançar um controlo mais preciso e agir de forma mais proativa nas operações.

De forma geral, o ciclo PDCA pode ser visto como um método que ajuda a resolver problemas e a tomar decisões de forma organizada.

2.2.1. Evolução e conceito da metodologia PDCA

Este modelo foi desenvolvido por Walter A. Shewhart em 1939, e inicialmente era conhecido como "Ciclo de Shewhart". No mesmo, Shewhart sugeriu que as etapas particulares da indústria, tais como a produção e a inspeção, fossem vistas como partes de um processo dinâmico. Assim, o ciclo original consistia em três fases: formular hipóteses, realizar experiências e analisar os resultados, e a finalidade era promover a melhoria contínua ao longo do tempo (Moen & Norman).

Posteriormente, o Dr. W. Edwards Deming reformulou este ciclo em 1950, expandindo-o para quatro etapas: idealização do produto, produção, venda e por fim o melhoramento com base na necessidade do mercado. Esta versão, conhecida como "Roda de Deming", destacou a interação entre design, produção, vendas e pesquisa, e reforçou a importância de existir um processo em ciclo Ricci et al. (2021).

Subsequentemente, no Japão, especialistas em qualidade voltaram a ajustar o modelo adaptado por Deming criando finalmente o ciclo PDCA. Este manteve o número de etapas do anterior, mas foram redefinidas para: Planear (definir problemas e metas), Executar (implementar a estratégia), Verificar (avaliar os resultados) e Agir (incorporar melhorias e implementar ações (Moen & Norman).

Por fim, nos anos 80, Deming ainda atualiza uma última vez o processo, substituindo o termo "Verificar" por "Estudar", dando origem ao ciclo PDSA. Esta alteração reforçou a importância da aprendizagem contínua nos processos Moen & Norman. Mesmo com essa atualização, o PDCA continuou a ser o mais adotado pelas empresas. A sua nomenclatura simples e direta facilita a aplicação prática e a compreensão em diferentes setores. Além disso, consolidou-se como um modelo de referência na gestão da qualidade e na melhoria contínua, sendo utilizado pelas empresas de todo o mundo.

Com o passar do tempo, o ciclo PDCA passou de um método técnico de produção para uma metodologia de melhoria contínua e aprendizagem em diversas áreas. Atualmente, é inegável a relevância para as empresas que procuram excelência operacional e na área de inovação.

Concluindo, o ciclo PDCA, originalmente concebido como uma estratégia mais técnica para processos industriais, sofreu uma evolução notável no decorrer dos anos, abrangendo conceitos de gestão, melhoria contínua e aprendizagem. Desde a sua formulação inicial, elaborada por Shewhart, até à última reformulação de Deming e as modificações implementadas no Japão, o modelo tem demonstrado uma capacidade eminente de adaptação às necessidades das organizações, sendo ainda hoje reconhecido como uma metodologia indispensável para as empresas atingirem patamares de distinção.

Ao analisar a Figura 1, que ilustra a abordagem correta do ciclo PDCA, percebe-se que, embora ele tenha apenas quatro etapas, é importante lembrar que elas precisam ser repetidas de forma a ser possível cumprir com o seu propósito, a melhoria contínua.

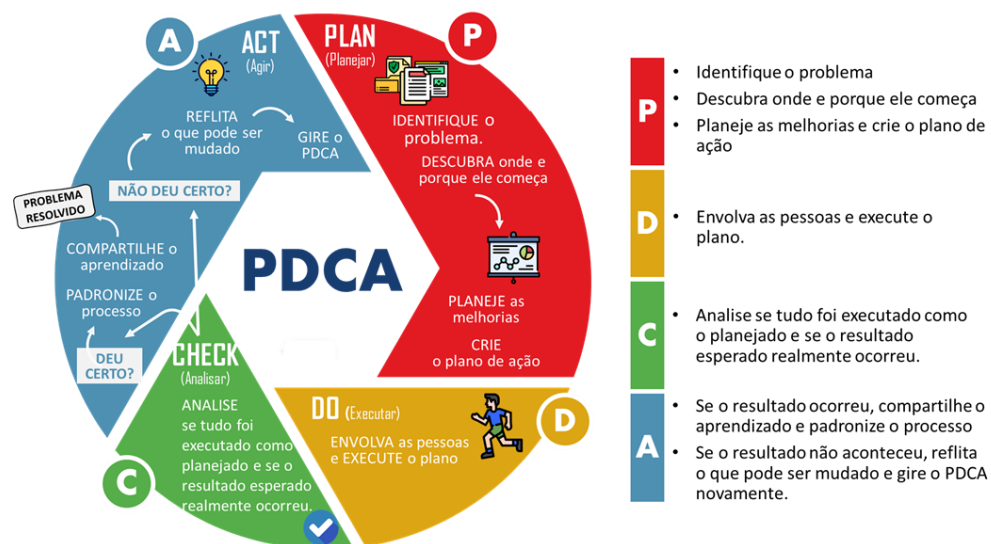


Figura 1: Ciclo PDCA. Fonte: Cavalcante (2023)

2.2.2. Adaptação do PDCA para operações de armazenamento

O ciclo PDCA é vastamente utilizado pelas organizações para controlar os processos internos, assegurar o cumprimento das metas definidas e utilizar as informações como base para orientar a tomada de decisão (Pan et al., 2011).

Raza et al. (2021) descreve o ciclo PDCA (Planejar, Fazer, Verificar e Executar) como uma metodologia de melhoria contínua utilizada no desenvolvimento e na implementação de políticas de qualidade.

As fases do ciclo PDCA, aplicadas ao contexto de operações de armazenagem podem ser descritas da seguinte forma:

- **Planear:** O objetivo desta etapa é identificar problemas nos processos e definir planos de ações eficazes. No âmbito da logística de armazém, isso pode incluir a análise de questões como erros na separação de artigos durante o *picking*, atrasos nas entregas devido a rotas incorretas, problemas a nível de material danificado ou deteção de áreas no armazém que necessitam de melhorias. Desta forma, é necessário definir objetivos e metas e otimizar os processos. Por fim, deve-se elaborar um plano de ações, isto é, desenvolver estratégias para corrigir as falhas detetadas.
- **Executar:** Esta etapa envolve colocar em prática o plano anteriormente definido e monitorizar a execução de forma contínua. O acompanhamento é crucial para identificar dificuldades que possam surgir, além de garantir a aplicação do planeamento inicial.
- **Verificar:** Nesta fase, o foco é avaliar os resultados. Para isso, é necessário comparar os dados iniciais, recolhidos antes da implementação do plano, com os dados posteriores. Desta forma, esta análise permite medir o impacto das ações realizadas.
- **Executar:** Com base na análise da etapa anterior são feitas correções para resolver os problemas encontrados e garantir melhorias.

É viável e recomendável implementar o ciclo PDCA utilizando subdivisões internas dentro de cada fase, o que permite executar cada etapa de forma mais detalhada e com a aplicação das ferramentas mais apropriadas. Isso resulta num ciclo PDCA mais estruturado, com uma sequência lógica e de fácil compreensão.

A aplicação do ciclo PDCA em ambientes de armazenagem tem-se mostrado eficaz, sobretudo quando cada fase é detalhada com tarefas específicas e bem definidas. Um exemplo dessa abordagem pode ser observado no estudo de Fidlerova et al. (2024), no qual o PDCA foi implementado num centro de distribuição com o objetivo de reduzir o tempo de expedição dos pedidos. A estruturação clara das etapas, incluindo a definição de metas, o envolvimento da equipa, a padronização das atividades e a análise de indicadores resultou numa melhoria significativa dos processos logísticos, e confirmou a aplicabilidade prática e os benefícios da metodologia PDCA em contextos de armazenamento.

De acordo com a abordagem apresentada por Cousson et al. (2018), as fases do PDCA podem ser operacionalizadas por meio de atividades específicas dentro de cada etapa:

1ª Fase – Planeamento:

- Analisar e descrever o projeto, identificar os pontos principais e fazer as avaliações iniciais;

- Definir a metodologia a ser usada;
- Criar um cronograma e uma calendarização para organizar as etapas do projeto.

2ª Fase – Fazer:

- Treinar a equipa, atribuir funções, recolher dados e criar um plano de ações;
- Informar e motivar a equipa;
- Executar as atividades conforme o planeamento.

3ª Fase – Verificar:

- Comparar o que foi planeado com o que foi efetivamente realizado para controlar as fases do projeto;
- Analisar resultados, compilar dados e identificar o que já foi feito.

4ª Fase – Executar:

- Reunir a equipa para discutir o projeto, trocar opiniões e sugestões com todos os membros envolvidos;
- Identificar melhorias possíveis para o futuro e as principais dificuldades obtidas.

Em suma, a aplicação do ciclo PDCA nas operações de armazenagem revela-se uma metodologia útil para melhorar continuamente os processos, garantindo maior controlo e eficiência. A divisão de cada fase em tarefas específicas facilita a sua implementação prática no dia a dia das operações. Para além disso, Ghosh et al. (2023) reforçam que o PDCA pode ser aplicado também em contextos mais complexos e incertos, como acontece frequentemente nas cadeias de abastecimento. Quando apoiado por métodos de apoio à decisão, o ciclo torna-se ainda mais eficaz e revela-se mais adaptável tanto nas situações operacionais mais simples como em cenários estratégicos mais exigentes.

2.3. Atividades e métodos de armazenagem

2.3.1. Principais atividades

As atividades de armazenagem são operações que recebem, movimentam, organizam e armazenam os produtos dentro de um armazém. A sua estruturação e controlo visam otimizar o espaço, facilitar o acesso e garantir a segurança de um bom fluxo de materiais. A armazenagem, e consequentemente as suas atividades, desempenham um papel estratégico na cadeia de abastecimento pois contribuem para a redução de custos operacionais e melhoria no atendimento aos clientes, na medida em que garantem a

disponibilidade dos produtos no momento pretendido e em conformidade. Conforme destacado na literatura especializada, essas atividades fundamentais incluem funções como recepção, armazenamento, separação de pedidos, alocação, expedição, entre outras, como referem Gu et al. (2007). Estas operações constituem a base da logística interna e são essenciais para assegurar a fluidez e eficiência do sistema logístico como um todo, conforme salientam Coelho et al. (2021).

Existe uma série de operações básicas que são realizadas em qualquer armazém.

1. Recepção

A atividade de recepção inicia com o registo no sistema da entrada de todos os produtos recebidos no armazém. Em seguida, procede-se a descarga dos materiais, de forma a garantir a quantidade e qualidade dos mesmos, ou seja, assegurando assim a sua conformidade. Por fim, os produtos são direcionados para a secção que lhes corresponde, seja para a área de armazenagem ou para outras áreas da empresa onde estes sejam necessários Frazelle (2002).

Em síntese, a recepção é a primeira etapa no fluxo de materiais dentro do armazém, onde os produtos são descarregados, inspecionados e registados no sistema Bartholdi & Hackman (2014).



Figura 2: Atividade de Recepção Fonte: MaxtonLogistica (2021)

2. Alocação

Frazelle (2002) refere que “*put-away*” ou alocação consiste em determinar a posição dos materiais recebidos nos locais de armazenamento apropriados. Esta ação garante que os materiais sejam colocados nos locais previamente destinados onde se inclui o transporte dos materiais, desde a recepção até às áreas específicas de armazenagem. A eficácia deste processo assegura a organização do armazém, otimiza o espaço de armazenamento e



Figura 3: Atividade de Alocação Fonte: Mecalux (2025)

facilita o acesso aos materiais quando é necessário. A importância da correta alocação também é evidenciada por Mahmoudinazlou et al. (2025), que demonstram como decisões eficientes de localização dos itens impactam diretamente o desempenho dos sistemas.

3. Armazenagem

Para Bartholdi & Hackman (2014), a armazenagem é a etapa em que os materiais são guardados em locais apropriados dentro do armazém, de forma a otimizar o espaço disponível e facilitar o acesso para as operações seguintes. O principal objetivo é manter os produtos organizados e prontos para corresponder à procura.

De acordo com Frazelle (2002), a armazenagem é definida como o ato de manter guardado fisicamente os produtos enquanto estes aguardam procura ou libertação para a próxima atividade. O método de armazenamento varia conforme o tamanho, a quantidade e as características específicas de cada produto. No estudo de Mahmoudinzlou et al. (2025), os autores mostram que o posicionamento de produtos afeta diretamente o desempenho da organização, sobretudo em ambientes com elevada taxa de chegada de pedidos.



Figura 4: Atividade de Armazenagem Fonte: TAWI (2025)

4. Picking/Separação de pedidos

O processo de separação de pedidos, como o nome indica, representa o processo de recolha dos artigos do armazenamento de forma a atender as necessidades de uma procura específica. Ou seja, esta atividade consiste na recolha dos produtos certos, na quantidade certa, satisfazendo um conjunto de necessidades manifestado pelos clientes De Koster et al. (2006).



Figura 5: Atividade de Picking Fonte: MaxtonLogistica (2021)

Esta atividade é considerada a atividade central em torno da qual a maioria dos projetos de armazém são planeados Frazelle (2002), ou por outras palavras, os produtos são retirados da posição de armazenagem para serem agrupados por encomendas e posteriormente despachados até chegarem aos clientes.

5. Embalar e Etiquetar

Ao contrário das outras atividades, estas duas, embalagem e etiquetagem, são geralmente opcionais. A operação de embalagem consiste em agrupar e acondicionar os produtos em embalagens, e em termos de tempo, custos e segurança, é mais eficiente realizar este processo antes da expedição.

A etiquetagem é o processo de colocar etiquetas nos produtos, normalmente para identificar informações importantes, como o tipo de produto, origem, destino, preço, entre muitos outros, dependendo do intuito do mesmo. Este processo serve para organizar e facilitar a movimentação de carga dentro do armazém, garantir que os produtos sejam enviados para os destinos corretos e atender às exigências da localização evitando também erros durante o transporte (Frazelle, 2002).



Figura 6: Atividade de Embalar e Etiquetar Fonte: Mecalux (2022)

6. Divisão e agregação

Para Frazelle (2002), após a etapa anterior os produtos são novamente separados e agrupados conforme as encomendas de cada cliente. Este processo é indispensável quando as encomendas incluem mais do que um artigo e os itens não foram previamente agrupados corretamente durante o *picking*/separação dos produtos.



Figura 7: Atividade de Divisão e agregação Fonte: OnBlox (2023)

7. Expedição

Antes do envio dos produtos até aos clientes, é importante verificar se as encomendas estão completas e cumprem todas as normas da organização. Após essa verificação, os produtos são colocados nos locais adequados para o transporte. Também é necessário preparar a documentação, como listas de bens, etiquetas, contratos e todas as informações necessárias.

A expedição envolve diversas atividades, como a verificação para garantir a conformidade dos produtos, a correção dos artigos, a embalagem dos produtos em volumes apropriados, a preparação de documentos como listas de bens e etiquetas, entre outros (Frazelle, 2002).

Concluindo, esta etapa envolve conferir as quantidades, verificar possíveis danos, retificar documentos, carregar os veículos e enviar os pedidos aos clientes. Um bom planeamento desses processos melhora a eficiência e garante a satisfação dos clientes (Espinal et al., 2012).



Figura 8: Atividade de Expedição Fonte: MaxtonLogistica (2021)

2.3.2. Métodos de armazenagem

Existem dois métodos de avaliação de sistemas de inventário, o sistema FIFO e o LIFO.

O sistema FIFO provém do termo inglês “First-In-First-Out”, o que significa “o primeiro a entrar, é o primeiro a sair”. Neste sistema, assume-se que os artigos mais antigos do inventário são os primeiros a serem utilizados Yoo (2003). Desta forma, é garantido que os produtos que permanecem em *stock* são aqueles que foram armazenados mais recentemente.

O sistema LIFO decorre do termo em inglês “Last-In-First-Out”, cujo significado é “o último a entrar é o primeiro a sair”. Com este método assume-se que os itens mais recentes do inventário são os primeiros a serem utilizados Yoo (2003). Ao contrário do método anterior, neste é garantido que os artigos que permanecem em *stock* são os mais antigos.

Conforme destacam Palanivel et al. (2025), a escolha entre estratégias LIFO e FIFO não apenas afeta o controle físico do inventário, mas também exerce impacto direto nos custos operacionais, eficiência da cadeia de abastecimento e práticas de sustentabilidade a longo prazo.

De uma forma sucinta, os métodos FIFO e LIFO determinam a ordem de utilização dos artigos. Enquanto o FIFO garante que os itens mais recentes permanecem em *stock*, o LIFO prioriza o uso dos itens armazenados mais recentemente, deixando os mais antigos armazenados.

2.4. Mapeamento de Processos de armazenagem

O mapeamento de processos é essencial para as organizações que procuram melhorar a eficiência e a qualidade nas operações. Esta atividade traz vantagens, como por exemplo a ajuda na identificação e organização das atividades, uma visualização mais nítida dos fluxos que existem, uma facilidade de deteção das áreas a melhorar e ainda o ajustamento de processos às necessidades dos clientes e empresas.

Drei et al. (2019), descrevem o mapeamento de processos como uma ferramenta estratégica que identifica, descreve e otimiza atividades dentro de uma organização, isto é, regista todas as etapas de um processo de forma detalhada. Basicamente, este método consiste na representação visual das etapas de um processo, incluindo as entradas, as transformações realizadas durante o processamento e as saídas. É um recurso que permite entender como os processos estão ligados uns aos outros, identificar problemas e encontrar formas de os corrigir, de modo a gerar mais valor para o cliente final.

Para melhorar os processos de negócio nas empresas, é essencial mapear as atividades que os constituem. O primeiro passo para esse mapeamento é identificar os processos que estão incluídos no que se pretende analisar. No entanto, mapear processos não é uma tarefa simples. Quando é feito de forma manual, pode dificultar o alcance de resultados por não oferecer uma visualização gráfica clara e bem organizada.







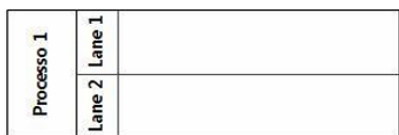
Para além do que já foi mencionado, o mapeamento de processos ajuda as organizações a desenvolver serviços que atendam melhor às necessidades dos clientes e, contribui para melhorar a comunicação e a colaboração entre os diferentes departamentos Drei et al. (2019). Para tornar os processos mais eficientes, é possível simplificar ou eliminar etapas quando estas são desnecessárias. Quando o mapeamento é bem elaborado, permite às empresas aumentar a produtividade, reduzir custos e alcançar melhores resultados nas suas operações.

Existem várias metodologias para a realização de mapeamento de processos, mas será abordada a *Business Process Modeling Notation* (BPMN). De acordo com Börger (2012), o BPMN foi criado para tornar o mapeamento de processos mais fácil, pois permite que estes sejam representados graficamente e ajustados sempre que necessário até que os objetivos sejam totalmente alcançados. Além disso, a notação padronizada do BPMN

procura simplificar a comunicação entre todas as pessoas envolvidas que utilizam esta metodologia, o que ajuda a tornar compreensão dos processos mais simples.

Um dos *softwares* mais utilizados e mais conhecidos para mapear processos é o *Bizagi Process Modeler*. Ele permite aos utilizadores representarem graficamente diferentes processos bem como as relações entre as etapas. Essa organização facilita a visualização completa do processo, ajuda a identificar problemas e a encontrar soluções. Na Tabela 1, identificam-se os principais elementos usados nesse *software*:

Tabela 1: Principais elementos da notação BPMN. Fonte: (Johann & Diedrich)

Elemento	Descrição	Notação
Evento	Um evento é uma ocorrência que acontece ao longo de um processo. Existem três tipos de eventos: início, intermédio e fim.	
Atividade	Uma atividade abrange o trabalho realizado pela empresa. As atividades podem ser classificadas em três tipos: processos, subprocessos e tarefas.	
Subprocesso	É usado para representar processos mais complexos, com várias atividades que podem ser modelados de forma separada, pois facilita na simplificação do modelo.	
Gateway	É utilizado para gerir divergências e convergências no fluxo, isto é, funciona como um ponto onde é necessário tomar uma decisão.	
Fluxo de sequência	Indica a sequência em que as atividades devem ser realizadas num processo.	
Piscina/Pool	Serve como estrutura gráfica de fluxo. Cada piscina corresponde a um único processo, sendo que o título da piscina indica o nome do processo mapeado no diagrama.	
Raia/Lane	É uma subdivisão dentro de uma piscina, utilizada para organizar ou categorizar as atividades.	

Desta forma, o mapeamento de processos é uma ferramenta essencial para melhorar a eficiência organizacional. Através de utilização de metodologias como o BPMN, torna-se possível simplificar processos, melhorar a comunicação entre departamentos e aumentar a produtividade das organizações. Além disso, ferramentas específicas, como por exemplo o *software* abordado, o *Bizagi Process Modeler*, ajudam a representar graficamente os processos e a encontrar soluções para os problemas encontrados. Concluindo, o mapeamento é um recurso estratégico que contribui significativamente para alcançar melhores resultados e atingir os objetivos que se pretende.

2.5. O impacto da inovação tecnológica nas operações logísticas de armazenagem

O impacto da tecnologia nas atividades de armazenagem tem revolucionado os processos logísticos, trazendo uma maior eficiência, precisão e controlo às operações. Os armazéns automatizados com AGVs (Veículos Guiados Automaticamente) permitem a movimentação das cargas de uma forma autónoma, o que reduz consideravelmente o esforço humano. Acresce que, quando integrados com inteligência artificial, estes veículos tornam-se ainda mais eficientes, conseguem otimizar rotas e o fluxo de materiais dentro dos armazéns, o que resulta num aumento significativo da produtividade Mammun et al. (2021).

As transportadoras de rolos, equipadas com sensores avançados são capazes de registar automaticamente as referências das caixas, o seu peso e outros dados relevantes, eliminando possíveis erros de desconcentração humana. O ideal seria que a tudo isto, fosse acrescentado um Sistema de Gestão de Armazém (WMS), que monitorizasse cada etapa em tempo real e garantisse que as operações decorressem de forma precisa e eficiente.

Tal como refere Vis (2006), os AGVs são robots autónomos que se deslocam sem intervenção humana para transportar bens e materiais. Geralmente são utilizados em armazéns e centros logísticos e é através destes equipamentos que a eficiência da organização é aumentada e reduzida a necessidade de trabalho manual. Estes veículos apresentam algumas vantagens, como a redução de custos laborais, operam em condições extremas, melhoram a precisão ao eliminar erros humanos e funcionam continuamente durante todo o tempo de utilização (Benevides, 2020).

Relativamente ao WMS, os autores Ramaa et al. (2012) definem-no como um sistema gerido por um banco de dados que tem como principal objetivo controlar o movimento e o armazenamento de materiais dentro de um armazém. Este sistema utiliza tecnologias como códigos de barras, QR Code, RFID e redes sem fio para acompanhar o fluxo de produtos em tempo real. O WMS pode ser básico, avançado ou complexo, isto é, pode ir desde um controlo simples de inventário até à otimização completa de operações, dependendo das necessidades.

Para Bartholdi & Hackman (2014), o WMS funciona como uma ferramenta que organiza, controla e otimiza as operações dentro de um armazém e ajuda ainda a gerir o fluxo de materiais, otimizar o uso do espaço e reduzir custos associados a mão-de-obra.

Constatamos assim que a inovação tecnológica tem vindo a desempenhar um papel fundamental em toda a evolução das operações de armazenagem, levando a melhorias significativas em termos de eficiência, controlo e precisão.

Devido ao aumento da complexidade das cadeias logísticas e a necessidade de resposta rápida às exigências do mercado, a implementação de tecnologias avançadas tornou-se imprescindível para melhorar os processos e reduzir custos.

De todas as áreas onde a inovação tem impacto, sem dúvida a automatização das operações é uma das mais relevantes. A introdução de AGVs veio permitir o transporte autónomo das cargas dentro dos armazéns, reduzindo a necessidade de intervenção humana, como destaca Dharmasiri et al. (2020). A utilização destes veículos permite a redução de erros causados pela interação humana, garante uma maior consistência nas tarefas realizadas e ajuda na redução de custos laborais numa melhor utilização dos recursos disponíveis, o que leva a que as operações sejam mais sustentáveis e produtivas.

Seguindo a mesma lógica de pensamento, os WMS destacam-se como ferramentas de controlo e otimização dos fluxos de materiais e informação. Estes sistemas permitem acompanhar, em tempo real, o movimento e o armazenamento das cargas, utilizando as tecnologias a seu favor. A implementação de um WMS não só melhora a precisão na gestão de inventários, como também facilita a tomada de decisões. Adicionalmente, os WMS podem ser adaptados às necessidades específicas de cada armazém, desde soluções simples até sistemas mais avançados que otimizam toda a cadeia logística.

A tudo o que já foi mencionado, acresce referir que a Internet das Coisas (IoT) permite recolher dados em tempo real sobre as operações do armazém, e ajuda a acompanhar tudo com mais precisão. Isto torna a fase de verificação do ciclo PDCA mais fiável, pois baseia-se em informações concretas. Assim, fica mais fácil aplicar melhorias na fase do Agir (El Jaouhari et al., 2022).

As diversas tecnologias, como as transportadoras de rolos equipadas com sensores avançados, estão diretamente relacionadas com a eficiência das operações de armazenagem. Estas tecnologias permitem a movimentação contínua de cargas e o registo automático de dados importantes. Com isto, os processos tornam-se mais rápidos e menos suscetíveis a erros, o que aumenta a confiabilidade das operações e, tal como os AGVs, contribui para a diminuição dos custos da mão-de-obra e para uma gestão mais eficiente dos recursos.

De forma sucinta, a influência da inovação nas operações de armazenagem traduz-se numa maior produtividade, redução de custos e melhoria na qualidade dos serviços prestados. A automatização e a digitalização não só simplificam tarefas, como também

permitem às organizações adaptar-se de forma mais eficaz às mudanças no mercado. A inovação não é apenas uma vantagem competitiva, mas uma necessidade para alcançar eficiência operacional e garantir o sucesso num ambiente logístico.

2.6. Metodologias para priorização de ações de melhoria na armazenagem

Para melhorar as operações de armazenagem, é essencial analisar os custos e os benefícios das ações a implementar e definir quais é que devem ser implementadas primeiro para se obter ganhos de eficiência. O objetivo principal é reduzir custos operacionais, minimizar erros humanos e aumentar a eficiência, permitindo garantir um retorno financeiro num curto prazo. Tecnologias avançadas são ferramentas importantes para alcançar esses objetivos, mas o investimento só faz sentido se trouxer resultados reais e benefícios claros para a empresa.

As metodologias para priorização de ações de melhoria na armazenagem passam essencialmente por uma análise de custos e benefícios. É importante avaliar o impacto financeiro que as tecnologias vão trazer para a empresa, nomeadamente a redução de custos operacionais, diminuição da mão de obra e redução de erros humanos, para aferir da possível existência de retorno financeiro num curto espaço de tempo.

A implementação de tecnologias avançadas é importante, não por obrigatória, mas porque permite que efetivamente haja melhorias e benefícios para as empresas, será um investimento que rapidamente se recuperará. Como já referido, a automação por meio da introdução de AGVs para o transporte autónomo de cargas, elimina erros humanos, reduz custos e diminui tempos de deslocação. Roy et al. (2015) sugerem que a utilização de modelos de filas e simulação é uma forma que permite testar diferentes configurações de armazenagem e contribuí para uma melhor organização do espaço e um aumento na eficiência do armazém.

A digitalização também desempenha um papel essencial, pois a implementação WMS, permite uma monitorização em tempo real, gestão precisa de inventários e tomada de decisões mais consistentes.

A sustentabilidade é uma prioridade, e tendencialmente uma obrigação, temos por isso de usar melhor os recursos disponíveis e evitar desperdícios, sendo, para isso, importante implementar sistemas que monitorizem os dados em tempo real, por permitir, quando necessário, fazer ajustes para melhorar os processos e aumentar a eficiência das operações a longo prazo.

Por fim, mas não menos importante, é preciso garantir que as melhorias estejam alinhadas com as necessidades do mercado e as expectativas dos clientes, para ajudar o armazém a responder melhor às mudanças na procura e a ser mais competitivo.

2.7. Simulação de processos com o *software Jaamsim*

Num mercado cada vez mais exigente, as empresas procuram soluções para otimizar os processos e aumentar a eficiência. A simulação surge como uma ferramenta estratégica que permite analisar e melhorar sistemas sem a necessidade de fazer alterações diretas nos processos reais. Ao criar modelos digitais, é possível testar diferentes cenários, antecipar desafios e reduzir custos operacionais sem impactar as operações. Esta abordagem alinha-se com os princípios da Indústria 4.0, na qual a virtualização dos sistemas permite antecipar falhas, promover melhorias contínuas e responder com agilidade às dinâmicas do mercado.

Segundo Banks (2000), a simulação é a imitação do funcionamento de um processo ou sistema real ao longo do tempo que possibilita uma análise das características operacionais. Esta metodologia é essencial para compreender sistemas, testar cenários hipotéticos e apoiar o desenvolvimento de novos processos ou a otimização dos já existentes. Além disso, oferece outras vantagens, tais como a redução de custos operacionais, melhoria da eficiência dos processos e diminuição do tempo de espera. Conforme destacam Hlupic & Paul (1996), a simulação permite uma análise mais segura antes da implementação de mudanças, o que evita investimentos elevados e minimiza riscos. Do ponto de vista estratégico, esta capacidade de antever resultados antes da implementação real contribui para uma tomada de decisão mais racional e baseada em evidência.

Já Gaziero & Cecconello (2019) definem a simulação como uma ferramenta de planeamento que representa o funcionamento de um sistema real e tem como principal objetivo apoiar a tomada de decisão, pois permite uma análise de cenários e a previsão de possíveis resultados antes da aplicação de mudanças. Embora o estudo de Chance et al. (1996) esteja focado na indústria, os princípios também se aplicam à logística. Através da modelação de processos, é possível planejar operações e tomar decisões estratégicas, especialmente em contextos onde testes físicos são inviáveis devido a restrições de tempo, custos ou impactos operacionais. Neste sentido, a simulação computacional torna-se particularmente útil em ambientes logísticos complexos.

No entanto, a construção de um modelo de simulação pode ser um desafio devido à complexidade dos sistemas e à necessidade de representar elementos como processos, equipamentos e operadores. Para Chance et al. (1996) a principal dificuldade consiste em representar estes fatores de forma adequada, sem tornar o modelo excessivamente detalhado, o que pode dificultar a manutenção, visualização e aumentar o tempo de execução. Banks (2000) destaca ainda que a simulação possibilita testar mudanças sem riscos reais, diagnosticar problemas e melhorar a tomada de decisões, mas que também existem desafios, como a complexidade e o tempo exigido no desenvolvimento do modelo além da dificuldade de interpretar alguns resultados.

Com o avanço tecnológico, a simulação tornou-se mais acessível e impulsionou o desenvolvimento de um maior número de *softwares* especializados nesta área. A escolha

adequada do *software* é crucial para garantir ganhos de produtividade e redução de custos operacionais. No entanto, Hlupic & Paul (1996) alertam que uma escolha inadequada pode comprometer os resultados e levar a desperdícios financeiros e à falha no cumprimento dos objetivos estabelecidos. Van Groenendaal et al. (2000) ressaltam que a execução de um modelo de simulação e a geração de relatórios não garantem que os resultados sejam precisos. Após o desenvolvimento do modelo, é fundamental verificar se ele representa corretamente o sistema real e garantir a consistência e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Para Hong & Nelson (2009), a simulação também permite ajustes nos parâmetros do sistema para analisar o desempenho em diferentes condições. O objetivo principal é encontrar a melhor combinação de parâmetros para maximizar a eficiência e melhorar os processos. Para isso, é essencial reunir informações sobre o sistema que se pretende representar e melhorar, e os dados podem ser obtidos em registros históricos ou recolhidos ao longo do tempo. Conforme destaca Rozinat et al. (2009), a qualidade e a precisão dessas informações são fundamentais para garantir que o modelo reflita corretamente a realidade e produza resultados confiáveis. Law (2009) reforça que, na recolha de dados, é importante seguir dois princípios: primeiro, quem recolhe os dados deve compreender que o tipo, formato e quantidade de dados dependem das necessidades de quem os utilizará; segundo, é essencial entender como esses dados foram gerados. Esse cuidado garante uma interpretação correta das informações e contribui para que a simulação produza análises mais precisas.

Desta forma, a simulação permite que empresas tomem decisões estratégicas com maior segurança, possibilita testar as melhorias antes da implementação e minimiza riscos. Além de apoiar a otimização de processos, possibilita ajustes rápidos a mudanças do mercado. A capacidade de prever diferentes cenários e antecipar desafios torna a simulação uma ferramenta indispensável para a competitividade e inovação empresarial.

Neste trabalho, utilizou-se o *software JaamSim* para realizar as simulações. O *JaamSim* é um *software* de simulação gratuito que disponibiliza um ambiente gráfico integrado com diversos recursos para modelação, animação e análise de resultados. O seu funcionamento baseia-se num conjunto de módulos que representam diferentes elementos de um sistema real. A escolha do *JaamSim* foi motivada pela facilidade da sua utilização, pela possibilidade de criação de modelos customizados e pela sua compatibilidade com práticas académicas que valorizam transparência, replicabilidade e controlo.

Na modelação com o *JaamSim*, os principais componentes incluem as entidades, que representam objetos dentro do sistema, como veículos, produtos ou recursos em movimento, os processos, onde ocorrem operações como filas, serviços ou transformações e os componentes de fluxo, que define os caminhos percorridos pelas entidades entre diferentes elementos do modelo. A combinação destes elementos

permite construir modelos detalhados e visuais e facilita a análise do funcionamento do sistema (King & Harrison, 2013).

Acresce referir que o *software* integra diversas funcionalidades que tornam o processo de modelação e análise mais eficiente. Destacam-se a ferramenta de animação, que permite acompanhar em tempo real o comportamento do sistema simulado, a geração automática de relatórios que fornece informações detalhadas sobre a execução da simulação, e os recursos estatísticos, que possibilitam o tratamento e interpretação dos dados. Estas funcionalidades garantem uma análise mais precisa dos resultados, facilitam a avaliação do desempenho do sistema e apoiam a tomada de decisões.

A flexibilidade do *JaamSim* é evidenciada em vários estudos. Zeng et al. (2022) realizaram um estudo onde fizeram um modelo de simulação para alocar camiões e escavadeiras em minas. Este demonstrou que o *software* permite otimizar a distribuição dos veículos, reduzir tempos de espera e avaliar o impacto de diferentes estratégias no fluxo de trabalho. Amarantou et al. (2023), por sua vez, utilizaram o *JaamSim* na simulação do fluxo de pacientes num departamento de urgência hospitalar, onde foi demonstrada a utilidade da simulação, nomeadamente na identificação de problemas e na análise de diferentes cenários para melhorar a eficiência dos processos. Além dos estudos já referidos, Kumar et al. (2021) também recorreram ao *JaamSim* para simular redes de drones aplicadas à monitorização do tráfego rodoviário, cujo objetivo era analisar estratégias de prevenção de colisões e otimizar a movimentação. O estudo evidenciou a capacidade do *software* para avaliar diferentes abordagens operacionais e permitiu encontrar soluções para uma gestão mais eficiente do tráfego com recurso a drones.

Desta forma, o *JaamSim* revela-se uma solução versátil para modelação e optimização de processos em diferentes áreas e permite a análise e melhoria de sistemas complexos através de simulação detalhada e suporte à tomada de decisão. Como demonstrado nos casos de estudo anteriores, a sua capacidade de modelar sistemas complexos, testar cenários alternativos e gerar estatísticas detalhadas faz dele uma ferramenta valiosa para melhorar a eficiência operacional e a gestão de recursos nas organizações.

Apesar da flexibilidade e potencial demonstrados, o *JaamSim* ainda apresenta uma utilização limitada no contexto logístico em tempo real, sobretudo no que diz respeito à sua integração com sistemas de gestão como o WMS. Neste sentido, futuros estudos poderão explorar a sua aplicação em ambientes reais de operação, não apenas como ferramenta de simulação, mas também como suporte à monitorização e à tomada de decisão contínua. Esta evolução poderá representar um contributo importante para uma maior ligação entre a simulação e a gestão operacional.

Acresce ainda uma outra limitação, a dificuldade do *JaamSim* em representar com precisão fatores humanos como pausas, fadiga, ritmos de trabalho variáveis ou tempos de adaptação a novas tarefas. Estes aspetos, embora mais difíceis de quantificar, têm impacto direto na eficiência operacional e na fiabilidade dos resultados obtidos, sobretudo em contextos logísticos com forte envolvimento humano. A ausência destas variáveis no

modelo pode conduzir a estimativas ligeiramente mais otimistas do que as verificadas na prática, sendo por isso recomendável que os resultados da simulação sejam sempre complementados com uma análise crítica e contextualizada.

Em síntese, o *JaamSim* revelou-se uma ferramenta eficaz para a modelação e análise de processos, destacando-se pela sua acessibilidade, flexibilidade e capacidade de representação visual. No entanto, como qualquer ferramenta, apresenta limitações que devem ser consideradas na sua aplicação. A evolução da sua utilização em contextos logísticos poderá passar pela integração com sistemas reais e pela incorporação de variáveis humanas, permitindo uma simulação ainda mais próxima da realidade. Com base nas evidências recolhidas, reforça-se a importância da simulação como instrumento estratégico de apoio à decisão e otimização de processos no contexto da Indústria 4.0.

3. CASO DE ESTUDO

A armazenagem e a logística desempenham um papel essencial na cadeia de abastecimento, uma vez que garantem a organização e a eficiência operacional. No entanto, muitos processos ainda são realizados de forma manual, o que pode levar a falhas humanas, atrasos e ineficiências. Com o crescimento da procura e a necessidade de maior agilidade nas operações, a automação surge como uma alternativa estratégica para melhorar os processos e reduzir custos.

Este estudo foca-se na análise do processo atual de armazenagem de uma empresa e na proposta de um sistema automatizado de movimentação e rastreamento de carga, com o objetivo de aumentar a eficiência e minimizar falhas operacionais.

3.1. Apresentação da empresa

A Europackers foi fundada em 2017 e é especialista em transporte e mudanças de bens pessoais. A empresa oferece um serviço completo de porta a porta, que abrange mudanças tanto a nível nacional como internacional, com especial destaque para o transporte de bens entre a Europa e o Brasil. A organização possui uma presença estratégica em várias cidades europeias e conta com sete delegações localizadas no Porto, Lisboa, Madrid, Barcelona, Frankfurt, Genebra e Paris, o que permite assegurar uma operação eficiente e um acompanhamento próximo dos clientes.

O principal objetivo da Europackers é assegurar que os bens transportados chegam ao destino com segurança e eficiência, independentemente da distância. A proximidade é, igualmente, um dos fatores mais valorizados pela empresa, não apenas através da sua presença física em diferentes países, mas também por meio de um serviço de atendimento permanente, disponível e adaptado às necessidades específicas de cada cliente. Esta abordagem é reforçada por uma ampla dispersão geográfica, que permite cobrir uma parte significativa da Europa Ocidental com equipas e viaturas operacionais em cada local, o que assegura assim uma maior eficácia e capacidade de resposta a nível local. Esta presença territorial estratégica constitui uma opção pensada para melhorar não só as mudanças internacionais, mas também os serviços de transporte locais e reforça a confiança e a agilidade em todas as etapas do processo.

Outro pilar fundamental do serviço prestado pela Europackers reside na atenção dedicada às embalagens utilizadas. Estas são preparadas com rigor e personalizadas de acordo com as características dos bens a transportar, tendo sempre em consideração as necessidades específicas de cada cliente. O objetivo é garantir a máxima proteção ao longo de todo o percurso.

De forma a garantir que todos os bens chegam ao destino final em perfeitas condições, a empresa disponibiliza um serviço completo que inclui recolha, embalamento,

armazenagem, transporte e entrega, e assegura a integridade da carga em todas as fases. A empresa destaca-se, ainda, pela sua experiência em processos alfandegários, documentação e transporte.

A Europackers aposta também numa frota moderna e equipada para transporte rodoviário, apoiada por parcerias estratégicas com operadores logísticos o que permite assegurar as melhores soluções para cada tipo de mudança.

Cada etapa do transporte é monitorizada em tempo real, de forma a garantir pontualidade, rastreabilidade e segurança. A organização disponibiliza ferramentas de rastreamento e um suporte personalizado ao longo de todo o processo cujo objetivo é permitir que os clientes acompanhem os seus bens com transparência e confiança.

3.2. Problema inicial e proposta de solução

Atualmente, a empresa enfrenta desafios significativos na operação logística, uma vez que as atividades de armazenagem e separação de carga são realizadas sem suporte de tecnologia.

O fluxo de trabalho tem início com a recolha das cargas na casa dos clientes. De seguida, realiza-se a receção manual das cargas, cuja descarga é feita para paletes sem apoio de um sistema automatizado de rastreamento ou verificação. A atribuição das referências é feita de forma manual, o que aumenta a probabilidade de ocorrência de erros. A selagem das caixas é realizada com fita adesiva de forma manual e, posteriormente, é aplicado o plástico filme para paletizar a carga. A junção de todos estes passos torna o processo utilizado lento e suscetível a falhas. Por fim, as caixas são alocadas manualmente no armazém e separadas também de forma manual para os processos de expedição ou armazenamento.

Na etapa de expedição, os colaboradores realizam a separação de cada unidade, onde verificam individualmente as referências e redistribuem as cargas conforme os requisitos de envio. Caso a carga não vá diretamente para o contentor, permanece no armazém, sendo novamente separada, paletizada e alocada ao destino de armazenamento.

Esta metodologia operacional origina diversas ineficiências, como por exemplo a ausência de automação nos processos de triagem, identificação e movimentação. Isto aumenta a probabilidade da existência de erros na identificação e rastreamento das cargas. Acresce que, o tempo de processamento das cargas é elevado e existe uma dependência excessiva da intervenção humana, o que não apenas aumenta o risco de falhas como gera fadiga operacional nos colaboradores, resultando numa redução da produtividade ao longo do tempo.

Para solucionar as limitações mencionadas, foram desenvolvidos, através de simulação, dois novos sistemas: um semiautomático e outro totalmente automatizado. Ambos os sistemas integram transportadoras de rolos, pesagem automática, leitura de QR Codes,

robôs de paletização e fimagem, e máquinas de fecho automático, o que permite a movimentação automatizada das caixas e elimina a necessidade de transporte manual entre etapas.

No modelo semiautomático, algumas tarefas ainda exigem intervenção do operador, como a colocação inicial da carga na transportadora de rolos, o auxílio no fecho da caixa e transporte até ao armazenamento. No entanto, etapas como a pesagem, triagem conforme o tipo de caixa (020, 010 ou fora de formato), atualização da base de dados e a separação para expedição já são parcialmente automatizadas, o que reduz erros e esforço físico.

No modelo totalmente automatizado, a automação está presente em quase todas as etapas, incluindo o fecho automático das caixas, a triagem por tipo de caixa, a paletização e o transporte até ao local destinado ao armazenamento por AGVs. A localização das cargas é atualizada em sistema, e a verificação da separação da carga para expedição é feita com base numa picagem via *QR Code*, que rastreia o destino das cargas.

A implementação destes sistemas visam reduzir o tempo de processamento das cargas, melhorar a confiabilidade das informações e minimizar falhas humanas. Para validar a eficácia da automação, foi realizada uma simulação computacional onde se comparou o desempenho do sistema manual com os modelos automatizados. A análise demonstrou uma redução significativa no tempo de movimentação e processamento de cargas. Consequentemente, observou-se um aumento na produtividade operacional e uma redução da sobrecarga dos funcionários. Todos esses fatores contribuem para otimizar o fluxo de trabalho, aumentar a eficiência operacional e reduzir os custos logísticos da empresa.

As simulações desenvolvidas para avaliação dos modelos logísticos foram realizadas em ambiente tridimensional (3D) no *software JaamSim*, o que permitiu uma representação visual realista dos fluxos de trabalho, das interações entre equipamentos e operadores e do comportamento global do sistema. Adicionalmente, foram realizados códigos em *Python* para o tratamento estatístico dos dados extraídos das simulações, o que possibilitou o cálculo de métricas de desempenho e a geração automatizada de gráficos comparativos.

3.3. Mapeamento de processos

No decorrer das operações logísticas da empresa, são utilizadas caixas com diferentes características que impactam o desempenho dos processos de movimentação e armazenagem. Existem três tipos principais de caixas: a caixa grande, com dimensões de 73x57x50 cm e volume de 0,20 m³, a caixa pequena, com 60x40x40 cm e volume de 0,10 m³, e caixas com formato fora do padrão habitual, designadas por caixas 020, 010 e caixas fora de formato, respetivamente. Todas estas caixas podem apresentar características especiais, como fragilidade, sendo necessário colocá-las na parte superior das paletes, ou

elaborar uma proteção adicional, sendo neste último caso utilizadas caixas de madeira para reforço. Estas especificidades influenciam diretamente a forma como as caixas são identificadas, separadas, empilhadas e armazenadas ao longo do fluxo logístico.

O mapeamento de processos do ANEXO C foi elaborado em BPMN com o *software* gratuito *Bizagi Modeler*, amplamente utilizado em contextos acadêmicos e profissionais. O ANEXO C ilustra três abordagens distintas na gestão de cargas num armazém, diferenciando-se pelo nível de automação envolvido: o processo atual, o processo semiautomático e o processo automático. Cada um destes fluxos descreve, de forma detalhada, as etapas que ocorrem desde a recepção da carga até ao seu armazenamento final no contentor, e permite a realização de uma análise comparativa das vantagens e desafios inerentes a cada modelo. Complementarmente, os modelos tridimensionais das simulações correspondentes aos processos semiautomático e automático estão representados nos ANEXOS A e B, respetivamente. Estas simulações 3D foram desenvolvidas no *software JaamSim* e permitem visualizar com maior realismo o funcionamento dinâmico de cada modelo.

No processo atual, todas as atividades são realizadas manualmente. No momento da recolha é colocada a referência da carga e depois a mesma segue para o armazém. Assim que a carga chega ao armazém, procede-se à sua descarga. Em seguida, as caixas são fechadas com fita, colocadas em paletes e depois a carga é alocada num espaço destinado para o armazenamento. Posteriormente é feita uma triagem, onde as cargas são encaminhadas para o local de expedição ou mantida em *stock*, conforme os casos. No caso de expedição, existe ainda uma etapa adicional de etiquetagem antes da carga ser carregada no contentor. Apesar de funcional, este modelo apresenta diversas limitações, como a elevada dependência do fator humano, o risco de existir erros na separação e alocação da carga, e uma eficiência operacional reduzida, uma vez que cada tarefa consome um tempo significativo.

No processo semiautomático, a introdução da tecnologia melhora alguns aspetos do fluxo logístico. Inicialmente, o operador posiciona os volumes na transportadora de rolos, onde a carga passa por uma balança que realiza sua pesagem. Após a pesagem, a carga segue o caminho da transportadora de rolos e vai até a um sensor que realiza a picagem do QR Code. Posto isto, a carga é encaminhada para uma transportadora de rolos e, em seguida, direcionada para uma plataforma giratória, na qual, enquanto a caixa gira, o operador segura a fita adesiva, o que permite que a carga seja fechada à medida que a fita envolve a caixa. Após o fecho das caixas, a carga é encaminhada através de transportadoras de rolos para a paletização, onde é organizada de acordo com as suas características e tamanho, ou seja, conforme o porte das caixas (grande ou pequeno), ou a existência de artigos fora de formato, cada categoria segue um percurso distinto. Posteriormente, a palete é envolvida com filme plástico e, por fim, é alocada pelo operador no armazém, de acordo com as necessidades operacionais.

Neste fluxo, a localização das cargas destinadas à expedição é facilmente consultada através de um sistema automático que atualiza a base de dados das cargas ou por meio da leitura dos *QR Codes*. Quando a carga é separada para expedição, a picagem do *QR Code* da caixa determina automaticamente se ela vai ou não no contentor, sem a necessidade de verificação individual das referências. Isso facilita o processo de expedição e a carga é alocada diretamente no contentor ou mantida em *stock*, conforme o destino.

A automação incorporada neste modelo reduz o esforço físico dos operadores, minimiza erros humanos e melhora o processo. No entanto, a intervenção humana ainda se mantém necessária em momentos específicos, como na colocação das cargas na transportadora de rolos, no fecho das caixas, na etapa de armazenagem das mercadorias no armazém e na separação para o contentor.

No processo automático, a automação está presente em quase todas as etapas. A carga é recebida no armazém e colocada na transportadora de rolos, onde passa por um sistema automatizado de verificação, que inclui pesagem e posteriormente a identificação das caixas é feita através da leitura de um *QR code*. Após esses processos, a carga é direcionada para uma transportadora de rolos, onde segue até uma máquina automatizada que sela as caixas com fita adesiva. Diferente do processo semiautomático, onde o operador segura a fita, neste caso, a máquina realiza o fecho das caixas de forma automática, e elimina a necessidade de existir intervenção humana.

Após o fecho das caixas, a carga é encaminhada automaticamente para a paletização, onde as caixas são organizadas conforme as suas características e tamanho. Ou seja, as caixas podem ser separadas com base no porte (grande ou pequeno), características especiais ou formatos irregulares. Este processo é automatizado e assegura que as caixas sigam percursos distintos conforme essas classificações.

Posteriormente, a palete é envolvida com filme plástico e depois o transporte até ao local de armazenamento é realizado por AGVs, que transportam as caixas para as localizações pré-definidas no armazém, sem a necessidade de intervenção humana. No entanto, em casos excepcionais, como no armazenamento de caixas com formatos irregulares ou características especiais, é necessária a intervenção humana para garantir que a carga seja alocada corretamente.

Neste fluxo, a localização das cargas destinadas à expedição é facilmente consultada através de um sistema automático que mantém a base de dados atualizada, ou por meio da leitura dos *QR codes*. A picagem das caixas não só permite determinar automaticamente se a carga será alocada no contentor ou mantida em *stock*, como também regista a entrada da carga no sistema, organiza a sua ordem e facilita a localização posterior nas paletes. Isso agiliza o processo de expedição e reduz os erros operacionais.

A automação incorporada neste modelo reduz significativamente o esforço físico dos operadores, minimiza erros humanos e melhora todo o processo logístico. Contudo, a

intervenção humana continua a ser necessária em momentos específicos, como na separação das caixas para o contentor ou quando ocorrem situações excepcionais que exigem a alocação manual, como o armazenamento de caixas fora do padrão ou de formatos irregulares.

Em síntese, a principal diferença entre o modelo semiautomático e o modelo totalmente automatizado reside no grau de intervenção humana exigida ao longo do processo. No modelo semiautomático, embora existam melhorias significativas nos processos de fecho da caixa com fita e armazenamento ainda são necessárias ações manuais. Já no modelo automático, essas operações são quase totalmente automatizadas, e realizadas por máquinas completamente automatizadas. A inclusão dos AGVs, resulta numa maior eficiência, menor risco de erro humano e menor esforço físico por parte dos operadores.

Desta forma, esta progressão demonstra como o aumento da automação pode transformar significativamente a produtividade e a precisão na gestão de armazéns.

3.4. Simulação e Análise do Processo Logístico

A simulação realizada no *JaamSim* permitiu extrair dados fundamentais para a análise da eficiência operacional dos processos semiautomático e automático de gestão de cargas no armazém. Esses dados revelaram informações cruciais sobre o tempo necessário para cada etapa do fluxo logístico e a capacidade de processamento de diferentes categorias de carga.

Os tempos atribuídos a cada etapa do processo foram determinados com base num estudo das máquinas disponíveis no mercado, selecionadas pela sua capacidade de atender às necessidades operacionais que se pretendia. Para garantir maior precisão, foi calculada uma média dos tempos de operação dessas máquinas. Essa abordagem permitiu avaliar com maior exatidão os tempos de execução de cada fase do processo, incluindo a pesagem das cargas, a picagem do *QR code*, a paletização das caixas entre outros.

Foram analisadas as unidades máximas de caixas que ficaram em filas de espera ao longo de algumas fases, como na etapa de pesagem, leitura de referência e nas zonas de paletização e armazenamento, o que posteriormente permite identificar possíveis falhas e pontos de melhoria ao longo da cadeia logística.

A análise dos tempos extraídos da simulação demonstrou a importância de avaliar detalhadamente cada fase do processo. A capacidade máxima de geração de cada uma das cargas foi um dos indicadores tidos em conta, pois este permite compreender quantas unidades podem ser processadas sem comprometer o fluxo contínuo dentro do armazém. O ajuste desse fator é essencial para evitar congestionamentos e garantir a eficiência da operação.

Outro ponto analisado foi o tempo de trabalho nas transportadoras de rolos, que mede a eficiência no posicionamento e movimentação das cargas. Esses valores permitiram identificar oportunidades para melhorar a velocidade da transportadora de rolos e ajustar a interação dos operadores com o sistema, reduzindo tempos mortos e aumentando a eficiência. A pesagem das cargas também se revelou um elemento importante para o controlo de qualidade, uma vez que influencia diretamente a conformidade dos padrões logísticos e a precisão do peso na expedição.

A leitura do *QR Code*, identificação das cargas, mostrou-se fundamental para o rastreamento eficiente dos itens, o que garante que cada unidade seja corretamente registada no sistema antes de seguir para a selagem com fita. A etapa de selagem, por sua vez, teve impacto direto na continuidade do fluxo de transporte.

Os tempos de paletização variaram de acordo com o formato das cargas, sendo um fator crítico para a otimização do espaço de armazenamento e o preparo das cargas para expedição. O armazenamento das cargas também apresentou variações dependendo do setor do armazém e do número de volumes, o que influencia diretamente a organização dentro do armazém. A correta distribuição dos volumes possibilita um aproveitamento estratégico do espaço e uma preparação mais eficiente das mercadorias para o transporte.

A interligação dos dados extraídos da simulação com o mapeamento de processos confirmou a eficácia dos modelos semiautomático e automático na melhoria da logística interna. A implementação de transportadores de rolos, sensores de verificação, balança, entre outros demonstrou como a tecnologia pode melhorar a organização e a precisão operacional. Apesar dessas melhorias, foi notório que a intervenção humana ainda é necessária em determinados momentos, como na disposição final dos volumes dentro do armazém, o que reforça a necessidade de haver um equilíbrio entre automação e controlo manual.

A comparação entre os modelos manual, semiautomático e totalmente automatizado indicou que a automação progressiva é um caminho viável para otimizar a produtividade, reduzir custos operacionais e melhorar a gestão logística a longo prazo. A utilização de ferramentas de simulação revelou-se essencial para avaliar e aprimorar continuamente os processos logísticos, e permitiu um planeamento mais eficiente e fundamentado na análise precisa dos tempos de execução das operações. O tempo total do processo, extraído da simulação, foi também um indicador chave que permitiu medir a duração completa de todo o fluxo logístico desde a geração da carga até ao armazenamento final. Dessa forma, a simulação contribuiu para que o armazém opere de maneira mais eficiente, alinhando tecnologia e gestão de recursos e processos para obter os melhores resultados possíveis.

3.5. Resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos a partir das simulações realizadas no âmbito deste estudo, com recurso ao *software JaamSim*. Para garantir uma comparação justa dos dados, as condições iniciais, nomeadamente o número de caixas e os respetivos formatos, foram mantidas iguais em todos os cenários simulados.

Foram analisadas três configurações distintas do processo logístico: manual, semiautomático e totalmente automático. No modelo manual, todas as etapas são realizadas por operadores, desde a receção, separação e paletização até à expedição, sem o auxílio de tecnologia. No modelo semiautomático, alguns processos são melhorados com o uso de equipamentos como balanças, transportadora de rolos e sistemas de leitura de *QR code*, embora a intervenção humana continue a ser necessária em diversos pontos. Já no modelo totalmente automático, a maior parte das atividades logísticas são realizadas por sistemas automatizados e robôs, incluindo pesagem, selagem, paletização, transporte e armazenamento das cargas. Em cada um dos modelos referidos anteriormente, manual, semiautomático e automático, foram registados os tempos totais de execução do processo, bem como os valores observados nas principais etapas. Com base nesses dados, foi possível comparar o desempenho de cada modelo.

No caso do processo manual, os tempos de execução de cada etapa foram obtidos por meio de cronometragens manuais, utilizando um cronômetro digital não certificado. Foi calculada a média dos valores registados para representar o tempo médio de execução de cada tarefa, e os resultados detalhados encontram-se no ANEXO D.

Com base na análise dos tempos registados para cada etapa do processo manual (ANEXO D), é possível identificar limitações relevantes no modelo atual de funcionamento da empresa. Ainda que funcional, o processo é intensivo em tempo e altamente dependente da intervenção humana, o que aumenta a suscetibilidade a erros e contribui para a variabilidade dos resultados.

As fases iniciais, como a descarga das caixas, apresentam menor complexidade e menor duração (média de 32,607 s). Contudo, as etapas subsequentes, como o fecho com fita, paletização e, em particular, o armazenamento de caixas fora de formato (com média de 194,483 s), revelam-se mais demoradas. Por outro lado, tarefas como a aplicação de película nas paletes registam tempos significativamente inferiores, o que evidencia a baixa complexidade associada a este processo. Ainda assim, somadas ao restante fluxo, estas operações contribuem para um processo globalmente demorado e ineficiente, sobretudo em contextos com maior volume de trabalho.

Destaca-se ainda a etapa de separação das caixas por destino, entre expedição e *stock*, representada por “separar contentor” no ANEXO D, esta tarefa representa um fator crítico. Atualmente realizada de forma manual, esta atividade exige atenção constante e é propensa a erros. A futura introdução de leitura automática por *QR Code* permitirá reduzir

substancialmente o tempo desta tarefa, além de garantir rastreabilidade e maior fluidez operacional.

Em resumo, as principais limitações não se encontram na receção da carga, mas nas etapas seguintes de preparação e movimentação interna. Este diagnóstico reforça a necessidade de adotar soluções tecnológicas que permitam automatizar as operações críticas, de forma a reduzir os tempos de execução, o esforço físico dos operadores e melhorar o controlo e a uniformidade dos processos.

Para garantir a validade estatística dos dados recolhidos, foi determinado o número mínimo de cronometragens necessárias com base na distribuição normal, considerando um erro máximo admissível de 10%, valor mais comumente aceite em práticas comuns de medição de tempos no setor logístico. O cálculo foi realizado através da Equação 1.

$$n = \left(\frac{Z \cdot \sigma}{E} \right)^2 (1)$$

Equação 1: Determinação do número mínimo de cronometragens com base na distribuição normal

O Z representa o valor crítico da distribuição normal (1,645 para um nível de confiança de 90%), σ corresponde ao desvio padrão e E ao erro máximo tolerado, definido como 10% da média. Os valores mínimos de cronometragens necessárias para cada uns dos processos estão apresentados no ANEXO E.

Da análise deste anexo, verifica-se que, para todos os processos analisados, o número de cronometragens efetuadas foi igual ou superior ao mínimo requerido.

Com base em todos os resultados obtidos nas simulações, foi possível calcular as percentagens de melhoria da eficiência (Tabela 2) entre os diferentes modelos e evidenciar os ganhos obtidos com a introdução progressiva da automação. O ganho de eficiência foi calculado com base na diferença percentual entre o tempo total do processo atual e o tempo total do novo processo (semiautomático ou automático) (Equação 2).

$$\text{Ganho de Eficiência} = \left(\frac{T_{\text{Atual}} - T_{\text{modelo}}}{T_{\text{Atual}}} \right) \times 100 (2)$$

Equação 2: Cálculo do Ganho de Eficiência (%)

Este cálculo permitiu demonstrar, de forma clara as vantagens da automatização, e mostrou quanto tempo pode ser poupado e quão mais eficiente se torna o processo ao passar de um modelo manual para um mais automatizado.

Como evidenciado na Tabela 2, o ganho médio de eficiência foi de 50,35% para o processo semiautomático e de 56,30% para o processo automático, em comparação com o modelo atual. Estes valores demonstram uma melhoria significativa na redução do tempo total necessário para a realização das operações, validando os benefícios da progressiva automatização.

Tabela 2: Ganho de Eficiência (%) dos Processos Automático e Semiautomático em Relação ao Processo Atual

Simulação	Tempo Total Automático (s)	Tempo Total SemiAutomático (s)	Tempo Total Atual (s)	Ganho Eficiência Processo Semiautomático (%)	Ganho Eficiência Processo Automático (%)
1	642,9	745	2020,9	63,14	68,19
2	537,1	628,6	1326	52,59	59,49
3	585,7	698,4	1691,8	58,72	65,38
4	268,8	307,6	361,8	14,98	25,70
5	562,3	684,3	1589,9	56,96	64,63
6	1653,7	1755,8	5451,2	67,79	69,66
7	455,9	526,2	1075,8	51,09	57,62
8	585,7	698,4	1691,8	58,72	65,38
9	268,8	307,6	361,8	14,98	25,70
10	553,7	573,9	1512,3	62,05	63,39
11	626,3	644,6	1365,6	52,80	54,14
			Média	50,35	56,30

Para validar a automação dos processos de armazenagem, foram realizadas várias simulações com três cenários considerados exequíveis: o sistema atual, sistema semiautomático e o sistema automático. As simulações foram feitas utilizando o *software JaamSim*, Versão 2024.9.00, que é gratuito e bastante utilizado em contextos acadêmicos.

A simulação foi utilizada porque a implementação em tempo real seria inexecutável nesta fase do projeto. O uso do *software* permite, sem custos, simular o impacto das ações a implementar em termos de recursos, tempo e ocorrência de erros, e possibilita uma análise detalhada antes da aplicação real. Este tipo de ferramenta é especialmente adequado para processos de armazenagem, pois permite testar diferentes configurações operacionais sem interromper o funcionamento do sistema, identificar antecipadamente as falhas logísticas, prever o desempenho de cada cenário e apoiar a tomada de decisões com base em dados concretos e seguros.

Com base nos resultados das simulações realizadas no *software JaamSim*, foram feitas as análises de cada uma. Desta forma, para facilitar a interpretação dos dados, foram criados vários gráficos que ajudam a visualizar os resultados. No entanto, a versão gratuita do *software* não permitia guardar diretamente os resultados das simulações. Para contornar essa limitação, foi desenvolvido um código em *Python* que extraiu os dados a partir do ficheiro *.dat* gerado pelo *JaamSim* e os armazenou numa folha de cálculo. Através de uma outra codificação em *Python*, esses dados serviram de base para a criação dos gráficos e para uma análise mais aprofundada dos diferentes cenários simulados.

Nos códigos em *Python*, as principais bibliotecas utilizadas foram o *Pandas*, o *Seaborn* e o *Matplotlib*. A biblioteca *Pandas* foi essencial para o tratamento e manipulação dos dados, ou seja, foi usada para ler, organizar e filtrar os dados provenientes do ficheiro *.dat* gerado pelo *JaamSim*. Já as bibliotecas *Seaborn* e *Mathplotlib* ajudaram na criação de gráficos mais claros e apelativos, ideais para comparar os diferentes resultados. O uso destas bibliotecas tornou a análise dos dados mais clara e completa.

Os gráficos demonstram de forma clara as diferenças entre os três modelos e permitem a identificação de melhorias e quais as fases do processo que beneficiam mais com a automação.

Na Figura 9 e 10 estão representados os gráficos que mostram o tempo total gasto em cada processo comum nas diferentes simulações, tanto no modo automático como no semiautomático. Cada barra representa, em segundos, quanto tempo foi necessário para completar um processo numa simulação. No eixo horizontal estão os processos, e no vertical os tempos registados. Estes gráficos permitem comparar, de forma clara, a duração dos processos entre simulações e entre os dois modos de operação.

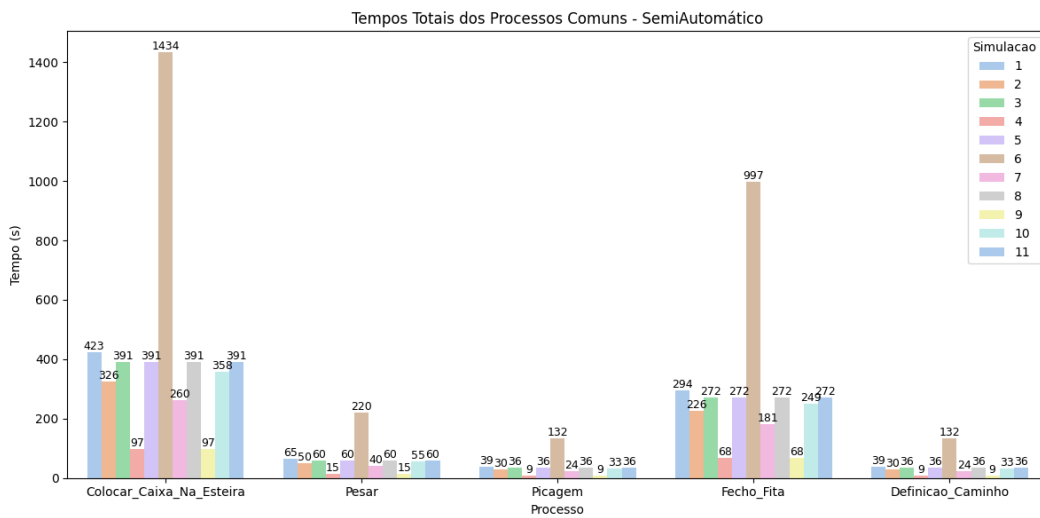


Figura 9: Tempos Totais dos Processos Comuns – Cenário Semiautomático

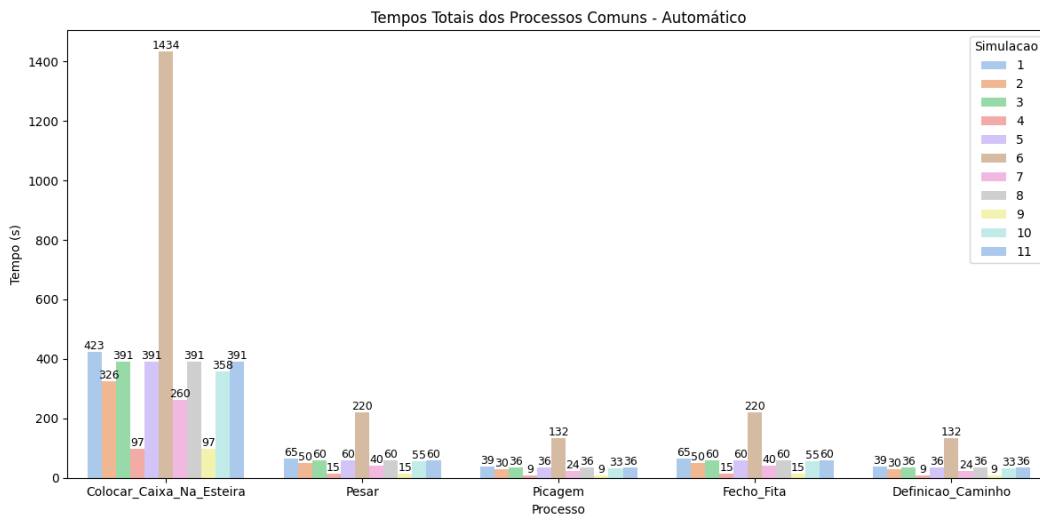


Figura 10: Tempos Totais dos Processos Comuns – Cenário Automático

Com base nos gráficos das Figuras 9 e 10, anteriormente apresentadas, observa-se que o modo automático apresenta uma distribuição mais homogénea e tempos de execução significativamente mais baixos no processo fecho de fita, com especial destaque para a menor variabilidade entre as simulações.

No entanto, para os processos de pesagem, picagem e definição do caminho, os tempos de execução são idênticos nos modos automático e semiautomático. Por outro lado, no modo semiautomático, verifica-se uma maior oscilação no processo de fecho da fita, o que é expectável, dado o maior grau de intervenção manual nesta operação. Observou-se que o único processo mantido do processo atual, o de colocar a caixa na transportadora de rolos, apresentou os valores mais elevados e com maior oscilação em comparação com os restantes processos simulados. Esta análise reforça as vantagens do modo automático na melhoria do desempenho dos processos que são comuns.

Nas Figuras 11 e 12, estão representados gráficos que mostram os tempos individuais de cada processo comum no modo automático e semiautomático. Cada barra representa o tempo médio, em segundos, necessário para a execução de um processo numa única ocorrência. Esta visualização permite identificar, de forma comparativa, quais os processos que tendem a ser mais demorados, o que contribuí para uma análise mais detalhada da eficiência operacional.

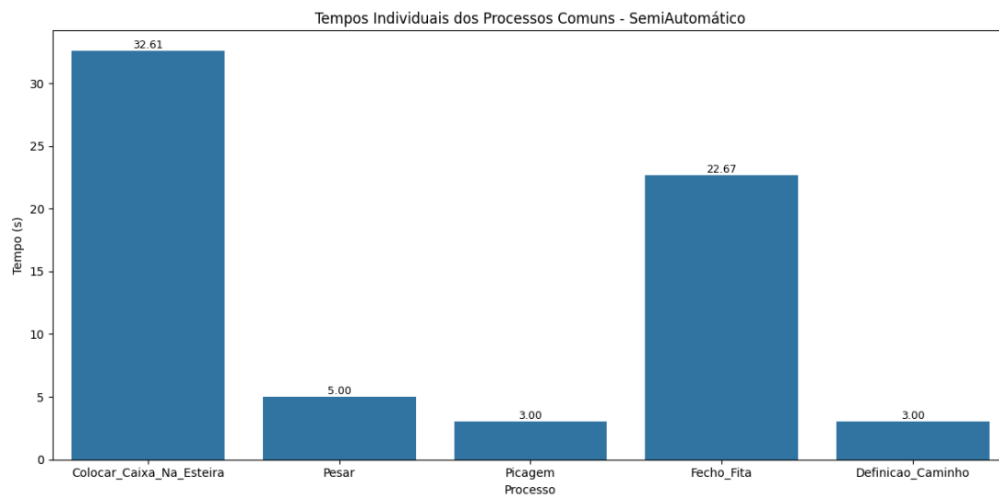


Figura 11: Tempos Individuais dos Processos Comuns - Cenário Semiautomático

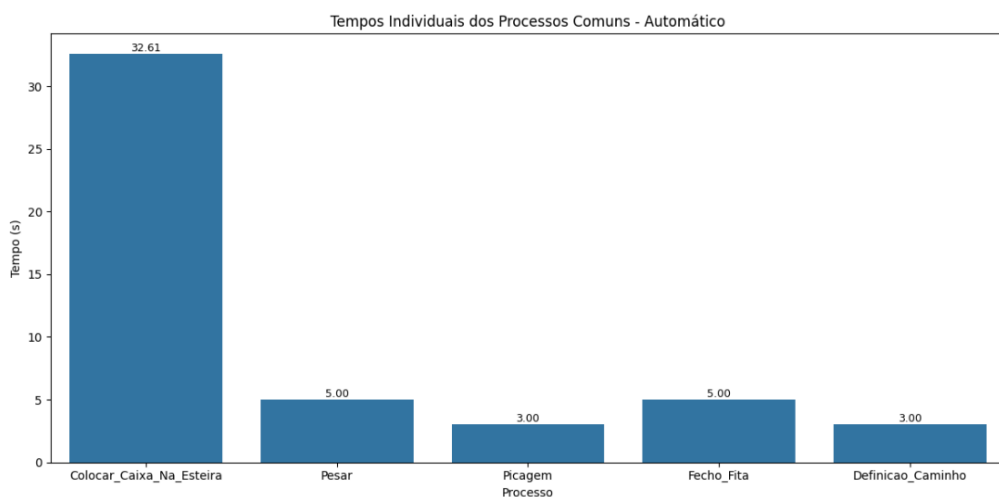


Figura 12: Tempos Individuais dos Processos Comuns - Cenário Automático

A partir da análise dos gráficos das Figuras 11 e 12 obtidos, verifica-se que os tempos médios individuais dos processos comuns são praticamente idênticos entre os dois modos para todos os processos, exceto para o fecho da fita. Neste processo, o modo semiautomático apresenta um tempo significativamente mais elevado. Esta discrepância é explicada pela necessidade de intervenção manual neste processo no modo semiautomático, o que naturalmente introduz maior variabilidade e demora na execução. A diferença de tempo observada no processo de fecho da fita nos dois modos bem como o tempo elevado associado ao processo de colocar a caixa na transportadora de rolos, reforçam o impacto positivo da automação, especialmente em tarefas que exigem precisão e repetibilidade.

Os dados representados nas Figuras 13 e 14 mostram os tempos totais dos processos associados às caixas, expressos em percentagem face ao tempo total de cada tipo de caixa (010, 020 e fora de formato), nos modos automático e semiautomático. Para cada simulação, o tempo total de cada processo por tipo de caixa foi dividido pelo tempo total acumulado para todas as caixas desse tipo específico. Por exemplo, o tempo total do processo "Armazenamento_010" foi dividido pelo tempo total de todas as caixas do tipo 010 nessa simulação, sendo depois o resultado multiplicado por 100 para obter a percentagem. Este cálculo permite normalizar os dados, tornando-os comparáveis independentemente da quantidade de caixas processadas em cada simulação. Representar os tempos em percentagem permite identificar, de forma clara, quais os processos que mais contribuem para o tempo total de operação de cada tipo de caixa.

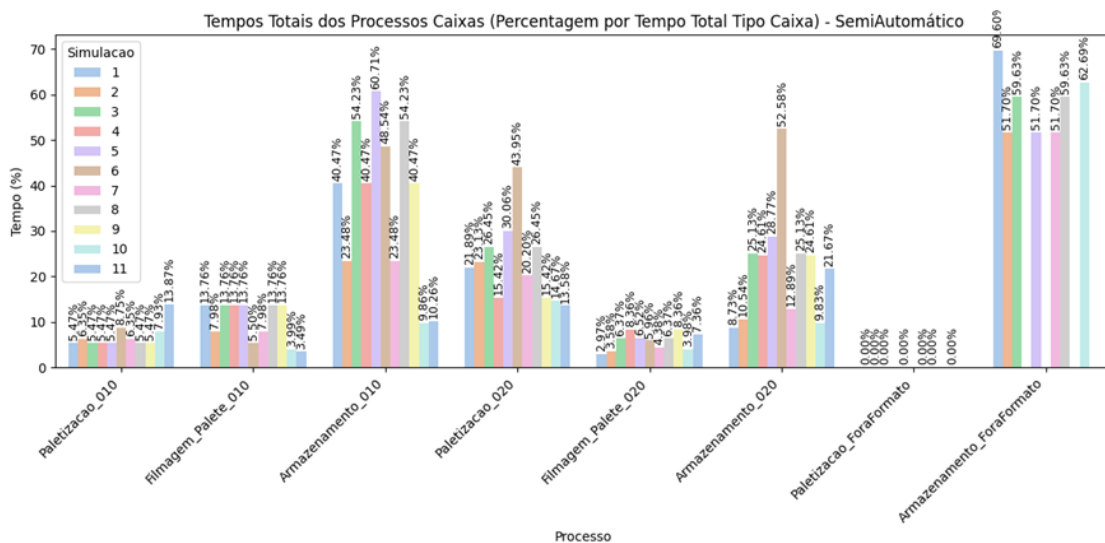


Figura 13: Tempo Total dos Processos das Caixas (% por Tempo Total Tipo de Caixas) - Cenário Semiautomático

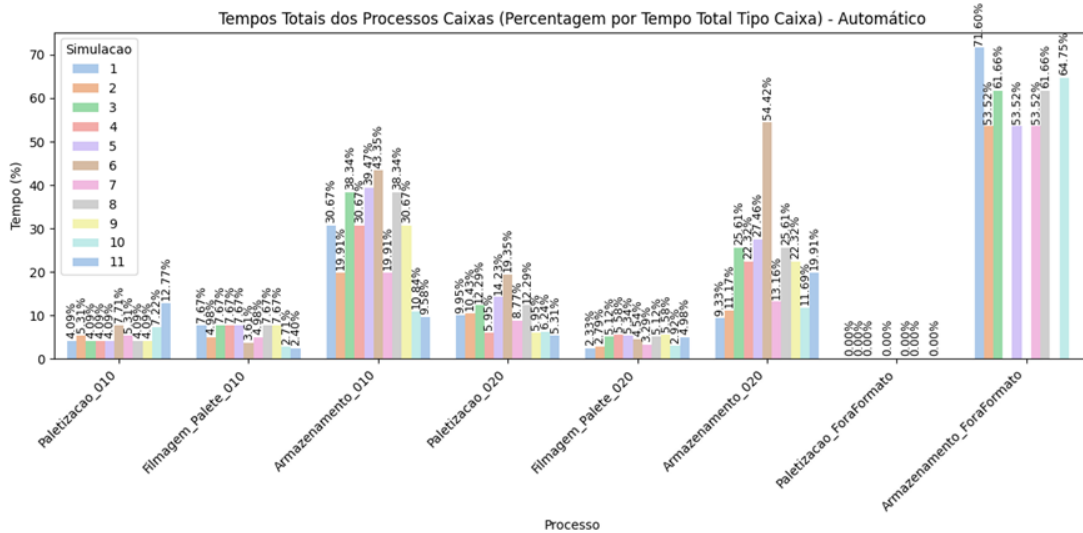


Figura 14: Tempo Total dos Processos das Caixas (% por Tempo Total Tipo de Caixas) - Cenário Automático

A análise das figuras anteriores demonstra que o armazenamento é o processo com maior peso no tempo total de operação, independentemente do tipo de caixa, tanto no modo Semiautomático como no Automático. Nas caixas do tipo 010, o Armazenamento_010 representa entre 40% e 54% do tempo no modo semiautomático, enquanto no modo automático esse valor reduz-se ligeiramente para cerca de 30% a 37%. Os processos de paletização e filmagem apresentam percentagens mais baixas em ambos os modos, sendo ainda mais reduzidas no modo automático.

Para as caixas do tipo 020, o Armazenamento_020 continua a dominar, com valores superiores a 50% em algumas simulações no modo automático. Já os tempos de paletização e filmagem mantêm-se modestos, normalmente abaixo de 20% e 8%, respetivamente. No caso das caixas fora de formato, apenas o processo de Armazenamento_ForaFormato apresenta valores diferentes de zero, o que indica ausência dos processos de paletização e filmagem para este tipo de caixa.

De forma geral, verifica-se que a automação reduz significativamente os tempos relativos dos processos. A representação percentual dos tempos permite comparar simulações de forma normalizada, e evidencia com clareza os processos que mais impactam a eficiência global do sistema.

As figuras apresentadas de seguida (Figura 15 e Figura 16) mostram os tempos individuais de execução dos processos associados às caixas nos modos automático e semiautomático. Cada barra representa o tempo necessário para realizar uma única ocorrência de cada processo, como paletização, filmagem ou armazenamento, para os diferentes tipos de caixas (010, 020 e fora de formato). Para garantir a consistência dos dados, foram considerados apenas registos únicos, isto é, foram eliminadas duplicações, de forma a permitir uma comparação mais fidedigna entre os dois modos de operação.

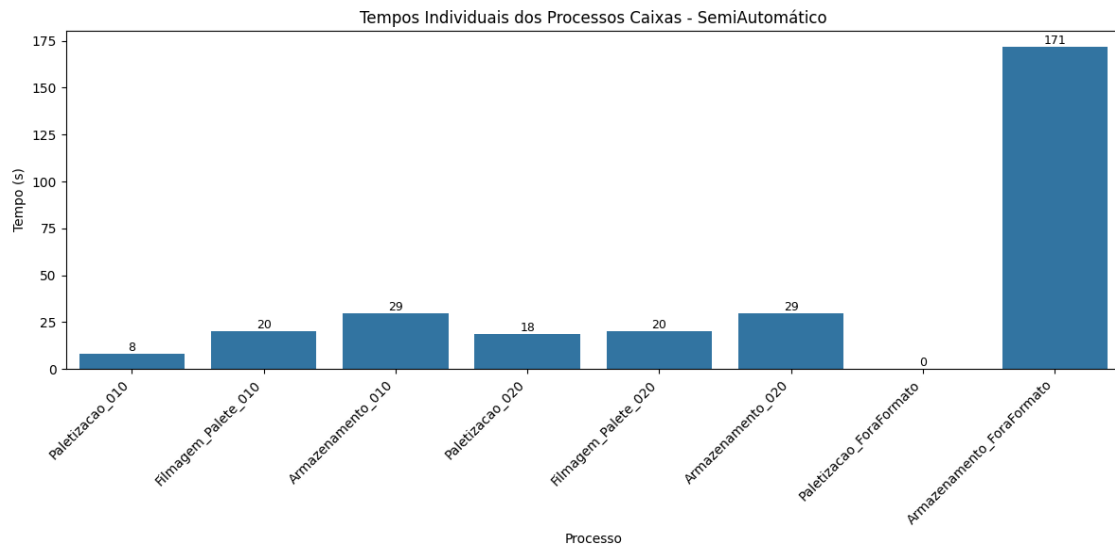


Figura 15: Tempos Individuais Processos Comuns - Cenário Semiautomático

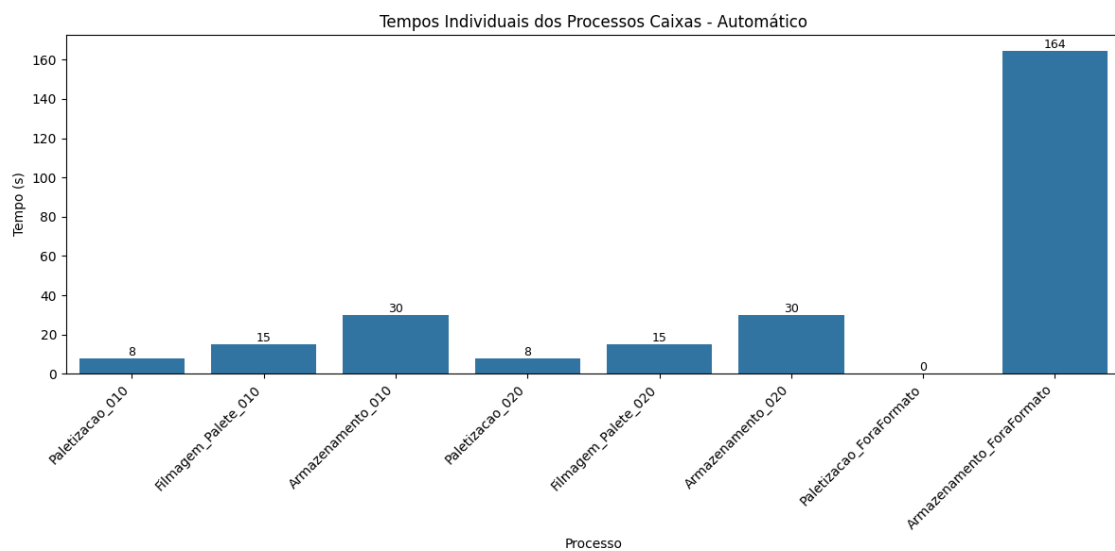


Figura 16: Tempos Individuais Processos Comuns - Cenário Automático

Analisando os tempos apresentados na Figura 15 e na Figura 16, observa-se que embora muitos processos apresentem valores semelhantes entre os modos automático e semiautomático, existem diferenças relevantes em alguns casos específicos. Destaca-se a paletização de caixas 020, com um tempo significativamente superior no modo semiautomático. Além disso, os processos de filmagem de paletes (tanto nas caixas 010 como nas 020) também apresentam reduções de tempo no modo automático. Já os tempos de armazenamento mantêm-se bastante estáveis, com variações ligeiras. No entanto, importa referir que, no modo automático, o processo de armazenamento é realizado sem qualquer intervenção humana, o que representa uma vantagem em termos de automatização. Estas observações indicam que a automação traz benefícios claros em processos mais demorados ou repetitivos, contribuindo para uma operação mais eficiente.

A Figura 17 apresenta os tempos totais de deslocamento das caixas nas transportadoras de rolo até à realização de determinados processos, como pesar, fechar com fita, colocar QR Code ou paletizar para os diferentes tipos de caixas nos modos semiautomático e automático. Para cada simulação, foi registado o tempo acumulado desde o início do transporte na transportadora de rolos até à chegada ao ponto específico de processamento. Os dados foram organizados por processo e por simulação, o que permite analisar e comparar a eficiência da movimentação nas transportadoras de rolos ao longo dos diferentes cenários.

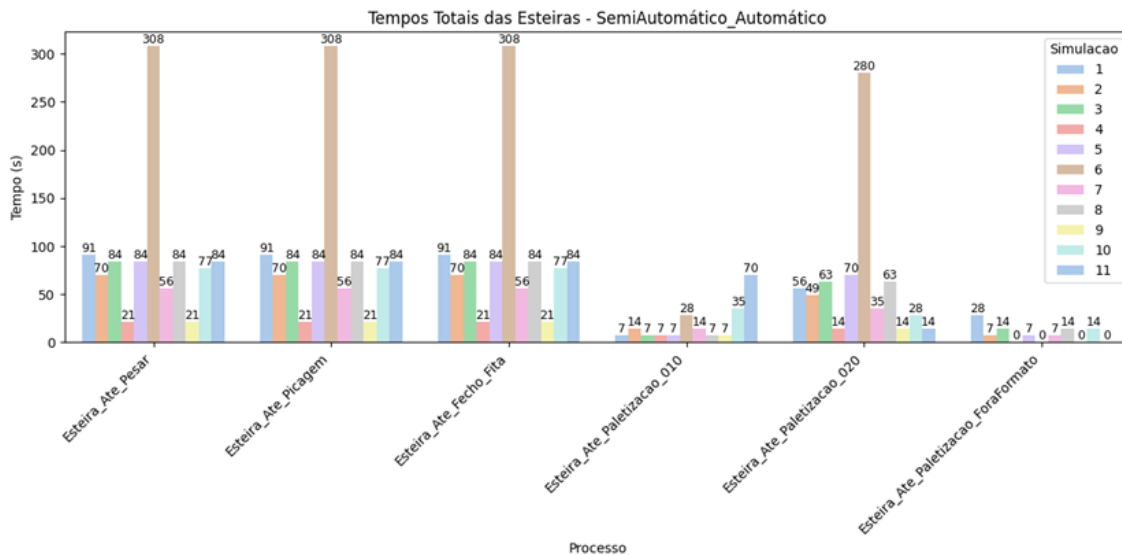


Figura 17: Tempo Total nas Transportadoras de Rolos - Cenário Semiautomático e Automático

A análise do gráfico da Figura 17 revela uma elevada consistência nos tempos registados nos processos iniciais, com valores praticamente inalterados entre simulações. No entanto, nos tempos das transportadoras de rolos que conduzem à paletização, observa-se uma variabilidade mais acentuada, sobretudo para as caixas do tipo 020 e fora de formato. Esta oscilação está fortemente relacionada com o número de caixas processadas em cada simulação, o que afeta diretamente o tempo total necessário para escoar os volumes. Estes picos ocasionais, por vezes, geram eventuais atrasos no fluxo logístico e exigem uma maior sensibilidade da organização relativamente às operações finais.

Na Figura 18 apresenta-se o gráfico do número de caixas processadas por simulação, distribuído por tipo de caixa. Cada barra representa a quantidade de caixas de um determinado tipo em cada simulação, permitindo visualizar a distribuição e o volume total processado ao longo das diferentes execuções. O número de caixas é mantido igual entre todos os modos para que seja possível garantir que a comparação entre cenários seja fiável e não influenciada por variações na quantidade de caixas processadas.

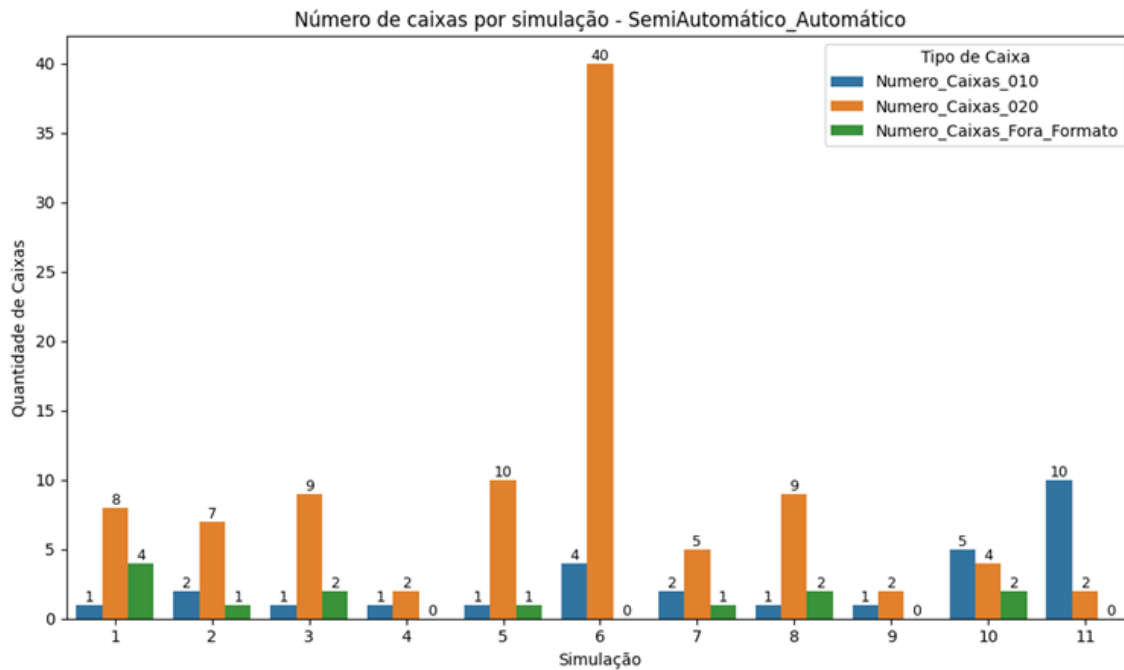


Figura 18: Número de Caixas por Simulação

Observando os valores representados na Figura 18, verifica-se uma clara predominância de caixas do tipo 020, com especial destaque para a simulação 6, que apresenta um volume significativamente superior às restantes (40 caixas). A simulação 5 também regista uma carga relevante deste tipo de caixa. Por outro lado, a simulação 3 destaca-se pela maior diversidade de tipos de caixas. Simulações como a 1, 2 e 4 apresentam volumes mais reduzidos, o que pode limitar o impacto na comparação entre modos. De forma geral, as simulações com maior carga e diversidade são mais representativas para avaliar o desempenho e a robustez do sistema em diferentes condições operacionais.

O gráfico da Figura 19 apresenta uma comparação entre os tempos totais dos processos comuns nos modos semiautomático e automático, onde se recorreu a *boxplots* para representar a distribuição estatística dos dados. Para cada processo, são representados os valores mínimo, mediano e máximo e a caixa central corresponde ao intervalo interquartil, ou seja, o intervalo entre o primeiro quartil (25%) e o terceiro quartil (75%), que abrange os 50% dos dados centrais. A escala do eixo do Y foi configurada como logarítmica, o que permite visualizar simultaneamente processos com tempos bastante distintos, e evita que valores mais elevados distorçam a leitura. Esta abordagem facilita a comparação entre modos, mesmo quando há grande disparidade de tempos entre os processos.

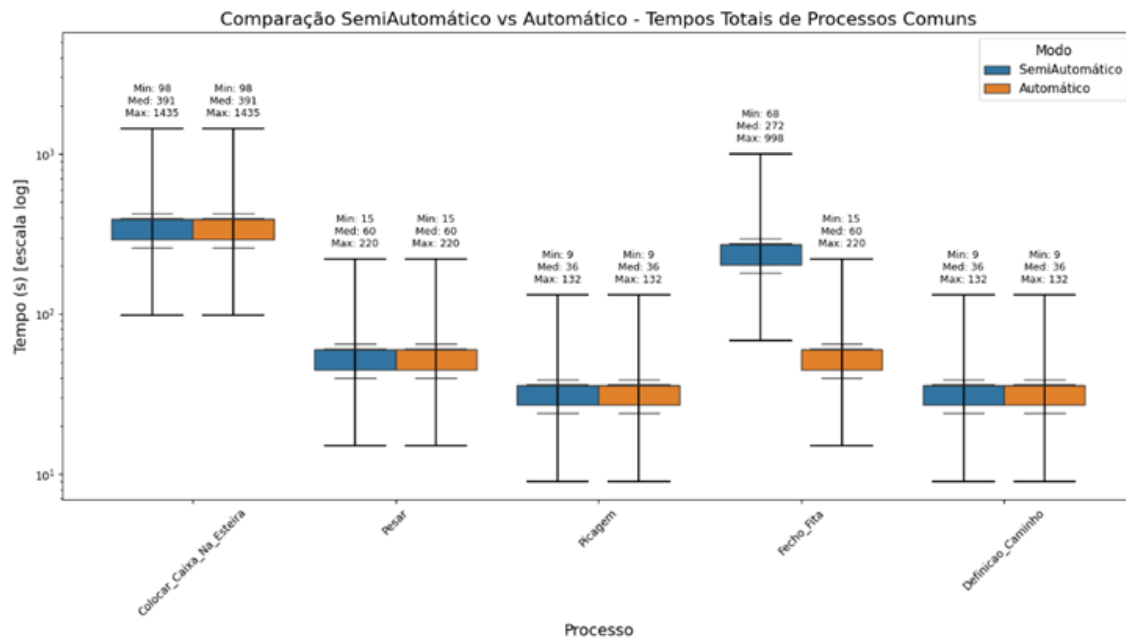


Figura 19: Tempos Totais dos Processos Comuns - Cenário Semiautomático e Automático

O gráfico anteriormente apresentado na Figura 19 compara os tempos totais dos processos comuns entre os modos semiautomático e automático, utilizando *boxplots* com escala logarítmica. A análise revela que, para a maioria dos processos, como pesar, picagem, definição de caminho e colocar a caixa na transportadora de rolos, os tempos são praticamente idênticos entre os dois modos. No processo de Fecho da Fita, o modo automático apresenta tempos significativamente inferiores e menor variabilidade, o que evidencia ganhos claros de eficiência com a automatização nesta operação.

A Figura 20 apresenta a comparação entre os tempos totais dos processos associados às caixas, nos modos semiautomático e automático, onde foram utilizadas *boxplots* para representar a distribuição dos dados. Tal como no gráfico da figura anterior, Figura 19, são exibidos os valores mínimo, mediano, máximo e a caixa central. Este gráfico permite uma análise visual clara das variações entre modos e oferece uma perspectiva detalhada sobre a consistência e o desempenho de cada modo de operação nos processos de paletização, filmagem e armazenamento, segmentados por tipo de caixa (010, 020 e fora de formato)

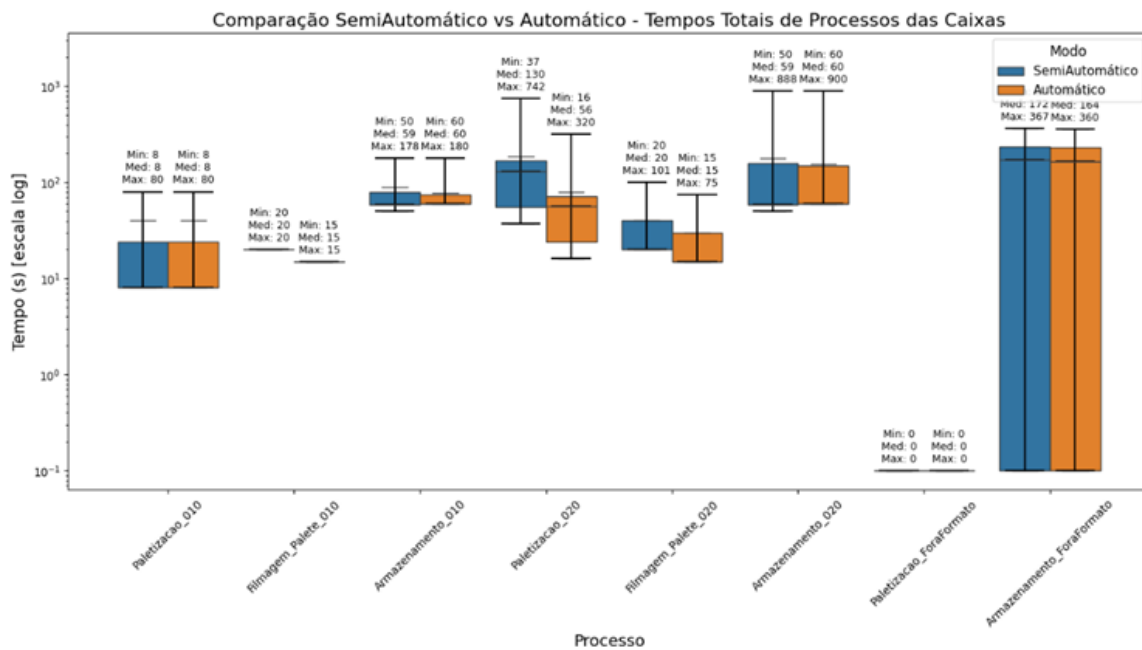


Figura 20: Tempos Totais dos Processos Individuais - Cenário Semiautomático e Automático

Observando a figura anterior, Figura 20, de forma geral, a maioria dos processos apresenta tempos semelhantes entre os modos, com exceções pontuais. O processo de paletização de caixas 020 é o que mais beneficia da automação, com uma redução clara nos tempos e na variabilidade. Já o armazenamento de caixas fora de formato continua a ser o mais demorado e com pouca diferença entre os modos, isto é, há uma discrepância grande de dados uma vez que em grande parte das simulações não existem caixas fora de formato. Observa-se ainda que os processos intermédios, como armazenamento_010, paletização_020, filmagem_paquete_020 e armazenamento_020, apresentam valores medianos muito próximos entre si, formando visualmente uma linha contínua no gráfico. Esta uniformidade indica que, apesar das diferenças funcionais entre os processos, o tempo médio por caixa se mantém estável. Ainda assim, alguns destes processos, como o armazenamento_020, revelam amplitudes consideráveis entre os valores mínimos e máximos, o que significa que há variações como o número de caixas das diferentes simulações que podem afetar a fluidez do fluxo logístico em cenários com maior carga.

Conforme se observa na Figura 21, esta apresenta a comparação do tempo total de execução por simulação entre os modos semiautomático e automático. Cada barra representa a soma dos tempos de todos os processos executados por simulação. Esta visualização permite identificar, de forma clara, a diferença global de desempenho entre os dois modos ao longo das várias execuções, fornecendo uma visão agregada do impacto da automação no tempo total de operação. Para a elaboração deste gráfico, considerou-se que, no processo atual, não havendo máquinas envolvidas, o valor atribuído aos processos corresponde ao tempo médio das cronometragens realizadas (ANEXO D).

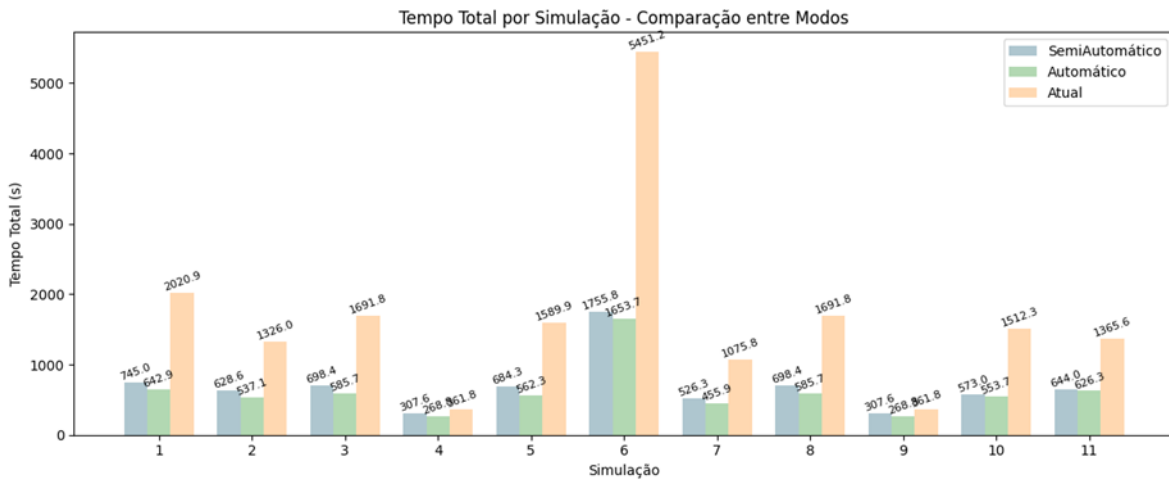


Figura 21: Tempo Total por Simulação - Comparação de todos os cenários

A Figura 21 evidencia que o modo automático apresenta consistentemente os menores tempos totais de execução em todas as simulações, seguido pelo modo semiautomático, enquanto o modo atual regista os valores mais elevados. A diferença é particularmente significativa em simulações com maior carga, como a simulação 6, onde o tempo total no modo atual (5451,2 s) é mais do que o triplo do registado no modo automático (1653,7 s). Em média, a automação permite uma redução considerável dos tempos, com ganhos bastante significativos em todas as simulações. Estes resultados demonstram o impacto positivo da automação na eficiência global do sistema, a redução dos tempos operacionais e o aumento a previsibilidade dos processos.

O gráfico da Figura 22 apresenta o tempo médio total por caixa, dividido por tipo (010, 020 e fora de formato) e modo de operação (semiautomático e automático). O tempo médio foi calculado com base na soma dos tempos de paletização, filmagem e armazenamento (no caso das caixas fora de formato, apenas paletização e armazenamento), dividido pelo número total de caixas de cada tipo, uma vez que estes são os processos diferem entre os tipos de caixa. Esta métrica permite comparar a eficiência média do processamento de cada tipo de caixa entre os dois modos.

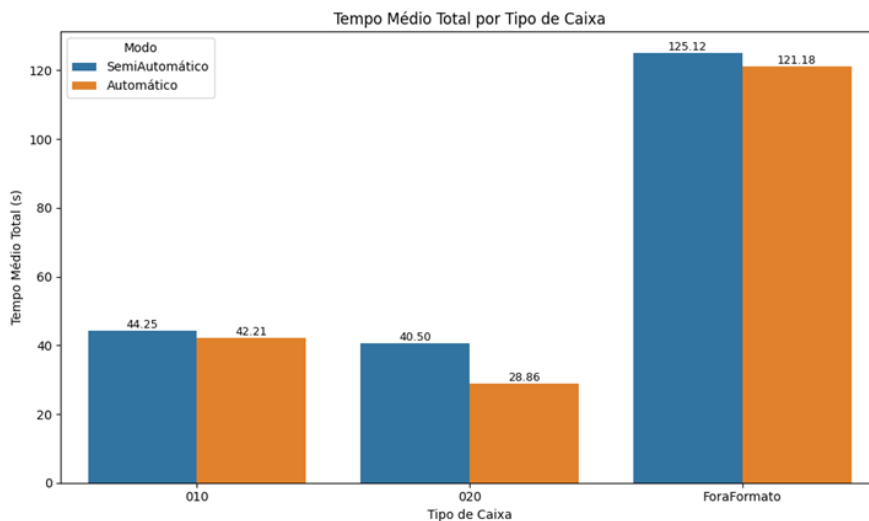


Figura 22: Tempo médio Total por Tipo de Caixa - Cenários Semiautomático e Automático

Os resultados obtidos revelam que, para todos os tipos de caixa, o modo automático apresenta tempos médios inferiores face ao semiautomático, o que reflete uma maior eficiência global. Esta diferença é particularmente significativa nas caixas do tipo 020, onde o tempo médio no modo automático é cerca de 11,6 segundos inferior ao do modo semiautomático. Nas caixas fora de formato, também se observa uma redução relevante, com o tempo médio a baixar de 125,12 s para 121,18 s. Já nas caixas 010, a diferença é mais discreta, cerca de 2 segundos. Estes resultados confirmam que a automação melhora o desempenho médio do sistema em todos os cenários, com maior impacto em processos mais complexos ou demorados.

A Figura 23 mostra o gráfico do desvio padrão do número de caixas processadas por tipo ao longo das simulações. O desvio padrão foi calculado com base nos valores do número de caixas por simulação, medindo a variabilidade ou dispersão desses valores em torno da média. Valores mais elevados indicam maior variação entre simulações, enquanto valores mais baixos indicam maior consistência. Este indicador permite avaliar se a distribuição dos diferentes tipos de caixas foi equilibrada entre as simulações, o que é importante para garantir condições comparáveis e fiabilidade na análise dos tempos de execução por tipo de caixa.

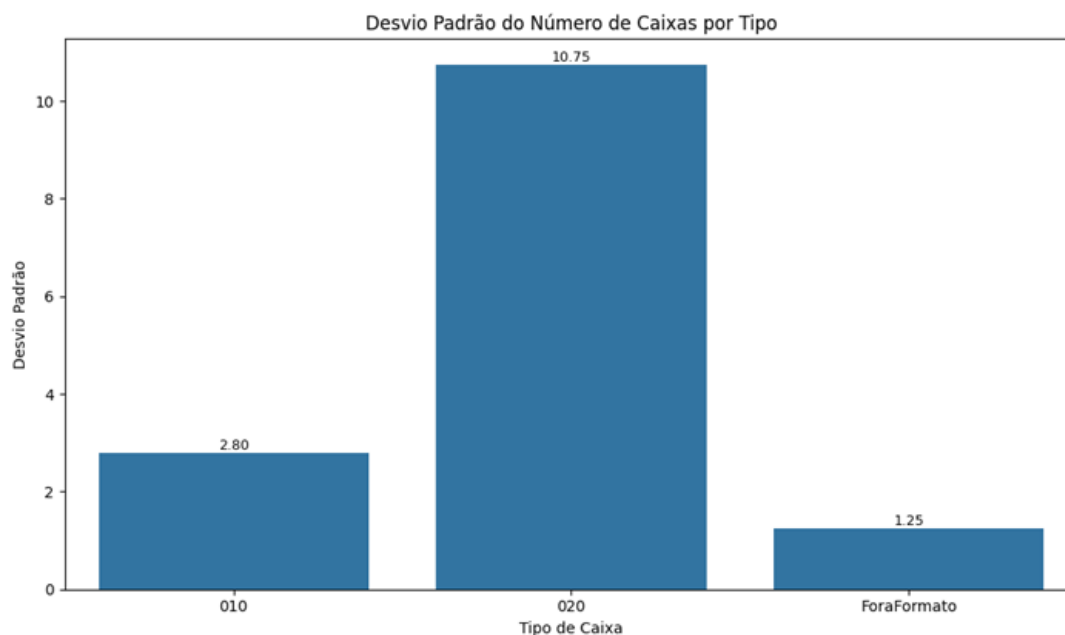


Figura 23: Desvio padrão do número de caixas por tipo de caixa

Os resultados obtidos mostram que o tipo de caixa 020 apresenta o maior desvio padrão (10,75), o que indica que existe uma grande variação no número de caixas processadas entre simulações. Em contraste, os tipos 010 e fora de formato apresentam desvios padrão mais baixos, o que revela que a distribuição destas é mais equilibrada. Estes resultados indicam que os dados relativos às caixas 010 e fora de formato são mais consistentes entre simulações, enquanto a análise das caixas 020 deve considerar essa maior variabilidade.

A representação gráfica da Figura 24 apresenta o desvio padrão do tempo total médio por tipo de caixa, ou seja, a variabilidade do tempo gasto por caixa do tipo 010, 020 e fora de formato ao longo das simulações. O valor é calculado dividindo o tempo total de cada simulação pelo número de caixas do respectivo tipo, e depois obtendo o desvio padrão desses valores. Este indicador permite perceber o quão consistentes foram os tempos de processamento por tipo de caixa entre simulações. Quando comparado com a Figura 16, que mostra a variabilidade na quantidade de caixas, é possível avaliar se a instabilidade no tempo está associada a flutuações no número de caixas ou se resulta de outros fatores.

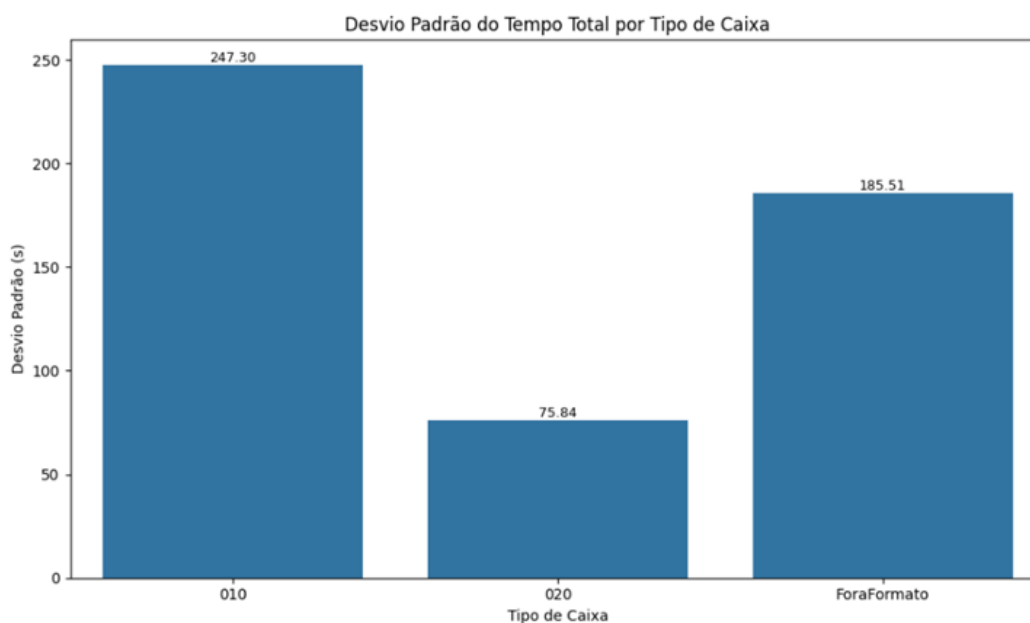


Figura 24: Desvio padrão do Tempo Total por Tipo de Caixa

Com base na Figura 24, o tipo de caixa 010 apresenta a maior variabilidade nos tempos médios por caixa (247,30 s), seguido pelas caixas fora de formato (185,51 s). O tipo 020 tem o menor desvio padrão (75,84 s), o que revela uma maior consistência nos tempos de processamento entre simulações. Quando comparado com o gráfico da Figura 16, desvio padrão da quantidade de caixas, nota-se que, apesar das caixas 020 terem tido a maior variabilidade no número de unidades, os seus tempos médios mantiveram-se mais estáveis. Já os tipos 010 e fora de formato, mesmo com menor variação no número de caixas, apresentaram maior instabilidade nos tempos, o que indica que a flutuação dos tempos nesses casos pode estar relacionada a fatores operacionais.

Os gráficos apresentados nas Figuras 25 e 26, realçam o número máximo de caixas acumuladas em fila de espera para cada processo ao longo das simulações, permitindo avaliar possíveis pontos de congestionamento no sistema. As barras estão organizadas por processo, de acordo com a sequência lógica da linha de produção (por exemplo, “Pesar”, “Ler Referência” ocorre antes de “Fecho Fita”), o que justifica o seu deslocamento horizontal e a distribuição não centralizada em torno de cada simulação. A comparação entre modos de operação revela diferenças no comportamento das filas, fornecendo indicações importantes sobre a fluidez ou bloqueios nas etapas do processo em função do modo Semiautomático ou Automático.

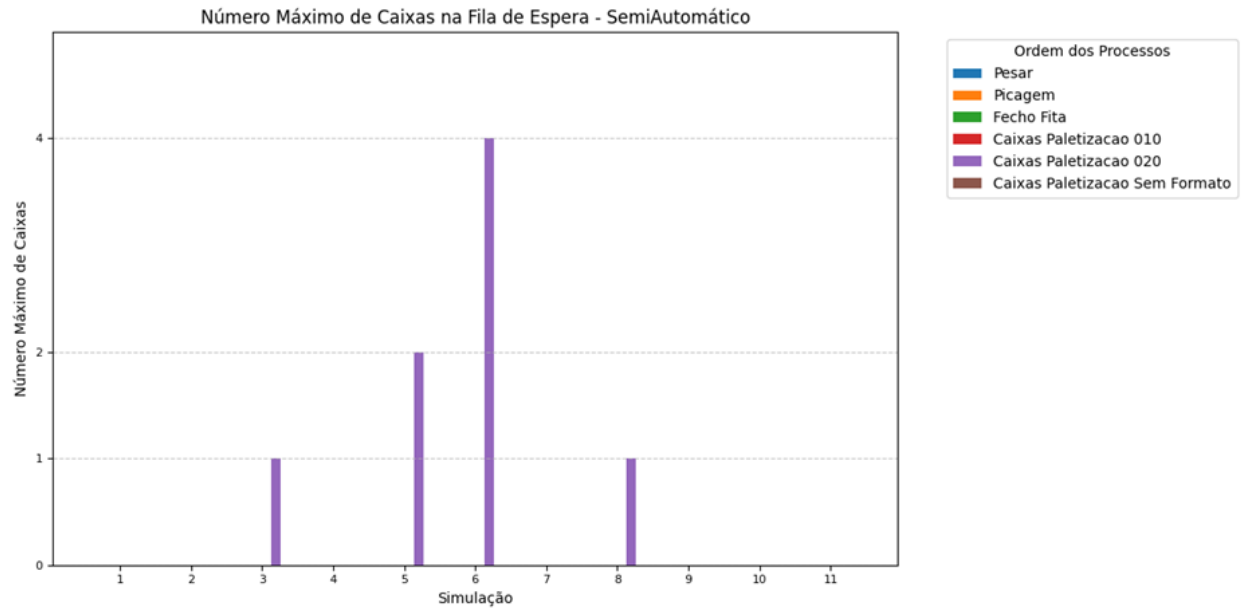


Figura 25: Número de Caixas em Fila de Espera - Cenário Semiautomática

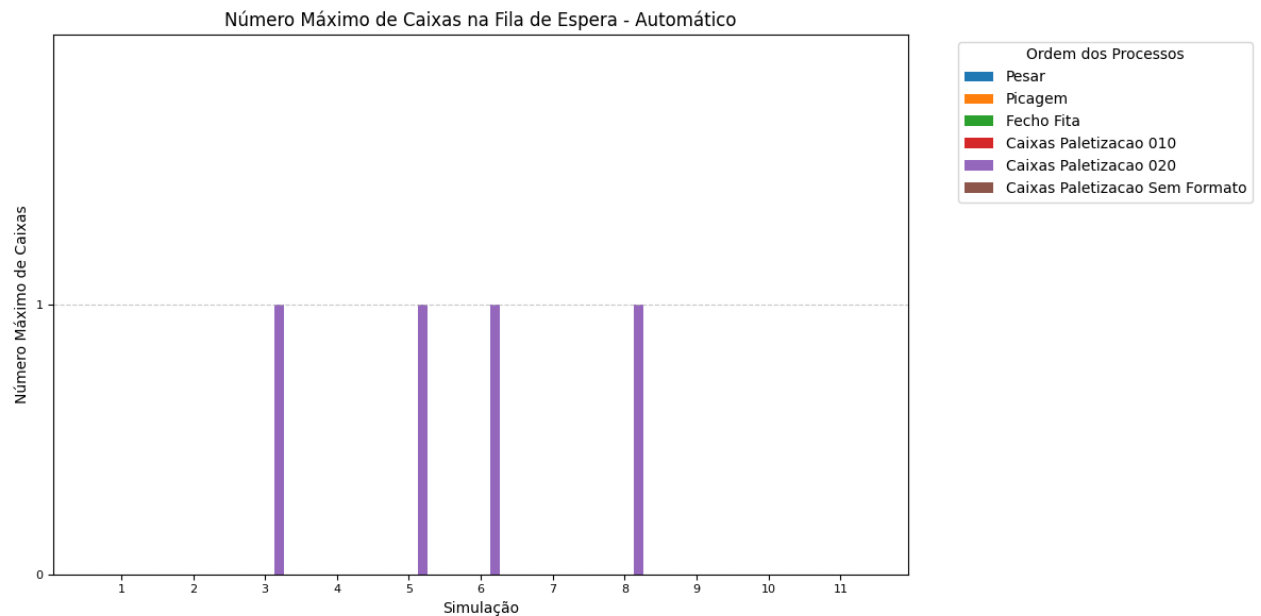


Figura 26: Número de caixas em Fila de Espera - Cenário Automático

Os gráficos ilustrados nas Figuras 25 e 26 mostram que, no modo semiautomático, ocorrem acumulações de caixas em fila, especialmente na paletização de caixas 020, com destaque para a simulação 6, que atinge um máximo de 4 caixas em espera. Já no modo automático, o número máximo de caixas em fila é sempre 1 ou nenhum, mesmo nas simulações com maior volume, evidenciando uma maior fluidez do processo.

Estes resultados indicam que os gargalos se concentram nas etapas finais, principalmente na paletização, e que o modo automático é mais eficaz na redução de esperas e bloqueios, o que garante que esta seja uma operação mais estável e contínua.

Conforme se observa na Figura 27, esta apresenta o tempo total despendido em processos que requerem intervenção humana ao longo das diferentes simulações. A comparação entre os modos semiautomático e automático permite visualizar o impacto da automação na redução dos tempos.

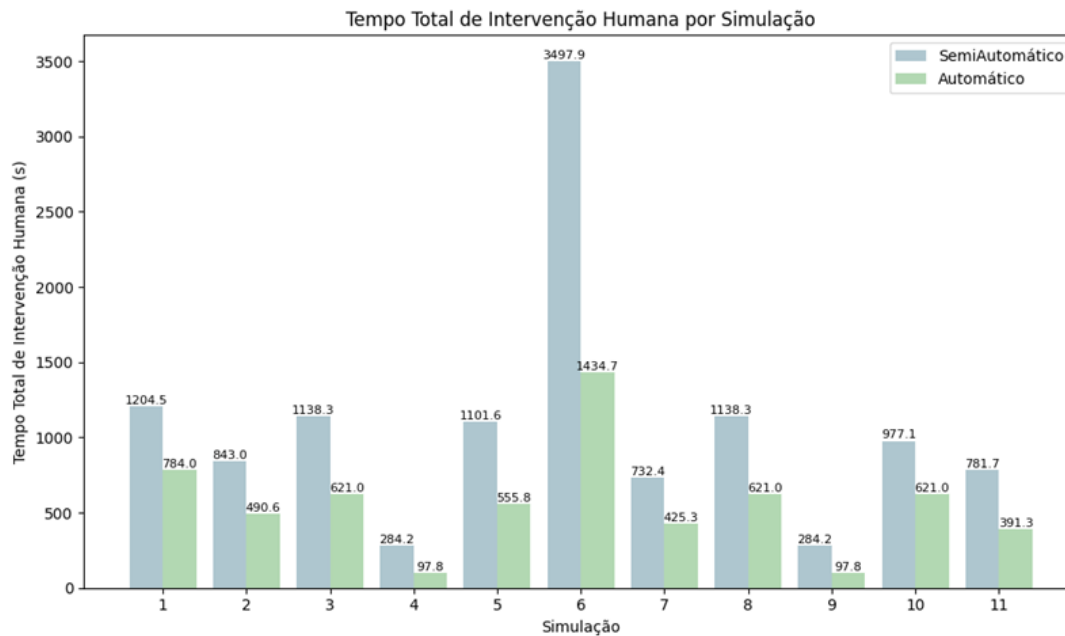


Figura 27: Tempo Total de Intervenção Humana por Simulação - Cenário Semiautomático e Automático

A análise do gráfico da Figura 27 mostra que o modo automático reduz significativamente o tempo total de intervenção humana em todas as simulações, quando comparado com o modo semiautomático. Em algumas simulações, como a 6, esta diferença é particularmente expressiva.

De forma geral, a redução do tempo de intervenção humana reflete o impacto direto da automação na diminuição da carga de trabalho manual. O modo automático mostra-se mais eficiente e consistente, com menores variações de tempo entre simulações. Estes resultados reforçam os ganhos operacionais associados à automação, especialmente em cenários com maior volume de caixas, onde a intervenção manual tende a ser mais demorada e pode levar a erros devido ao cansaço.

O gráfico apresentado a seguir, Figura 28, compara os tempos totais despendidos em diferentes processos operacionais nos três modos de funcionamento atual, semiautomático e automático. Para cada processo foram agregados os tempos totais registados ao longo das simulações. Esta visualização permite analisar o impacto da automação em cada etapa da operação, de forma a destacar as diferenças de desempenho por processo e a fornecer uma perspectiva clara sobre onde se verificam os principais ganhos de tempo ao transitar do modo atual para soluções mais automatizadas.

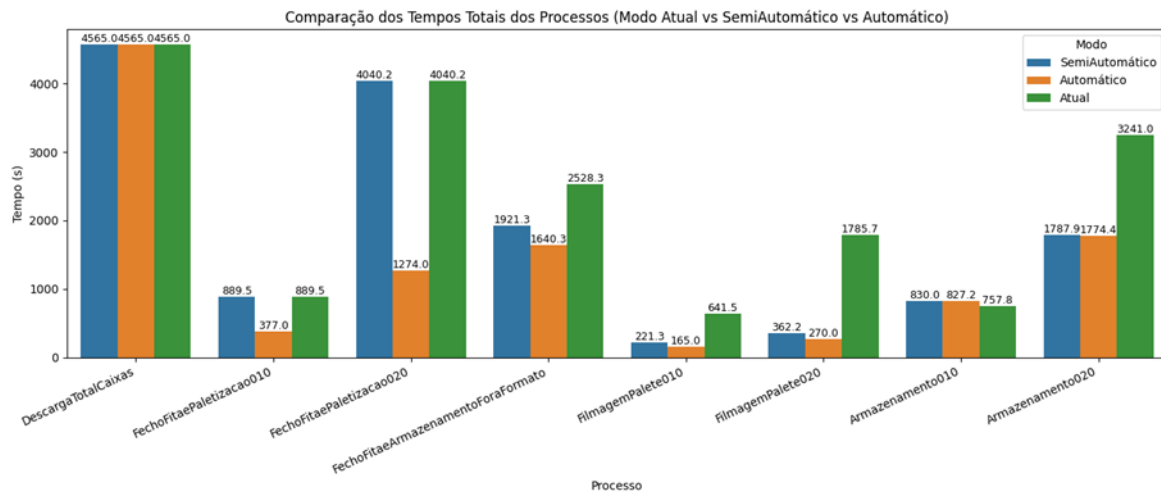


Figura 28: Comparação dos Tempos Totais dos Processos - Cenário atual, semiautomático e automático

Os resultados obtidos demonstram que o modo automático é claramente o mais eficiente, e apresenta tempos totais significativamente mais baixos na maioria dos processos. Os maiores ganhos ocorrem no fecho de fita e paletização das caixas 010 e 020, onde os tempos são reduzidos em mais de metade face ao modo atual. Também se registam melhorias relevantes na filmagem de paletes e no armazenamento, em especial para as caixas 020 e fora de formato. A descarga de caixas na transportadora de rolos é o único processo com tempo constante devido a não alterar o processo em nenhuma das soluções. Estes resultados evidenciam os benefícios concretos da automação na redução do tempo total de operação e na melhoria da eficiência global.

Esta análise reforça a utilidade da simulação como ferramenta de apoio à decisão, e permite avaliar com rigor os efeitos da automação no funcionamento do armazém e fundamentar escolhas mais informadas para o futuro.

3.6. Análise de Resultados

Com o objetivo de avaliar o impacto da automação nas operações logísticas, foram simulados e analisados três cenários distintos de funcionamento: manual, semiautomático e automático. Esta análise comparativa permitiu observar, de forma quantitativa e qualitativa, os efeitos da introdução progressiva de tecnologias automatizadas.

De seguida, são reunidos e interpretados os principais resultados obtidos a partir dessas simulações, destacando-se as melhorias alcançadas em cada modelo, bem como as implicações económicas, operacionais e estratégicas associadas a cada nível de automação. São também exploradas estimativas de investimento, retorno financeiro e possíveis riscos associados à variação da procura, de modo a fundamentar a viabilidade da solução proposta no contexto real de empresas do setor logístico.

A análise comparativa dos três cenários, manual, semiautomático e automático, revelou melhorias significativas em termos de eficiência, tempo de execução e consistência operacional. Observou-se um ganho médio de eficiência de 50,35% no modelo semiautomático e de 56,30% no modelo automático, face ao processo atual (manual)(Tabela 2). Estes resultados demonstram uma melhoria clara na produtividade global e confirmam que a automação, mesmo que parcial, contribui de forma expressiva para a melhoria do processo logístico.

O cenário automático, como expectável, destacou-se como o mais eficiente, com ganhos consistentes em todas as simulações. A redução dos tempos médios totais de execução das operações logísticas foi especialmente evidente nas tarefas mais repetitivas e fisicamente exigentes, como a paletização, fecho de caixas com fita adesiva e armazenamento.

Entre as principais melhorias observadas, é possível destacar a redução da variabilidade nos tempos de execução entre simulações, isto é, quando existe um aumento do número de caixas este aumento não se traduz significativamente no tempo de execução, principalmente nos processos críticos. Também é possível concluir que no modo automático a estabilidade dos tempos é maior, como pode ser comprovado pelos *boxplots* e pelo menor desvio padrão dos tempos. Esta previsibilidade permite planejar melhor os recursos e manter um fluxo logístico mais fluido e confiável, mesmo em cenários com elevada diversidade e volume de caixas.

A automatização da triagem com QR Codes também se prevê que torne o sistema mais eficaz, reduza o tempo e o esforço necessários para identificar o destino de cada unidade de carga ao mesmo tempo que aumenta a fiabilidade do sistema e minimiza os erros humanos.

Embora o armazenamento continue a ser o processo com maior peso no tempo total, a sua duração foi melhorada graças à maior fluidez nas fases anteriores. Outro aspeto relevante

é a diminuição drástica do tempo de intervenção humana no modelo automático, o que além de reduzir o risco de erros e acidentes, contribui para uma melhoria nas condições ergonômicas de trabalho e redução da fadiga dos colaboradores.

De forma geral, os resultados obtidos ao longo das diferentes simulações evidenciam um ganho notório de eficiência nas operações logísticas. Este aumento de produtividade permite estimar que, considerando um investimento em maquinarias entre 70.000€ para o modo semiautomático e 160.000€ para o modo automático (ANEXO F), e somando os custos de implementação e instalação dos equipamentos (9.500 €), programação e integração de software (8.000€) e a manutenção (5.000€) o investimento total estimado rondaria os 92.500 € para o modo semiautomático e os 182.500 € para o modo automático. Todos estes valores têm por base os preços praticados no mercado atual.

Desta forma, o retorno sobre o investimento poderá ser alcançado num curto espaço de tempo, com base na poupança gerada pela redução de custos operacionais diretos, como o menor tempo de execução, menor necessidade de correções por erros humanos e menor paragens dos processos, bem como pela manutenção da estrutura de pessoal existente e pelo ganho da eficiência com os novos modelos. Em termos práticos, este retorno pode ser reforçado através do reinvestimento da poupança mensal nas operações e, quando necessário, através de linhas de crédito de investimento com taxas de juro reduzidas frequentemente disponibilizadas ao setor logístico. Sendo este período reduzido, realça a sua competitividade no setor logístico.

A análise confirma que a automação, mesmo que parcial, é economicamente viável para empresas logísticas que lidam com volumes médios a elevados de carga. O cenário automático, em particular, mostrou-se estrategicamente vantajoso, pois além de reduzir os tempos de execução e a variabilidade operacional, permite também uma significativa redução da dependência de mão de obra direta nas tarefas repetitivas e fisicamente exigentes.

Com a implementação do modo automático, vários processos foram automatizados, o que implica que os colaboradores antes afetos a essas tarefas podem ser requalificados para funções de maior valor acrescentado.

Contudo, importa também considerar cenários de flutuação na procura. Caso a procura por serviços logísticos diminua, por exemplo, 20%, o impacto no retorno do investimento será proporcional, podendo prolongar ligeiramente o respetivo período de retorno. O inverso também se aplica, caso haja um aumento da procura.

Além disso, mesmo em cenários de menor procura, a previsibilidade operacional, a redução de erros, a rastreabilidade das operações e a menor rotatividade de pessoal continuam a oferecer ganhos sustentáveis que reforçam a viabilidade a médio e longo prazo.

Assim, conclui-se que o investimento em automação logística representa uma aposta sólida e sustentável, alinhada com as exigências atuais do setor e com os objetivos de aumento de eficiência, segurança e competitividade.

Embora este estudo tenha sido desenvolvido especificamente para a realidade da Europackers, a metodologia adotada, assente na melhoria contínua e na simulação computacional, é facilmente adaptável a outras empresas, independentemente da sua dimensão ou setor logístico.

A flexibilidade metodológica e a utilização de ferramentas acessíveis tornam este modelo replicável em contextos distintos. O essencial passa por diagnosticar os processos existentes, identificar pontos críticos e aplicar melhorias de forma assertiva e fundamentada em dados.

Além dos benefícios operacionais e económicos evidenciados, este tipo de iniciativa permite alinhar as operações com as exigências atuais da Indústria 4.0, e promove uma transformação sustentável e orientada para o futuro.

Para tal, é fundamental garantir o compromisso da gestão, a formação das equipas e uma comunicação eficaz, de forma a assegurar que a mudança tecnológica se traduz numa real melhoria organizacional.

Assim, a adoção de soluções tecnológicas suportadas por metodologias estruturadas, como a proposta desenvolvida neste trabalho, representa não apenas uma oportunidade de melhoria operacional imediata, mas também uma estratégia fundamental para reforçar a resiliência, a sustentabilidade e a competitividade das organizações perante os desafios atuais e futuros do setor logístico.

4. CONCLUSÃO

Com base na análise desenvolvida ao longo deste projeto, é possível afirmar que os objetivos inicialmente definidos foram plenamente alcançados. O projeto partiu da necessidade de responder à questão de investigação "Como é possível melhorar os processos do fluxo logístico interno de uma empresa, utilizando a metodologia PDCA com o apoio da simulação computacional?", tendo como propósito principal demonstrar que a combinação de metodologias estruturadas de melhoria contínua com ferramentas tecnológicas avançadas constitui uma abordagem eficaz na modernização das operações logísticas.

Ao longo dos capítulos, foi realizada uma caracterização mais profunda do contexto logístico e operacional da empresa em estudo, a qual revelou diversas limitações associadas a práticas manuais de armazenagem, como tempos elevados de execução, elevada carga de trabalho humano e suscetibilidade a erros. Através do mapeamento de processos e da análise detalhada das operações, foi possível identificar pontos críticos que comprometiam a eficiência global do fluxo logístico. Para combater essas fragilidades, foi proposta a aplicação do ciclo PDCA, que serviu de base metodológica para estruturar as fases do diagnóstico, planejamento, execução e verificação das ações de melhoria. Esta abordagem revelou-se particularmente eficaz, uma vez que permitiu acompanhar de forma contínua a evolução dos processos e ajustar as soluções implementadas com base em dados concretos.

A simulação computacional, realizada com recurso ao *software JaamSim*, assumiu um papel central neste projeto e funcionou como uma ferramenta de apoio à decisão, permitiu testar cenários distintos de operação sem comprometer o funcionamento real da empresa. As simulações dos modelos manual, semiautomático e totalmente automatizado evidenciaram, de forma quantitativa, os ganhos obtidos com a introdução progressiva da automação. Verificou-se uma redução significativa nos tempos de execução das tarefas, bem como uma diminuição do esforço físico dos operadores. Estes resultados confirmam a hipótese inicial de que a integração de tecnologia e metodologias de melhoria contínua é não só desejável, como necessária para o aumento da competitividade das empresas logísticas num contexto marcado pela exigência e pela constante evolução do mercado.

Este projeto contribui ainda para aprofundar conhecimento sobre a aplicação prática do ciclo PDCA no contexto da armazenagem, e demonstra que esta metodologia pode ser adaptada de forma eficaz às especificidades da logística interna e que, quando complementada por ferramentas tecnológicas como a simulação, potencializa substancialmente os efeitos. O estudo confirma que o planejamento estruturado, aliado à experimentação virtual de cenários, permite às empresas minimizar riscos, melhorar os recursos e o desempenho operacional de forma sustentada.

Para apoiar esta análise, foram utilizadas ferramentas complementares que contribuíram significativamente para os resultados obtidos. A modelação tridimensional dos cenários logísticos no *JaamSim* permitiu visualizar com precisão os fluxos de trabalho e as interações entre os elementos do sistema. Adicionalmente, os dados extraídos dos ficheiros de simulação foram tratados e analisados com recurso a códigos *Python*, utilizando bibliotecas como *pandas*, *seaborn* e *matplotlib*, o que permitiu automatizar o processo de análise estatística, gerar visualizações gráficas detalhadas e aumentar a fiabilidade dos resultados. Por fim, a integração desta análise com uma estimativa económica realista dos custos de investimento e retorno reforçou a viabilidade prática das propostas, e demonstrou que os ganhos operacionais se traduzem em benefícios financeiros concretos e sustentáveis.

Como perspetiva de trabalhos futuros, recomenda-se a integração em tempo real dos modelos de simulação com sistemas de gestão de armazéns e plataformas IoT, de forma a permitir a monitorização contínua das operações e a tomada de decisão em tempo quase real. Adicionalmente, a inclusão de variáveis relacionadas com o fator humano, como pausas, ritmos individuais de trabalho, fadiga e tempos de adaptação, poderá contribuir para modelos mais realistas e resultados mais robustos, reforçando o valor da simulação como uma ferramenta de apoio estratégico no contexto da Indústria 4.0.

Em suma, a resposta à questão de investigação foi positiva e clara. A utilização da metodologia PDCA, em articulação com a simulação computacional, permitiu alcançar melhorias significativas na gestão dos processos logísticos. As conclusões obtidas reforçam a relevância da abordagem adotada e validam os contributos práticos deste estudo, quer para a empresa em questão, quer para outras organizações com desafios semelhantes na sua cadeia de abastecimento. Apesar das limitações inerentes à ausência de implementação em ambiente real, os resultados obtidos fornecem uma base sólida para futuras ações, nomeadamente a validação prática das propostas desenvolvidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Saad, W. K., Al-Talib, M., Garza-Reyes, J. A., & Nadeem, S. P. (2023, July 13). *Sustainable Warehouse Features: A Systematic Literature Review*. <https://doi.org/10.46254/an13.20230592>
- Amarantou, V., Chatzoudes, D., Angelidis, V., Xanthopoulos, A., & Chatzoglou, P. (2023). Improving the operations of an emergency department (ED) using a combined approach of simulation and analytical hierarchical process (AHP). *Journal of Simulation*, 17(2), 193–210. <https://doi.org/10.1080/17477778.2021.1981784>
- Andrade, D. F. (2018). Gestão pela qualidade - volume 2. In Editora Poisson (Ed.), *Gestão pela qualidade - volume 2*. 10.5935. <https://doi.org/10.5935/978-85-93729-81-2.2018b001>
- Banks, J. (2000). INTRODUCTION TO SIMULATION. *Winter Simulation Conference*.
- Bartholdi, J. J., & Hackman, S. T. (2014). *Warehouse & Distribution Science*. www.warehouse-science.com
- Benevides, C. (2020, October 6). *The Advantages and Disadvantages of Automated Guided Vehicles (AGVs)*. <https://www.conveyco.com/blog/advantages-disadvantages-automated-guided-vehicles-agvs/>.
- Börger, E. (2012). Approaches to modeling business processes: A critical analysis of BPMN, workflow patterns and YAWL. *Software and Systems Modeling*, 11(3), 305–318. <https://doi.org/10.1007/s10270-011-0214-z>
- Burinskiene, A. (2015). Optimising forklift activities in wide-aisle reference warehouse. *International Journal of Simulation Modelling*, 14(4), 621–632. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM14\(4\)5.312](https://doi.org/10.2507/IJSIMM14(4)5.312)
- Cavalcante, L. (2023, April 19). *Conheça o PDCA e como ter resultado com ele*. <https://www.linkedin.com/pulse/conhe%C3%A7a-o-pdca-e-como-ter-resultado-com-ele-lorena-cavalcante/>.
- Chance, F., Robinson, J., & Fowler, J. (1996). Supporting manufacturing with simulation: Model design, development, and deployment. *Winter Simulation Conference*.
- Chojnacka-Komorowska, A., & Kochaniec, S. (2019). Improving the quality control process using the PDCA cycle. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego We Wrocławiu*, 63(4), 69–80. <https://doi.org/10.15611/pn.2019.4.06>
- Coelho, F., Relvas, S., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2021). Simulation-based decision support tool for in-house logistics: the basis for a digital twin. *Computers & Industrial Engineering*, 153, 107094. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107094>
- Cousson, P. Y., Decerle, N., Munoz-Sanchez, M. L., Roux, D., Doméjean, S., Nicolas, E., & Hennequin, M. (2018). The “Plan” phase of a Deming cycle: Measurement of quality and outcome of root canal treatments in a university hospital. *European Journal of Dental Education*, 23(1), e1–e11. <https://doi.org/10.1111/eje.12393>
- De Koster, R., Le-Duc, T., & Roodbergen, K. J. (2006). *Design and Control of Warehouse Order Picking: a literature review ERIM Report Series reference number*. www.irim.eur.nl
- Dharmasiri, P., Kavalchuk, I., & Akbari, M. (2020). Novel Implementation of Multiple Automated Ground Vehicles Traffic Real Time Control Algorithm for Warehouse Operations: Dijkstra Approach. *OPERATIONS AND SUPPLY CHAIN MANAGEMENT*, 13(4), 396–405.
- Drei, S. M., Silva, C. L., & Fagundes, K. N. M. (2019). UMA PROPOSTA DE APLICAÇÃO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO DE ARMAZENAMENTO EM UMA EMPRESA SIDERÚRGICA. In *A Interface Essencial da Engenharia de Produção no Mundo Corporativo 4* (pp. 179–191). Atena Editora. <https://doi.org/10.22533/at.ed.58019090715>

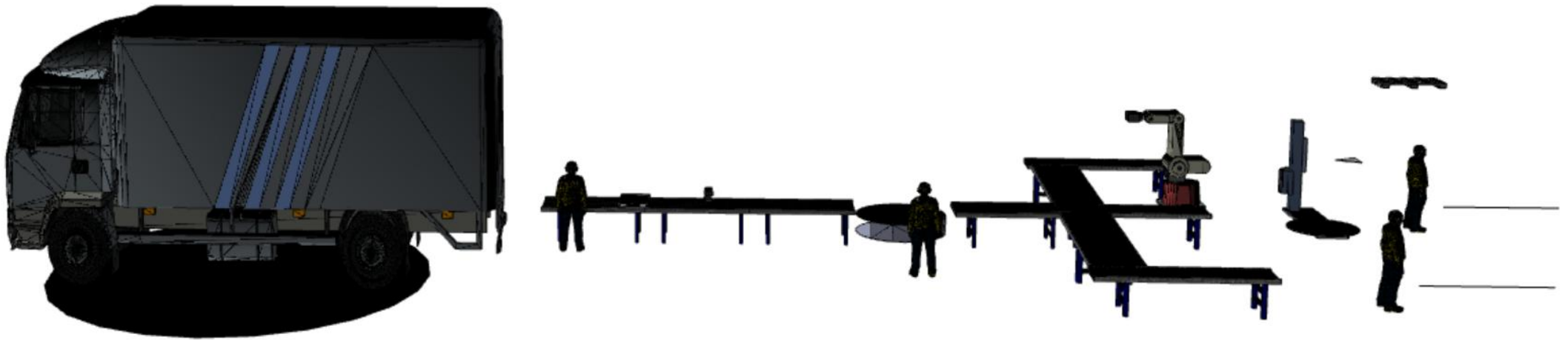
- El Jaouhari, A., Azari, M., Arif, J., El Farouk, I. I., Jawab, F., & Moufad, I. (2022). IoT for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0: A Systematic Literature Review. *2022 IEEE 14th International Conference of Logistics and Supply Chain Management, LOGISTIQUA 2022*.
<https://doi.org/10.1109/LOGISTIQUA55056.2022.9938123>
- Espinal, C., Alberto, A., Montoya, G., Andres, R., Alzate, S., Ariel, J., Alberto Correa Espinal, A., Jaime Isaza Cadavid, P., & Ariel Sánchez Alzate, J. (2012). *IMPROVEMENT OF OPERATIONS OF PICKING AND DISPATCH FOR A BUSINESS IN THE MATTRESS INDUSTRY, SUPPORTED BY DISCRETE SIMULATION MEJORA DE LAS OPERACIONES DE PREPARACIÓN DE PEDIDOS Y DESPACHO DE UNA EMPRESA DEL SECTOR COLCHONERO APOYADO EN SIMULACIÓN DISCRETA RODRIGO ANDRES GÓMEZ MONTOYA*. *79(173)*, 104–112.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49623204013>
- Fedorko, G., Kostovčík, M., Mikušová, N., Neradilová, H., Molnár, V., & Ďuriška, M. (2025). Using blockchain technology in the computer simulation of logistics processes. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *142*, 103104.
<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2025.103104>
- Fidlerova, H., Kuka, M., & Adamczak, M. (2024). Innovative solutions for warehouse logistics: improving efficiency with RFID and IoT integration. *Acta Logistica - Ernational Scientific Journal about Logistics I*, *12(1)*, 137–145. <https://doi.org/10.22306/al.v12i1.603>
- Frazelle, E. H. (2002). *World-Class Warehousing and Material Handling*.
- Garza-Reyes, J. A., Torres Romero, J., Govindan, K., Cherrafi, A., & Ramanathan, U. (2018). A PDCA-based approach to Environmental Value Stream Mapping (E-VSM). *Journal of Cleaner Production*, *180*, 335–348. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.121>
- Gaziero, C., & Ceconello, I. (2019). Simulação Computacional do Fluxo de Valor: uma proposta de Integração da Indústria 4.0 e Lean Production. *Scientia Cum Industria*, *7(2)*, 52–67.
<https://doi.org/10.18226/23185279.v7iss2p52>
- Ghosh, S., Mandal, M. C., & Ray, A. (2023). A PDCA based approach to evaluate green supply chain management performance under fuzzy environment. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, *18(1)*, 1–15.
<https://doi.org/10.1080/17509653.2022.2027292>
- Govindan, K., Kannan, D., Jørgensen, T. B., & Nielsen, T. S. (2022). Supply Chain 4.0 performance measurement: A systematic literature review, framework development, and empirical evidence. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *164*. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102725>
- Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2007). Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. In *European Journal of Operational Research* (Vol. 203, Issue 3, pp. 539–549). <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.07.031>
- Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2010). Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, *203(3)*, 539–549. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2009.07.031>
- Hlupic, V., & Paul, R. J. (1996). *Methodological approach manufacturing simulation selection*.
- Hong, L. J., & Nelson, B. L. (2009). A brief introduction to optimization via simulation. *Proceedings - Winter Simulation Conference*, 75–85.
<https://doi.org/10.1109/WSC.2009.5429321>
- Johann, E., & Diedrich, H. (n.d.). *91-PROPOSTA DE MELHORIA NO PROCESSO DE CARREGAMENTO DA EMPRESA UNIVALE DISTRIBUIDORA DE BEBIDAS*.
- King, D. H., & Harrison, H. S. (2013). *OPEN-SOURCE SIMULATION SOFTWARE "JAAMSIM."*
- Kumar, A., Krishnamurthi, R., Nayyar, A., Luhach, A. K., Khan, M. S., & Singh, A. (2021). A novel Software-Defined Drone Network (SDDN)-based collision avoidance strategies for on-

- road traffic monitoring and management. *Vehicular Communications*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2020.100313>
- Kwang-Yeol Yoo. (2003). *ECO-WKP(2003)19.en*.
- Law, A. M. (2009). *HOW TO BUILD VALID AND CREDIBLE SIMULATION MODELS*. Winter Simulation Conference.
- Mahmoudinazlou, S., Sobhanan, A., Charkhgard, H., Eshragh, A., & Dunn, G. (2025). Deep reinforcement learning for dynamic order picking in warehouse operations. *Computers & Operations Research*, 182, 107112. <https://doi.org/10.1016/J.COR.2025.107112>
- Mammun, A. Al, Prayogo, A., & Buics, L. (2021). *The Effects of the Application of Artificial Intelligence in Material Handling – A Systematic Literature Review*. 139–150. <https://doi.org/10.31410/LIMEN.S.P.2021.139>
- Masenssine, S. R., Corrêa, E. M., Adival, F., Monteiro, S., Marcus, F., & Barbosa, V. (n.d.). *Gestão de Processos de Estoque e Armazenagem Visando Redução de Custos*.
- MaxtonLogística. (2021, February 15). *Quais as principais etapas do processo de armazenagem?* <https://Maxtonlogistica.Com.Br/as-Principais-Etapas-Do-Processo-de-Armazenagem/>.
- Mecalux. (2022, July 5). *A importância da etiquetagem no armazém*. <https://www.mecalux.com.br/blog/etiquetagem-armazem>
- Mecalux. (2025, June 6). *Putaway: O que é e qual a sua importância na logística de um armazém*. <https://www.mecalux.com.br/blog/putaway-logistica-armazem>
- Moen, R., & Norman, C. (n.d.). *Evolution of the PDCA Cycle*. <https://www.anforq.org/activities/congresses/index.html>
- OnBlox. (2023). *Estruturas de armazenagem*. Retrieved June 22, 2025, from <https://onblox.com.br/estruturas-de-armazenagem/>
- Palanivel, M., Venkadesh, M., & Vetriselvi, S. (2025). Optimizing supply chain efficiency: integrating LIFO-FIFO strategies with predictive analytics and sustainability practices. *Journal of Control and Decision*. <https://doi.org/10.1080/23307706.2025.2503796>
- Pan, F. F., Pan, F. C., & Chou, S.-J. (2011). Reducing the charging errors in an hospital emergency department: A PDCA approach. *Scientific Research and Essays*, 6(2), 463–468. <http://www.academicjournals.org/SRE>
- Pereira, A., & Araújo, G. (2016). *APLICAÇÃO DO PDCA NA OTIMIZAÇÃO DA LOGÍSTICA E DO ESTOQUE EM UMA PEQUENA EMPRESA DA ZONA DA MATA MINEIRA*.
- Ramaa, A., Subramanya, K. N., & Rangaswamy, T. M. (2012). Impact of Warehouse Management System in a Supply Chain. In *International Journal of Computer Applications* (Vol. 54, Issue 1).
- Raza, M., Malik, A. A., & Bilberg, A. (2021). PDCA integrated simulations enable effective deployment of collaborative robots: Case of a manufacturing SME. *Procedia CIRP*, 104, 1518–1522. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.256>
- Ricci, G. M., Magrini, R. C., & Pandolfi, M. A. C. (2021). CICLO PDCA COMO FERRAMENTA DA QUALIDADE PARA A MELHORIA EM SERVIÇOS. *Revista Interface Tecnológica*, 18(1), 537–545. <https://doi.org/10.31510/infa.v18i1.1122>
- Ronald H. Ballou. (2004). *Business logistics/supply chain management: Planning, organizing, and controlling the supply chain* (5th ed.). Pearson Education. In <https://pt.scribd.com/document/384746731/business-logistics-mangment> (4th ed.).
- Rouwenhorst, B., Reuter, B., Stockrahm, V., Van Houtum, G. J., Mantel, R. J., & Zijm, W. H. M. (2000). Warehouse design and control: Framework and literature review. *European Journal of Operational Research*, 122(3), 515–533. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00020-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00020-X)
- Roy, D., Krishnamurthy, A., Heragu, S., & Malmborg, C. (2015). Queuing models to analyze dwell-point and cross-aisle location in autonomous vehicle-based warehouse systems.

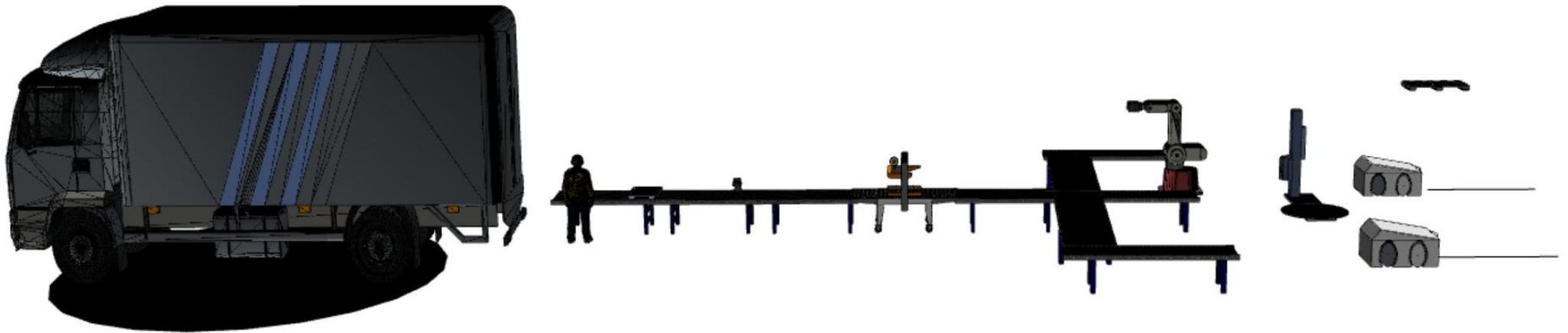
- European Journal of Operational Research*, 242(1), 72–87.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.09.040>
- Rozinat, A., Mans, R. S., Song, M., & van der Aalst, W. M. P. (2009). Discovering simulation models. *Information Systems*, 34(3), 305–327. <https://doi.org/10.1016/j.is.2008.09.002>
- Santos Queiroz, E., Barbosa de Alencar, D., Tregue Costa, A. P., & Eufrazio dos Santos, M. (2019). Application of PDCA Cycle Methodology in Management of Continuous Improvement in Receiving and Movement Logistics. *International Journal for Innovation Education and Research*, 7(11), 980–991. <https://doi.org/10.31686/ijer.vol7.iss11.1958>
- Song, M. H., & Fischer, M. (2020). Daily plan-do-check-act (PDCA) cycles with level of development (LOD) 400 objects for foremen. *Advanced Engineering Informatics*, 44, 101091. <https://doi.org/10.1016/J.AEI.2020.101091>
- Straka, M., Khouri, S., Paška, M., Buša, M., & Puškaš, D. (2019). Environmental assessment of waste total recycling based on principles of logistics and computer simulation design. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(3), 1367–1375.
<https://doi.org/10.15244/pjoes/89540>
- TAWI. (2025, March 12). *Automatize sua logistica de entrada de manuseio de materiais – e fique à frente da concorrência*. <https://www.tawi.com/pt-br/ideias-de-manipulacao/automatize-sua-logistica-de-entrada-de-manuseio-de-materiais--e-fique-a-frente-da-concorrencia>
- Tubis, A. A., & Rohman, J. (2023). Intelligent Warehouse in Industry 4.0—Systematic Literature Review. In *Sensors* (Vol. 23, Issue 8). MDPI. <https://doi.org/10.3390/s23084105>
- Van Groenendaal, W., Kleijnen, J. P. C., Van, W. J. H., Jack, G., & Kleijnen, P. C. (2000). *IDENTIFYING IMPORTANT FACTORS IN DETERMINISTIC INVESTMENT PROBLEMS USING DESIGN OF EXPERIMENTS*. <https://www.researchgate.net/publication/2932760>
- Vis, I. F. A. (2006). Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems. *European Journal of Operational Research*, 170(3), 677–709.
<https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2004.09.020>
- Xu, Q., Wang, N., & Shi, H. (2012). A Review of Croston’s method for intermittent demand forecasting. *Proceedings - 2012 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2012*, 1456–1460.
<https://doi.org/10.1109/FSKD.2012.6234258>
- Zeng, W., Baafi, E. Y., & Fan, H. (2022). A simulation model to study truck-allocation options. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 122(1), 1–8.
<https://doi.org/10.17159/2411>

ANEXOS

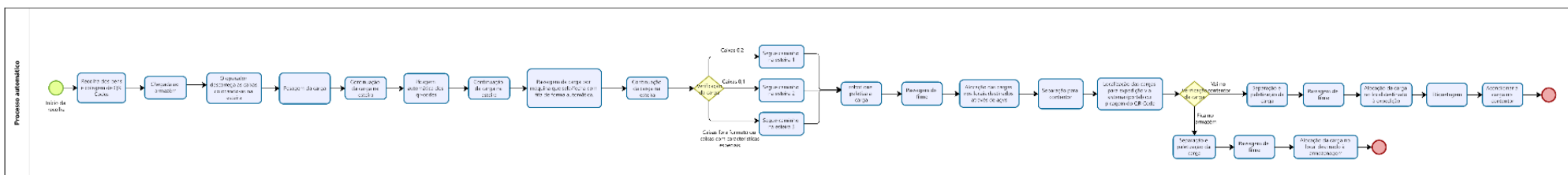
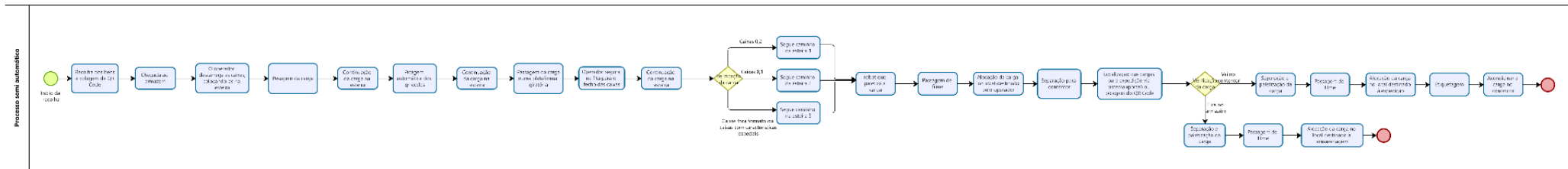
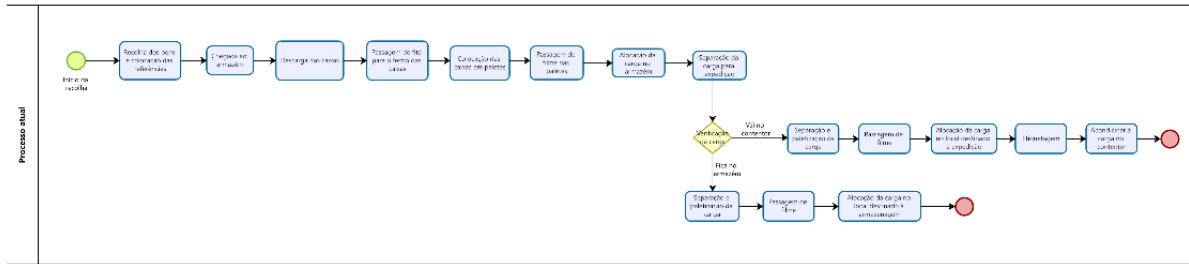
ANEXO A – Simulação 3D Semiautomático



ANEXO B – Simulação 3D Automático



ANEXO C – Mapeamento de Processos



ANEXO D - Tempos Cronometrados e Estatísticas das Etapas do Processo Manual

Processos	Tempos cronometrados (s)						Mínimo (s)	Máximo (s)	Média (s)	Desvio Padrão (s)			
Descarga total das caixas	30,100						28,333	41,250	32,607	4,219			
	33,917												
	28,333												
	32,750												
	31,364												
	41,250												
	30,538												
Fechar com fita e paletização - 0,2	31,42	36,59	42,97	33,88	33,59	45,03	30,610	62,420	41,227	6,928			
	40,51	47,67	43,34	36,21	39,68	50,18							
	43,1	41,52	37,95	32,25	51,19	42,74							
	43,25	37,3	52,79	30,69	40,98	35,53							
	31,58	31,41	42,57	42,05	39,77	43,64							
	42,82	43,24	43,84	48,1	38,68	49,59							
	41,5	32,39	50,27	30,61	52,44	33,29							
	37,42	34,78	62,42	43,38	46,3	46,43							
	143,89	157,96	298,44	49,39	203,26	278,03					28,720	353,520	194,483
278,03	136,43	223,53	322,21	78,23	200,75								
200,75	324,16	94,11	218,66	285,37	112,75								
112,75	167,57	353,52	28,72	215,22	276,41								
276,41	58,47	187,66	248,08	185,13	218,64								
218,64	193,74	88,23	208,91	192,31	165,92								
165,92	207,31	225,79	212,07	205,46	210,03								
210,03	205,53	174,18	212,35	210,89	25,89	18,570	43,110	30,671	7,670				
37,53	19,37	42,37	19,58	25,94	32,19								
26,66	27,42	23,38	40,28	18,57	29,77								
36,19	21,29	24,18	37,83	28,34	39,31								
28,34	39,31	27,83	31,38	29,08	25,82								
29,08	25,82	42,15	39,62	18,47	10,22					10,190	30,850	22,122	5,936
22,29	21,89	30,85	20,89	23,2	25,21								
18,13	29,47	29,17	19,97	16,43	10,19								
24,65	17,93	17,42	23,98	30,17	26,75								
15,53	19,13	17,42	16,71	21,64	18,73	11,560	24,290	18,221	3,127				
11,56	19,57	18,14	20,92	14,73	17,47								
18,14	20,92	14,73	17,47	19,26	24,29								
19,26	24,29	46,31	17,34	31,38	44,79					15,270	46,310	33,071	8,474
44,79	15,27	33,21	36,25	22,61	46,21								
27,89	38,32	29,56	34,32	45,48	34,23								
31,37	32,14	30,68	33,24	35,72	28,17								
33,24	35,72	28,17	24,34	33,67	21,54								
24,34	33,67	21,54	10,97	28,84	11,52								
10,97	28,84	11,52	21,47	34,39	17,21	10,970	37,930	26,131	7,131				
37,93	26,48	32,32	30,01	19,34	25,91								
30,01	19,34	25,91	28,78	29,17	28,11								
28,78	29,17	28,11	24,23	31,74	30,78								
24,23	31,74	30,78	18120	18663	18327					18120,000	18962,000	18450,571	282,577
18120	18663	18327	18459	18962	18244								
18459	18962	18244	18379	2882	1744								
18379	2882	1744	3960	1620	3369								
3960	1620	3369	1534	2973	1534								
1534	2973	1534	2973	2973	2973								

ANEXO D.1 – Registo de Cronometragens: Descarga Manual de Caixas

	Quantidade caixas	Média de tempo dispendido por caixa (s)
Caixas 0,2	8	30,5385
Caixas 0,1	1	
Fora Formato	4	
Tempo Total (s)	397	

	Quantidade caixas	Média de tempo dispendido por caixa (s)
Caixas 0,2	7	30,1000
Caixas 0,1	2	
Fora Formato	1	
Tempo Total (s)	301	

	Quantidade caixas	Média de tempo dispendido por caixa (s)
Caixas 0,2	9	33,9167
Caixas 0,1	1	
Fora Formato	2	
Tempo Total (s)	407	

	Quantidade caixas	Média de tempo dispendido por caixa (s)
Caixas 0,2	2	28,3333
Caixas 0,1	1	
Fora Formato	0	
Tempo Total (s)	85	

	Quantidade caixas	Média de tempo dispendido por caixa (s)
Caixas 0,2	10	32,7500
Caixas 0,1	1	
Fora Formato	1	
Tempo Total (s)	393	

	Quantidade caixas	Média de tempo dispendido por caixa (s)
Caixas 0,2	40	31,3636
Caixas 0,1	4	
Fora Formato	0	
Tempo Total (s)	1380	

	Quantidade caixas	Média de tempo dispendido por caixa (s)
Caixas 0,2	5	41,2500
Caixas 0,1	2	
Fora Formato	1	
Tempo Total (s)	330	

ANEXO E - Número mínimo de cronometragens necessárias para cada processo

Número mínimo de cronometragens com base na distribuição normal (em segundos)								
	Descarga de caixas	Fita e paletização - caixas 0,2	Fita e Armazenar - caixas fora formato	Fita e paletização - caixas 0,1	Filmagem das paletes - caixas 0,1	Filmagem das paletes - caixas 0,2	Armazenamento - caixas 0,2	Armazenamento - caixas 0,1
Média (s)	32,6074	41,2267	194,4828	30,6707	22,1219	18,2214	33,0710	26,1310
Desvio Padrão (s)	4,2192	6,9281	74,6431	7,6699	5,9363	3,1266	8,4739	7,1310
Z	1,645							
n	4,5307	7,6418	39,8611	16,9225	19,4859	7,9674	17,7667	20,1523
Nº de cronometragens efetuadas	7	48	40	28	21	14	21	21

ANEXO F – Custos de Investimento

Preços atuais de mercado					
Artigo	Preço Unitário (Semiautomático)	Preço Unitário (Automático)	Quantidade necessária	Custo Total (Semiautomático)	Custo Total (Automático)
Transportadora de rolos normal	1 300,00 €	2 000,00 €	7	9 100,00 €	14 000,00 €
Transportadora de rolos com barra desviadora	5 000,00 €	7 500,00 €	1	5 000,00 €	7 500,00 €
Máquina de pesar/Balança	3 500,00 €	5 000,00 €	1	3 500,00 €	5 000,00 €
Máquina de Picagem de QR Code	2 000,00 €	4 000,00 €	3	6 000,00 €	12 000,00 €
Máquina de fechar com fita	2 000,00 €	6 000,00 €	1	2 000,00 €	6 000,00 €
Robot de paletização	35 000,00 €	70 000,00 €	1	35 000,00 €	70 000,00 €
Máquina de Filmagem	8 000,00 €	14 000,00 €	1	8 000,00 €	14 000,00 €
AGV	0,00 €	10 000,00 €	3	0,00 €	30 000,00 €
Total				68 600,00 €	158 500,00 €