



**Universidade Federal do Amazonas**  
**Faculdade de Tecnologia**  

---

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de**  
**Produção - PPGE**



**ÁTILA MARTINS LUCAS**

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO DE  
REQUISITOS DA INDÚSTRIA 4.0 NA LOGÍSTICA INTERNA:  
UM CASO EM UMA FÁBRICA DE FITAS ADESIVAS DO PIM**

MANAUS

2025

**ÁTILA MARTINS LUCAS**

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO DE  
REQUISITOS DA INDÚSTRIA 4.0 NA LOGÍSTICA INTERNA:  
UM CASO EM UMA FÁBRICA DE FITAS ADESIVAS DO PIM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu*, em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Amazonas como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

**Área de Concentração:** Gestão da Produção e Operações

**Linha de Pesquisa:** Modelagem, Simulação e Otimização de Processos

**Orientador:** Sandro Breval Santiago, Ph.D.

MANAUS

2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

---

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| L933p | Lucas, Átila Martins<br>Projeto e simulação de uma aplicação de requisitos da Indústria 4.0 na logística Interna: um estudo de caso em uma fábrica de fitas adesivas do PIM / Átila Martins Lucas. - 2025.<br>136 f. : il., color. ; 31 cm.<br><br>Orientador(a): Sandro Breval Santiago.<br>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Manaus, 2025.<br><br>1. Logística interna. 2. Tecnologias da indústria 4.0. 3. RFID. 4. Simulação computacional. 5. Pesquisa operacional. I. Santiago, Sandro Breval. II. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Título |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

---

**Átila Martins Lucas**

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO DE  
REQUISITOS DA INDÚSTRIA 4.0 NA LOGÍSTICA INTERNA:  
UM CASO EM UMA FÁBRICA DE FITAS ADESIVAS DO PIM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu*, em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Amazonas como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

**Área de Concentração:** Gestão da Produção e Operações

**Linha de Pesquisa:** Modelagem, Simulação e Otimização de Processos

**Orientador:** Sandro Breval Santiago, Ph.D

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Sandro Breval Santiago, Ph.D  
Universidade Federal do Amazonas  
Orientador e Presidente

---

Décio Luiz Reis  
Universidade Federal do Amazonas  
Membro Interno PPGEP

---

Orlem Pinheiro de Lima  
Universidade Estadual do Amazonas  
Membro Externo

Manaus, 02 de junho de 2025.

## **AGRADECIMENTOS**

Meus agradecimentos vão primeiramente para Deus e para a minha família, em especial aos meus pais Maria Cleonice e Emanuel Lucas pelo apoio incondicional e incentivo para trilhar o caminho da educação. E se estende às engenheiras incríveis que de alguma forma auxiliaram para tornar possível esta pesquisa: Adna Lima, Joziely Feitosa, Laura Lima, Leandra Leal, Profa Dra Ely Sena e Vitória de Melo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sandro Breval Santiago, por toda a atenção, paciência e incentivos despendidos a minha pessoa ao longo da realização deste trabalho.

Aos professores Dr. Marcelo Albuquerque de Oliveira e Dr. Dércio Luiz Reis pelas valorosas contribuições na Banca de Qualificação.

A todos os professores e alunos da turma 26 do PPGEF-UFAM pelo conhecimento compartilhado.

Finalmente ao Hub Tecnologia e Inovação da UEA, em especial ao prof. MsC Roberto Higino Pereira da Silva e Dr. Francisco Assis Barros de Oliveira por oportunizar a realização desta pesquisa.

## RESUMO

A logística interna exerce papel estratégico no desempenho operacional das indústrias, sendo influenciada por fatores como layout, sistemas de manuseio de materiais e nível de maturidade tecnológica. No contexto do Polo Industrial de Manaus, observa-se que a adoção dos requisitos da Indústria 4.0 ainda ocorre de forma incipiente, especialmente no que se refere à digitalização e à modelagem de processos logísticos. Diante desse cenário, esta dissertação teve como objetivo utilizar a simulação computacional para estimar os impactos da aplicação de requisitos da Indústria 4.0 e de propostas de reconfiguração de layout na logística interna, com foco no transporte e no armazenamento de paletes de produto acabado em uma fábrica de fitas adesivas localizada no Polo Industrial de Manaus. A pesquisa caracteriza-se como aplicada, de abordagem qualitativa e quantitativa, classificada quanto aos objetivos como exploratória e descritiva e, quanto aos procedimentos, como pesquisa-ação. Os dados foram coletados por meio de análise documental, entrevistas, observações in loco e cronoanálises das atividades operacionais, sendo posteriormente utilizados na construção de modelos de simulação de eventos discretos no software FlexSim®. Foram desenvolvidos quatro cenários de simulação: o cenário atual da fábrica, um cenário com unitização de cargas, um cenário com a adoção de tecnologias aderentes à Indústria 4.0 e um cenário adicional com proposta de novo layout e definição de parâmetros operacionais. Os resultados obtidos a partir das simulações demonstraram que a aplicação combinada de tecnologias da Indústria 4.0, unitização de cargas e reconfiguração do layout proporcionou melhorias significativas nos indicadores logísticos analisados, tais como redução de deslocamentos internos, melhor utilização dos recursos de transporte, diminuição de estoques intermediários e aumento da eficiência operacional. Conclui-se que a simulação computacional mostrou-se uma ferramenta aderente e eficaz para a avaliação de alternativas de melhoria na logística interna, apoiando a tomada de decisão em níveis operacional, tático e estratégico, além de contribuir para a competitividade industrial e para o avanço do conhecimento científico na área de logística 4.0.

**Palavras Chaves:** logística interna, tecnologias da indústria 4.0, RFID, simulação computacional, pesquisa operacional.

## ABSTRACT

Internal logistics plays a strategic role in the operational performance of industrial systems, being influenced by factors such as plant layout, material handling systems, and the level of technological maturity. In the context of the Manaus Industrial Pole, the adoption of Industry 4.0 requirements is still incipient, particularly with regard to the digitalization and modeling of logistics processes. In this context, this dissertation aimed to use computer simulation to estimate the impacts of applying Industry 4.0 requirements and layout reconfiguration proposals on internal logistics, with a focus on the transportation and storage of finished-product pallets in an adhesive tape manufacturing plant located in the Manaus Industrial Pole. The research is characterized as applied, with a qualitative and quantitative approach, classified as exploratory and descriptive in terms of objectives, and as action research with respect to procedures. Data were collected through document analysis, interviews, on-site observations, and time studies of operational activities, and subsequently used to develop discrete-event simulation models in the FlexSim® software. Four simulation scenarios were developed: the current factory scenario, a scenario with load unitization, a scenario incorporating Industry 4.0-oriented technologies, and an additional scenario proposing a new layout and the definition of operational parameters. The simulation results demonstrated that the combined application of Industry 4.0 technologies, load unitization, and layout reconfiguration led to significant improvements in the analyzed logistics indicators, such as reduced internal movements, better utilization of material handling resources, decreased intermediate inventories, and increased operational efficiency. It is concluded that computer simulation proved to be a suitable and effective tool for evaluating improvement alternatives in internal logistics, supporting decision-making at operational, tactical, and strategic levels, as well as contributing to industrial competitiveness and to the advancement of scientific knowledge in the field of Logistics 4.0.

**Keywords:** Internal Logistics, Industry 4.0 Technologies, RFID, Computer Simulation, Operations Research.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Diagrama de Espaguete representando o fluxo de produto acabado da empresa.....                                                               | 19 |
| Figura 2 - Abordagens baseadas em simulação aplicadas no contexto da Indústria 4.0 .....                                                                | 26 |
| Figura 3 - Campos de estudo da pesquisa em simulação .....                                                                                              | 27 |
| Figura 4 - Tecnologia adotadas na logística 4.0.....                                                                                                    | 30 |
| Figura 5 – Algumas soluções típicas da logística 4.0.....                                                                                               | 31 |
| Figura 6 - Níveis de complexidade nas cadeias de suprimentos e fábricas e o impacto das mudanças externas e internas na dinâmica de todo o sistema..... | 32 |
| Figura 7 – Partes componentes da logística interna.....                                                                                                 | 33 |
| Figura 8 - Interação entre processo, produto, logística e layouts .....                                                                                 | 37 |
| Figura 9 -Detalhamento das fases, etapas e atividades da estrutura proposta para pesquisa-ação.....                                                     | 42 |
| Figura 10 - Estruturação para condução da pesquisa-ação.....                                                                                            | 44 |
| Figura 11: Modelos de fase da pesquisa.....                                                                                                             | 46 |
| Figura 12 - Ilustração de empilhamento das caixas em paletes no setor de produção.....                                                                  | 48 |
| Figura 13 - Ilustração do transporte interno dos paletes com os produtos acabados.....                                                                  | 48 |
| Figura 14 - Ilustração do transporte interno dos paletes com os produtos acabados.....                                                                  | 49 |
| Figura 15 - Modelo Conceitual do cenário atual .....                                                                                                    | 49 |
| Figura 16 – Layout com indicação do posicionamento das máquinas e lista dos postos onde serão implementados os Totens de chamada.....                   | 50 |
| Figura 17 - Imagens dos postos onde serão implementados os Totens de chamada.....                                                                       | 51 |
| Figura 18 - Tabulação dos dados de Produto Acabado para inclusão no Modelo Computacional.....                                                           | 52 |
| Figura 19 - Tabulação das Embalagens – Caixa para inclusão no modelo computacional.....                                                                 | 53 |
| Figura 20 - Tabulação das Embalagens – Arruelas para inclusão no modelo computacional.....                                                              | 53 |
| Figura 21 - Tabulação dos dados de Embarque .....                                                                                                       | 55 |
| Figura 22 - Tabulação dos dados de embarque para inclusão no Modelo Computacional .....                                                                 | 56 |
| Figura 23 - <i>Process Flow</i> da Expedição e do Alimentador.....                                                                                      | 60 |
| Figura 24 - Vista superior do modelo 3D da simulação.....                                                                                               | 61 |
| Figura 25 - Exemplo de um grupo utilizado no modelo.....                                                                                                | 62 |
| Figura 26 - Exemplo de <i>Times Tables</i> referente ao Alimentador.....                                                                                | 63 |
| Figura 27 - Parâmetros configurados no modelo.....                                                                                                      | 63 |
| Figura 28 - <i>Data Source Time</i> para criação de PA.....                                                                                             | 65 |
| Figura 29 – Lógica de criação de PA .....                                                                                                               | 65 |
| Figura 30 – Lógica para a criação de MP .....                                                                                                           | 66 |
| Figura 31 – Lógica para atualização dos parâmetros filmes e caixas por dia/mês.....                                                                     | 67 |
| Figura 32 - <i>Process Flow</i> de movimentação de embalagens e destruição de paleta vazio.....                                                         | 68 |
| Figura 33 - Lógica de viagens do Alimentador a ADM.....                                                                                                 | 68 |
| Figura 34 - Estoques de PAs no Modelo Computacional .....                                                                                               | 69 |
| Figura 35 - <i>Process Flow</i> com a lógica de alimentação da lista de Estoques de PAs.....                                                            | 70 |
| Figura 36 - <i>Process Flow</i> com a lógica de início do Embarque .....                                                                                | 71 |
| Figura 37 - <i>Subflow</i> de Movimentação de Paleta e Modelo 3D e <i>Process Flow</i> de Realocação de paleta .....                                    | 72 |
| Figura 38 – (a) Lógica de Conferência e transporte do paleta realizado pelo operador da empilhadeira e (b) Configuração do delay de Embarque.....       | 73 |
| Figura 39 - Comparação da disposição das caixas nos paletes .....                                                                                       | 80 |
| Figura 40 - Processo de unitização do paleta.....                                                                                                       | 80 |
| Figura 41 - Evidência do Antigo e Novo posicionamento de PAs não embalados na fábrica .....                                                             | 81 |
| Figura 42 - Área de Porta-paleta/estoque da Expedição da Fábrica.....                                                                                   | 82 |
| Figura 43 - Modelo Conceitual do Cenário 1 – Paleta Unitizado .....                                                                                     | 83 |

|                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 44 - <i>Process flow</i> com a lógica principal de embalagem do cenário 1 .....                                                            | 85  |
| Figura 45 - Configuração do Run Sub Flow de Conferência (by Case).....                                                                            | 86  |
| Figura 46 - Sub Flow de Transporte e Stretch.....                                                                                                 | 87  |
| Figura 47 - Lógica de Definição do operador para transporte de PA unitizado e realização do transporte.....                                       | 88  |
| Figura 48 - Lógica com o Fluxo Principal Expedição .....                                                                                          | 89  |
| Figura 49 – Lógica no <i>Process Flow</i> do processo de Embarque.....                                                                            | 91  |
| Figura 50 - Lógica de preparação e fechamento da carreta.....                                                                                     | 91  |
| Figura 51 - Arquitetura inicial da solução .....                                                                                                  | 101 |
| Figura 52 – Leitor de código de barras e tablet com o sistema instalados na transpaleteira.....                                                   | 102 |
| Figura 53 – Leitor RFID posicionado na parte frontal do transpaleteira. ....                                                                      | 102 |
| Figura 54 - (a) Ilustração da TAG e do suporte da TAG. (b) Fixação da TAG no palete .....                                                         | 102 |
| Figura 55 - Gabinete do dispositivo de solicitação de coleta (a) protótipo (b) instalado no posto .....                                           | 103 |
| Figura 56 - Dashboard de Requisições de Coleta.....                                                                                               | 103 |
| Figura 57 - Transpaleteira realizando a leitura do RFID do palete.....                                                                            | 104 |
| Figura 58 – Etiquetas de endereçamento com o código de barras nos porta-paletes .....                                                             | 105 |
| Figura 59 – Modelo conceitual do transporte de produto acabado .....                                                                              | 105 |
| Figura 60 – Modelo conceitual do processo de embalagem .....                                                                                      | 106 |
| Figura 61 - Modelo conceitual do processo de embarque .....                                                                                       | 106 |
| Figura 62 - State Table customizada desenvolvida no modelo .....                                                                                  | 107 |
| Figura 63 - Criação dos grupos de operadores e lógica na Embalagem para análise de possíveis cenários.....                                        | 107 |
| Figura 64 - Lógica da transpaleteira elétrica.....                                                                                                | 108 |
| Figura 65 - Planta baixa do chão de fábrica evidenciando os postos de coleta e o raio de giro da transpaleteira para carregamento do Palete ..... | 110 |
| Figura 66 - Visão Geral do novo Layout proposto.....                                                                                              | 115 |
| Figura 67 – Novo layout do processo produtivo.....                                                                                                | 116 |
| Figura 68 - Configuração do software OPTQuest.....                                                                                                | 119 |
| Figura 69 – Resultado dos cenários ótimos do <i>software</i> OPTQuest .....                                                                       | 120 |
| Figura 70 - Alteração no local do palete vazio.....                                                                                               | 122 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gráfico 1 - Produção VS Embarque (total de agosto a novembro).....                                              | 74  |
| Gráfico 2 - Saída total de Paletes.....                                                                         | 74  |
| Gráfico 3 - Embarque vs Produção de paletes por dia.....                                                        | 75  |
| Gráfico 4 - Produção e embarque por hora.....                                                                   | 75  |
| Gráfico 5 - Utilização do Alimentador .....                                                                     | 76  |
| Gráfico 6 - Distância percorrida pelo Alimentador em metros.....                                                | 76  |
| Gráfico 7 - Gráfico comparativo de produção total de paletes por mês do Cenário Atual e Cenário 1               | 92  |
| Gráfico 8 - Gráfico de Produção por máquina .....                                                               | 93  |
| Gráfico 9 - Gráfico da produção de paletes por turno.....                                                       | 93  |
| Gráfico 10 - Gráficos de produção de PA por dia e por turno.....                                                | 94  |
| Gráfico 11 - Gráficos de Paletes embalados em 1 turno .....                                                     | 95  |
| Gráfico 12 - Gráfico comparativo da taxa de saída da Embalagem e Produção de paletes para 1 turno               | 96  |
| Gráfico 13 - Gráficos de Paletes embalados em 2 turnos .....                                                    | 96  |
| Gráfico 14 - Gráfico comparativo da taxa de saída da Embalagem e Produção de paletes para 2 turnos              | 97  |
| Gráfico 15 - Gráficos comparativos da média por dia de paletes estocados antes da embalagem para 2 turnos ..... | 98  |
| Gráfico 16 - Total de embarque de paletes nos 4 meses .....                                                     | 99  |
| Gráfico 17 - Embarque de paletes por turno e por mês .....                                                      | 99  |
| Gráfico 18 -Gráficos com resultados do cenário 2.....                                                           | 111 |
| Gráfico 19 – Taxa de utilização da tranpaleteira no cenário ótimo .....                                         | 121 |
| Gráfico 20 - Taxa de ocupação do operador da transpaleteira elétrica nos cenários IDA e IDB .....               | 123 |
| Gráfico 21 – Estoque máximo nas máquinas nos cenários IDA e IDB.....                                            | 124 |
| Gráfico 22 – Estoque máximo nas máquinas por dia nos cenários IDA e IDB .....                                   | 125 |
| Gráfico 23 - Máximo do estoque da pré-embalagem por hora no dia 08.....                                         | 125 |
| Gráfico 24 - Distância média percorrida por turno pelo Alimentador com a transpaleteira elétrica....            | 126 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Indicadores mensais de transporte de filmes.....                   | 54  |
| Tabela 2 - Média diária de alimentação de filme por turno .....               | 55  |
| Tabela 3 - Tipos de embarque .....                                            | 56  |
| Tabela 4 - Resultado do ExpertFit® para o Modelo Computacional .....          | 58  |
| Tabela 5 - Novo padrão de caixas por palete (Cenário Unitização) .....        | 78  |
| Tabela 6 - Dados de entrada do Cenário 1 .....                                | 84  |
| Tabela 7 - Quantidades de paletes embaladas nos três cenários de turnos.....  | 99  |
| Tabela 8 - Quantidade de paletes embarcados nos três cenários de turnos ..... | 100 |
| Tabela 9 - Dados da produção .....                                            | 117 |
| Tabela 10 - Dados de saída do cenário ótimo da otimização.....                | 120 |
| Tabela 11 – Comparativo dos resultados entre os dois cenários IDA e IDB.....  | 123 |
| Tabela 12 - Dados de saída do cenário ótimo da otimização.....                | 127 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 1 - Pontos negativos da logística interna atual da fábrica estudada ..... | 20  |
| Quadro 2 – Critérios de decisão.....                                             | 38  |
| Quadro 3 - Problemas identificados no Cenário Atual .....                        | 77  |
| Quadro 4 – Parâmetros adicionais do modelo para o Cenário 1 .....                | 82  |
| Quadro 5 - Impactos gerados pela solução tecnológica no processo logístico.....  | 112 |

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

**3D** – três dimensões

**CIEAM** - Centro da Indústria do Estado do Amazonas

**FIEAM** - Federação das Indústrias do Estado do Amazonas

**I-4.0** – Indústria 4.0

**IoT** – Internet of Things – Internet das Coisas

**MTO** – Make to order

**OP** – Ordem de Produção

**P&D** - Pesquisa e Desenvolvimento

**PA** – Produto acabado

**PCP** – Planejamento e Controle da Produção

**PIM** – Polo Industrial de Manaus

**UEA** – Universidade do Estado do Amazonas

**UFAM** – Universidade Federal do Amazonas

**WoS** – Web of Science

**ZFM** – Zona Franca de Manaus

## SUMÁRIO

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                                    | <b>15</b> |
| 1.1. OBJETIVOS                                          | 17        |
| 1.1.2 Objetivo Geral                                    | 17        |
| 1.1.2 Objetivos Específicos                             | 17        |
| 1.2. PROBLEMÁTICA                                       | 18        |
| 1.3. DELIMITAÇÃO DO OBJETO DE PESQUISA                  | 21        |
| 1.4. ESTRUTURA DO TEXTO                                 | 22        |
| <b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b>                         | <b>23</b> |
| 2.1. INDÚSTRIA 4.0                                      | 23        |
| 2.2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL                            | 24        |
| 2.3. LOGÍSTICA 4.0                                      | 28        |
| 2.3.1. Intralogística                                   | 31        |
| 2.3.2. Sistema de Manuseio de Materiais                 | 34        |
| 2.4. LAYOUT                                             | 35        |
| <b>3. METODOLOGIA</b>                                   | <b>41</b> |
| 3.1. NATUREZA DA PESQUISA                               | 41        |
| 3.2. FORMA DE ABORDAGEM DO PROBLEMA                     | 41        |
| 3.3. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA QUANTO AOS OBJETIVOS     | 41        |
| 3.4. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA QUANTO AOS PROCEDIMENTOS | 41        |
| 3.5. CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA FOCO DO ESTUDO           | 44        |
| 3.6. PROCEDIMENTOS PARA A COLETA DE DADOS               | 45        |
| 3.7. PROCEDIMENTOS PARA A ANÁLISE DOS DADOS             | 46        |
| 3.8. ETAPAS DA PESQUISA                                 | 46        |
| <b>4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>                      | <b>47</b> |
| 4.1. CENÁRIO 0 - ATUAL                                  | 47        |
| 4.1.1. Modelo Conceitual e Coleta de dados              | 47        |
| 4.1.2. Modelo Computacional                             | 60        |
| 4.1.3. Resultados                                       | 73        |
| 4.2. CENÁRIO 1 – UNITIZAÇÃO DOS PALETES                 | 77        |
| 4.2.1. Modelo Computacional - Cenário 1                 | 84        |
| 4.2.2. Expedição                                        | 88        |
| 4.2.3. Resultado da Simulação - Cenário 1               | 92        |
| 4.2.4. Análise do Produto Acabado                       | 92        |
| 4.2.5. Análise do processo de Embalagem                 | 95        |
| 4.3. CENÁRIO 2 – SOLUÇÃO TECNOLÓGICA                    | 100       |

|           |                                                  |            |
|-----------|--------------------------------------------------|------------|
| 4.3.1.    | Solução Tecnológica                              | 100        |
| 4.3.2.    | Modelo Computacional – Cenário 2                 | 105        |
| 4.3.3.    | Análise de impacto do cenário 2                  | 110        |
| 4.4.      | CENÁRIO 3 – PROPOSTA DE LAYOUT                   | 114        |
| 4.4.1.    | Modelo Computacional – Cenário 3                 | 116        |
| 4.4.2.    | Resultados da Simulação – Cenário 3              | 120        |
| <b>5.</b> | <b>CONCLUSÃO</b>                                 | <b>126</b> |
| <b>6.</b> | <b>IMPACTOS ACADÊMICOS, ECONÔMICOS E SOCIAIS</b> | <b>129</b> |
| 7.1       | IMPACTOS ACADÊMICOS                              | 129        |
| 7.2       | IMPACTOS ECONÔMICOS                              | 129        |
| 7.3       | IMPACTOS SOCIAIS                                 | 129        |
|           | <b>REFERÊNCIAS</b>                               | <b>131</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O Polo Industrial de Manaus (PIM) é considerado um dos maiores polos da América Latina sendo pilar de sustentação da Zona Franca de Manaus (Brasil, 2021). As indústrias nele instaladas precisam e estão se reestruturando para absorver os avanços tecnológicos deste novo paradigma industrial: a Indústria 4.0 (I-4.0). Conforme a pesquisa realizada pela Federação das Indústrias do Estado do Amazonas (FIEAM), Centro da Indústria do Estado do Amazonas (CIEAM) e Universidade Federal do Amazonas (UFAM) no PIM, 14% das empresas atendem alguns requisitos e estariam preparadas para essa nova fase industrial e que a modelagem digital não está presente em 80% das empresas (Metodologia, 2020).

Verifica-se que as organizações em geral, em especial as do PIM, estão encontrando dificuldades para relacionar a visão da Indústria 4.0 aos seus negócios e entender os benefícios proporcionados por ela. A implantação da I-4.0 é um processo contínuo e evolutivo para a implantação das mudanças necessárias (Silva; Lucas; Oliveira, 2021). Entretanto, há um longo caminho a percorrer pelas empresas instaladas do PIM para que as estratégias e a aplicação da inovação e tecnologias nos processos produtivos sejam implantadas de modo que as Indústrias permaneçam competitivas às suas concorrentes.

A importância da quarta revolução industrial é demonstrada por todos os planos de investimento europeus e mundiais visando a digitalização dos processos de fabricação e serviços (De Felice; Petrillo; Zomparelli, 2018). Tal investimento é justificável pois o desenvolvimento da I-4.0 envolve desafios que necessariamente mudam o processo produtivo das empresas, podendo englobar a adaptação de *layouts*, de processos produtivos, estoques e das formas de relacionamento entre empresas ao longo da cadeia produtiva cujos custos de implantação podem ser otimizados e minimizados com a utilização das ferramentas da simulação computacional.

Um dos desafios que merece atenção neste contexto é a movimentação interna de materiais (logística interna ou intralogística) visto que, segundo Viteri-Viteri et al. (2021), a movimentação de materiais ocupa 25% de todos os funcionários, 55% de todo o espaço da fábrica e 87% do tempo de produção. Tratar de logística interna é falar de peças se movimentando em um processo produtivo de manufatura, caixas e pallets transportados na área de expedição, refugos sendo destinados para as áreas de resíduo, entre outros.

Uma poderosa ferramenta, inovadora que economiza tempo e recursos financeiros, aumenta produtividade e qualidade na análise de processos e sistemas complexos é a

simulação computacional. Com ela é possível estudar, analisar e avaliar diferentes situações (inúmeros cenários) no mundo virtual, que não seriam possíveis na vida real. Em um mundo em crescente competição, tem se tornado uma metodologia indispensável de resolução dos problemas para os tomadores de decisão nas mais diversas áreas, uma vez que permite o teste de alternativas antes de aplicá-las, comprovando ou não os benefícios de um futuro investimento (Abreu et al., 2017).

Um modelo bem construído tem a capacidade de gerar estimativas do desempenho em termos de tempo de passagem, de utilização de recursos, dimensionamento de filas e de tempos produtivos. Se provida da capacidade de animação em 3D do modelo em tela de computador, a simulação pode também apresentar uma representação gráfica realista, ilustrando o fluxo de peças, pessoas e outras entidades do sistema extremamente similar ao processo físico real (Bateman et al., 2013).

A utilização de uma ferramenta de modelagem e simulação computacional aplicada na análise do processo produtivo, em especial a movimentação e armazenamento de produto acabado, e simulação de novas tecnologias a serem implementadas, ainda na etapa de desenvolvimento (projeto), pode, por exemplo, permitir o apontamento e a redução de gargalos do processo produtivo, levantar antecipadamente pontos de decisão de alto impacto da implementação de uma tecnologia inovadora neste processo e fornecer assim vantagem competitiva para a organização (Baxter et al., 2008).

Tudo isto posto, foi escolhida uma empresa do PIM atuante a 20 anos na fabricação de fitas adesivas por considerar que este produto (fitas adesivas) é considerado a tecnologia de união do futuro substituindo outros sistemas de fixação mecânica pela sua grande variedade de aplicabilidade (Aluizio, 2018). Ao longo dos últimos anos, a empresa, através da aplicação de recursos em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), passou a investir fortemente nos pilares da indústria 4.0 com aplicações de automação inteligente, robotização, sistema de monitoramento online da produção, IoT e computação em nuvem na manufatura.

O objeto de estudo desta pesquisa é uma aplicação da simulação computacional de eventos discretos como ferramenta para validação de aplicações dos conceitos da indústria 4.0 na logística interna com foco na movimentação de produtos acabados.

Sabe-se que o emprego das tecnologias da Indústria 4.0 na Logística irão transformar a indústria ao proporcionar a redução dos custos, aumento da eficiência energética e a segurança das atividades, bem como aumento da produtividade e do desempenho global do sistema, exigindo novas perspectivas sobre os processos (Glistau; Machado, 2019; Tang;

Veelenturf, 2019; Hompel; Kerner, 2015). Para isso, são necessários esforços científicos para implementar tecnologias de transformação para processos logísticos de Indústria 4.0, ou seja, devem ser estudadas e delimitadas como os temas de grande relevância e necessidade nas organizações deste século (Martínez, 2020).

O objeto de estudo desta pesquisa é uma organização fundada em 2005 e especializada na fabricação de fitas adesivas. Consolidou seu crescimento em nível nacional a partir do desempenho de sua unidade localizada no PIM. Apresenta como visão tornar-se líder nacional no setor de fitas adesivas e, para isso, busca fornecer produtos e serviços com padrões de qualidade global para os seus clientes. Atualmente, encontra-se em pleno crescimento com perspectivas de expandir a sua área fabril e consequentemente do seu processo produtivo tendo assim oportunidade de estudos na área. E possibilitando assim, colaboração entre universidade e indústria, que segundo De Paula Ferreira; Armellini; De Santa-Eulalia (2020), iniciativas como estas foram lançadas em todo o mundo para fortalecer a competitividade do setor de manufatura.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.2 Objetivo Geral

Usar a simulação computacional visando estimar os impactos da aplicação de requisitos da indústria 4.0 e *re-layout* na logística interna no que tange ao transporte e armazenamento de paletes de produto acabado, em uma fábrica de fitas adesivas do PIM.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Propor tecnologias voltadas para o atendimento dos requisitos da indústria 4.0 e um novo layout para otimização do transporte interno de produtos acabados de uma indústria de fitas adesivas do PIM;
- b) Aplicar técnicas de simulação de eventos discretos para demonstrar as melhorias na movimentação de produto acabado resultantes da adoção das tecnologias e novo layout propostos;
- c) Avaliar os impactos da proposta de aplicação de tecnologias com requisitos da indústria 4.0 e de layout por meio dos resultados da simulação computacional.

## 1.2. PROBLEMÁTICA

Ainda que responda por 60% de todo o território nacional e detenha uma população superior a 25 milhões de habitantes, a Amazônia Brasileira convive com uma enorme contradição ao despontar como o centro das atenções do mundo e subsistir como a periferia dos interesses do Brasil. Salvo o desenvolvimento observado em cidades como Belém, Manaus e Porto Velho, os resultados dos modelos de crescimento endógeno implementados na região ao longo dos últimos 500 anos não raramente acabam por descrever cenários onde prevalecem a exclusão social, pobreza, destruição ambiental, urbanização caótica, atraso tecnológico, economia de enclave, insuficiência da infraestrutura logística, fragmentação entre os setores produtivos, nível educacional sofrível, baixa capacidade científica instalada, estruturas estatais ineficientes e desigualdade social (Mello, 2015).

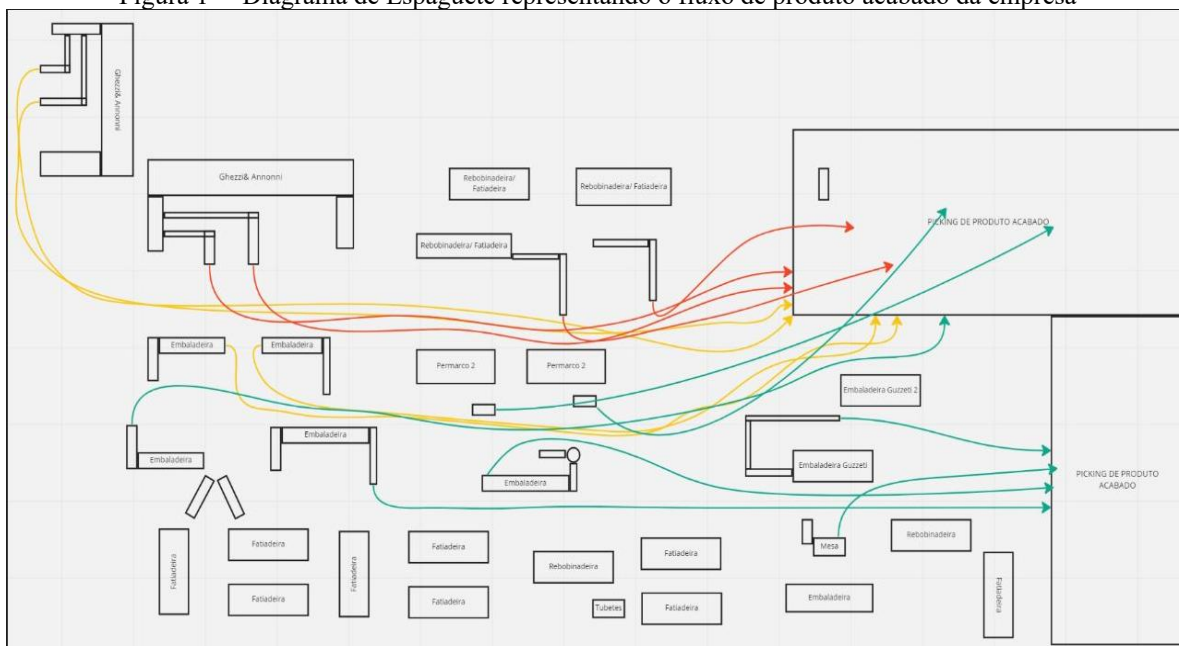
Os problemas atrelados à logística interna estão relacionados com diversos fatores como, por exemplo, *layout* e etapas de processamento. E sua otimização gera inúmeras soluções que devem ser analisadas e ponderadas para selecionar a mais adequada para a realidade da organização.

A utilização da simulação computacional, possibilita tais análises por permitir a visualização do funcionamento de processos diversos, facilitando a tomada de decisão a nível operacional, tático e estratégico pois apresenta-se como excelente ferramenta que auxilia a avaliação de mudanças propostas a um sistema.

A empresa, foco deste estudo, opera no sistema de produção *Make to Order* (MTO), mantendo algum nível de estoque de produtos acabados, porém mínimo e com rápida movimentação. Após receber o pedido do cliente, é elaborada uma ordem de produção (OP) com informações sobre o produto e insumos necessários. O Planejamento e Controle da Produção (PCP) organiza a produção das fitas conforme a disponibilidade da máquina.

No processo produtivo atual, o fluxo de materiais é composto da seguinte forma: a empresa fabrica diversas famílias de fitas adesivas cujos materiais e medidas variam, exigindo assim, células de fabricação distintas. Essas células são compostas basicamente por máquinas de rebobinamento, máquinas de corte e máquinas de embalagem que podem pertencer a uma única célula ou a várias células consecutivamente. Este formato de processo e a disposição do layout atual acarreta um elevado transporte e movimentação de materiais e pessoas dentro da fábrica, conforme Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de Espaguete representando o fluxo de produto acabado da empresa



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

No final de cada célula produtiva existe uma máquina que embala os seus produtos acabados em caixas de papelão de diversos tamanhos, que recebem uma etiqueta contendo a identificação do produto e o código de barras. Estas caixas são empilhadas sobre paletes, à medida que são fechadas. Existem aproximadamente 14 pontos de coleta de produto acabado.

Uma vez terminada a montagem do paleta, com a quantidade de caixas predeterminadas, o operador da máquina aciona um outro operador denominado de alimentador para mover este paleta até a área de embalagem. Este transporte interno é realizado com a utilização de transpaleta manual (matrim). O alimentador, também é responsável por verificar o andamento da produção, recolher as ordens de produção finalizadas e as levar ao departamento de expedição.

Uma vez que o paleta se encontra na área de armazenagem, o gestor da produção se incumbem de verificar, de tempos em tempos, se a produção foi finalizada para então iniciar o processo de expedição do produto ao cliente. Antes do envio ao cliente, o paleta com PA passa por inspeção no departamento de expedição antes de ser embarcado nas carretas. Este processo atual apresenta uma série de pontos negativos, como pode ser visto no **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Quadro 1 - Pontos negativos da logística interna atual da fábrica estudada

| Operação    | Pontos Negativos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mão de Obra | <p>A ausência de comunicação visual entre o operador da máquina e o alimentador de produção pode demandar a saída temporária do operador de seu posto para informar a finalização do palete. Esse fator pode comprometer a eficiência do processo produtivo, reduzindo a produtividade e aumentando o tempo de espera para a movimentação do produto acabado.</p> <p>O atraso no atendimento do alimentador pode ocorrer devido a esquecimento ou à necessidade de priorizar outra movimentação. Essa demora pode resultar no acúmulo de produtos acabados ao longo do processo produtivo, impactando a fluidez operacional e a eficiência do sistema de produção.</p> <p>Ocorre o desgaste físico do alimentador de produção por transportar cargas (paletes), com peso de até 1100 kg, utilizando um transpaleta convencional, o que implica em variação de ritmo do transporte e problemas de saúde e segurança ocupacional.</p>                                                                                                                     |
| Armazenagem | <p>Atualmente não há uma padronização do espaço utilizado para armazenamento e nem endereçamento individual para os paletes que estão no porta-paleta, ficando ao critério do alimentador a organização.</p> <p>A ausência de um sistema de controle do estoque em tempo real impede que o gestor da produção tenha acesso imediato às informações sobre os produtos armazenados. Dessa forma, torna-se necessário o deslocamento frequente até a área de armazenagem para realizar a contagem dos produtos acabados. Esse processo manual pode ocasionar atrasos na liberação de novas expedições, resultando em congestionamento e limitação do espaço disponível para paletes na área de armazenagem.</p> <p>A ausência de informações sobre os tempos de movimentação dos paletes entre as máquinas e a área de armazenagem, bem como o tempo de permanência dos paletes armazenados, dificulta a mensuração da carga de trabalho do operador. Essa lacuna pode comprometer a alocação eficiente de recursos e a otimização do fluxo produtivo.</p> |

Quadro 1 (Continuação) - Pontos negativos da logística interna atual da fábrica estudada

| <b>Operação</b> | <b>Pontos Negativos</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Transporte      | <p>Dificuldade de determinação do ritmo de produção das máquinas, uma vez que esta informação não chega em tempo real e/ou é desvirtuada por problemas ocasionados por falha de comunicação entre o operador da máquina e o alimentador de produção.</p> <p>A carência de informações sobre a taxa de ocupação do transporte interno dificulta o planejamento adequado do número de alimentadores de produção e de transpaleteiras, além de impactar a redefinição da distribuição das máquinas e a necessidade de ajustes nas rotas internas.</p> |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A seguir, apresenta a pergunta central a ser elucidada ao longo da pesquisa: A simulação computacional é aderente à avaliação do uso de tecnologias da indústria 4.0, visando a otimização do transporte interno de produto acabado?

### 1.3. DELIMITAÇÃO DO OBJETO DE PESQUISA

Esta pesquisa delimita-se à análise da logística interna de uma fábrica de fitas adesivas localizada no Polo Industrial de Manaus, com foco específico na configuração do *layout* e em seus impactos sobre o transporte, a movimentação e o armazenamento de paletes de produto acabado. O estudo concentra-se na avaliação do sistema intralogístico existente, considerando as rotas internas, a disposição física dos equipamentos e áreas produtivas, bem como a interação entre os recursos humanos e os sistemas de manuseio de materiais.

A investigação restringe-se à aplicação de técnicas de simulação computacional de eventos discretos, utilizando o software FlexSim®, como instrumento para modelar o cenário atual da fábrica e analisar cenários alternativos de melhoria. Esses cenários envolvem a reconfiguração do layout, a unitização de cargas e a adoção de tecnologias alinhadas aos requisitos da Indústria 4.0, com o objetivo de avaliar seus efeitos sobre os principais indicadores de desempenho logístico, tais como distância percorrida, taxa de utilização dos recursos de transporte, níveis de estoque intermediário e eficiência operacional.

O recorte temporal da pesquisa compreende o período de maior demanda produtiva da organização, entre os meses de agosto e novembro de 2022, permitindo a análise do

comportamento do sistema logístico em condições críticas de operação. Não fazem parte do escopo deste estudo a análise de custos financeiros detalhados, a automação completa das linhas de produção ou a avaliação de processos externos à logística interna, como transporte externo e distribuição. Dessa forma, o objeto da pesquisa está circunscrito à avaliação do layout da logística interna e à sua otimização por meio de simulação computacional, visando subsidiar a tomada de decisão e contribuir para a melhoria do desempenho intralogístico no contexto da Indústria 4.0.

Não integram o escopo deste estudo a análise detalhada de custos financeiros, a seleção e implementação de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, bem como a avaliação de processos externos à logística interna, tais como transporte externo e atividades de distribuição.

#### 1.4. ESTRUTURA DO TEXTO

O trabalho inicia com uma Introdução no qual contextualiza a pesquisa e apresenta a formulação do problema e uma breve justificativa do estudo. Logo em seguida são apresentados os objetivos gerais e específicos.

No capítulo de enquadramento teórico é realizado os principais temas relevantes para o desenvolvimento da pesquisa, sendo eles Indústria 4.0, simulação computacional, logística 4.0 e layout. Em seguida, as metodologias serão apresentadas e a pesquisa é classificada quanto a natureza, quanto a forma de abordagem do problema, quanto aos objetivos e quanto aos procedimentos. Sendo detalhado os procedimentos de coleta e análise dos dados.

No item 4 são descritos o desenvolvimento de três grandes cenários de simulação computacional:

- Cenário 0: Cenário atual da fábrica, base para os demais cenários;
- Cenário 1: Cenário com inclusão do setor de embalagem para unitização de carga;
- Cenário 2: Cenário com a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 e a unitização de carga;
- Cenário 3: Cenário 2 com uma proposta de novo layout e definição de parâmetros operacionais levando em consideração estudos de pesquisa operacional.

Por fim, serão apresentados os resultados da pesquisa, as conclusões, considerações quanto aos impactos acadêmicos, econômicos e sociais da pesquisa e referências utilizadas.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. INDÚSTRIA 4.0

A Indústria 4.0 está promovendo e fortalecendo a utilização de tecnologias inovadoras, redefinindo o estilo de vida, gerando novas formas de estruturação dos negócios e revolucionando os processos de fabricação, consequentemente, ocasionando uma transformação tecnológica na indústria (Alcácer; Cruz-machado, 2019). Nesse contexto, cada componente do sistema físico e cibernético interage entre si por meio de sensores conectados a uma rede comum, que transmite os dados, que por sua vez integra toda a cadeia de suprimento. Dessa forma, a I-4.0 pode ser caracterizada como uma mudança de paradigma digital que possibilita a tomada de decisões assertivas e descentralizadas (Sung, 2018).

Segundo Abreu *et al.* (2017) a Indústria 4.0 possui o foco no desenvolvimento de novas tecnologias ou na evolução das tecnologias herdadas das revoluções anteriores que possibilita a integração entre o mundo físico e virtual de toda uma planta operacional em prol da melhoria contínua. Para Rüßmann *et al.* (2015) Tais tecnologias habilitadoras são agrupadas em nove pilares: big data, realidade aumentada, robôs autônomos, Internet da Coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT), simulação, cibersegurança, integração de sistemas, computação em nuvem e manufatura aditiva.

Hofmann e Rüsch (2017) ressaltam que apesar das promissoras perspectivas da chamada "Quarta Revolução Industrial", é necessário considerar uma série de desafios, riscos e obstáculos relacionados à sua implementação. Em suma, os autores mencionam que as fronteiras tradicionais da indústria serão quebradas à medida que os processos de criação de valor forem reestruturados, levando a mudanças profundas nas organizações. Enfatiza-se, portanto, que a I-4.0 é o objetivo para o setor industrial contemporâneo, buscando a integração e virtualização de sistemas industriais e visando uma era de produção altamente automatizada, integrada e interconectada (Rüttimann; Stöckli, 2016; Uriarte; Ng; Moris, 2018).

Neste contexto, os clientes possuem maior envolvimento no processo de design do produto, visto que possuem necessidade de consumir produtos e serviços conectados à internet, analisam os dados coletados utilizando aplicativos inteligentes. Assim, na mesclagem de diversas tecnologias surgem as fábricas inteligentes, cujas características latentes são a auto-organização, auto-adaptação e capacidade de aprendizado em tempo real ou quase em tempo real (Wang *et al.*, 2016).

Conforme Rüßmann *et al.* (2015), a Indústria do futuro contém sistemas de produção que contam com interoperabilidade, virtualização, descentralização, capacidade de

processamento em tempo real e modularidade. Essas características fazem parte da essência da indústria digital e representam as mais recentes tecnologias reconhecidas mundialmente.

Segundo os estudos de Lozano, Ceulemans e Seatter (2015), assim como, El Baz *et al.* (2022) ao usar o arquétipo de I-4.0 fica evidente que as organizações enfrentam dificuldades devido às mudanças tecnológicas e organizacionais que impactam a cultura, processos e rotinas corporativas. Como efeito, surgem resistências à mudança e barreiras, exigindo assim, intervenção profissional qualificada. Em vista disso, é fundamental promover e incentivar os motores impulsionadores da mudança.

Importantes organizações nacionais e internacionais têm reconhecido a relevância e os muitos benefícios que a Indústria 4.0 proporciona não apenas aos fabricantes, mas também às demais partes envolvidas. A literatura apresenta diversos exemplos concretos dos ganhos resultantes da implementação da Indústria 4.0, comprovando seu valor e impacto positivo (Govindan; Arampatzis, 2023).

Sendo assim, a implantação de fábricas inteligentes conduzirá a alterações nas áreas de produção e logística, o que resulta em melhorias na eficiência, flexibilidade e produção orientada ao cliente. Em termos econômicos, os benefícios são redução de custos, diminuição dos prazos de entrega e aprimoramento da qualidade dos produtos (Košťál; Kiss; Kerak, 2011; Stock; Seliger, 2016).

## 2.2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Uma ampla área do conhecimento pode cooperar para tornar as fábricas inteligentes uma realidade, como a robótica, materiais e a própria simulação de eventos discretos (Vieira *et al.*, 2018). De acordo com Mourtzis, Doukas e Bernidaki (2014) para alcançar uma implementação bem-sucedida da manufatura digital é essencial utilizar como ferramenta a simulação computacional. Zúñiga, Moris e Syberfeldt (2017) complementa ao apontar que em um ambiente de produção de produtos personalizados, o valor da simulação torna-se notável e evidente, pois através dessa tecnologia, é possível enfrentar os desafios atuais da indústria de transformação.

As tecnologias fundamentadas em simulação desempenham um papel central na abordagem da fábrica digital, permitindo a realização de experimentos e validações em diversos padrões de sistemas de manufatura, processos e produtos (Caggiano; Teti, 2018). A modelagem e simulação constituem técnicas de pesquisa amplamente utilizadas em engenharia industrial e gestão de operações (Bertrand; Fransoo, 2002; Scheidegger *et al.*,

2018). Essa abordagem envolve modelos abstratos e simplificados de sistemas reais, além disso, permite que experimentos computacionais sejam executados em um ambiente seguro e isento de riscos. Tal prática tem como objetivo fornecer evidências, explicações, orientação, bem como recomendações, entre outras aplicações para os gestores (Mourtzis, 2020).

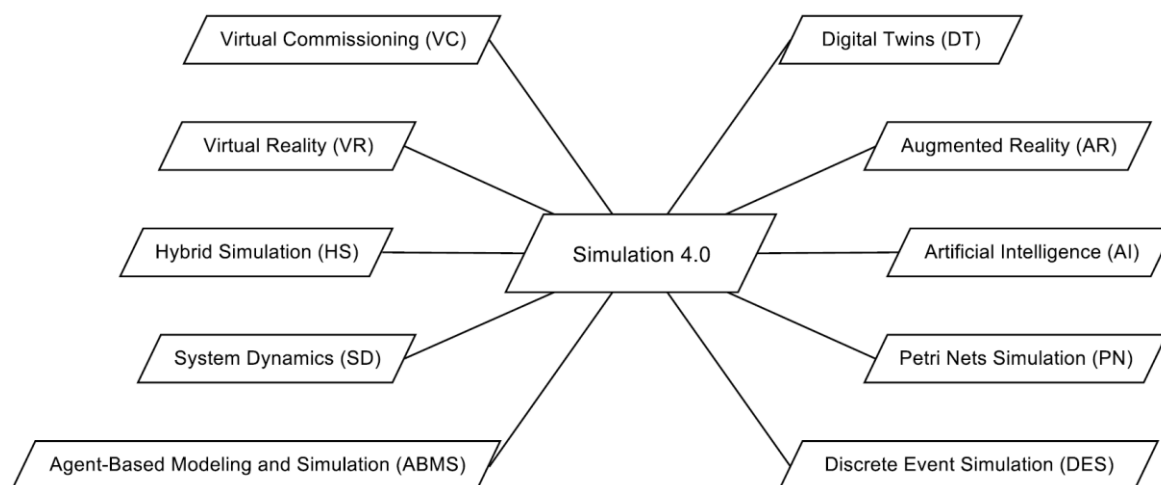
O avanço exponencial no poder de computação levou ao uso generalizado de ferramentas de simulação na indústria para melhorar o projeto e a operação do sistema fabril. Dessa forma, na indústria do futuro um aspecto fundamental é a capacidade de transformar os conceitos básicos de fábrica inteligente em realidade, graças a uma representação precisa e dinâmica de uma linha de produção por meio da simulação (Xu *et al.*, 2016).

A simulação computacional é uma ferramenta chave da Indústria 4.0 no que tange ao desenvolvimento de modelos para planejamento e otimização da tomada de decisão em projetos e operações de sistemas de manufatura complexos (De Paula Ferreira; Armellini; De Santa-Eulalia, 2020; Santos *et al.*, 2022; Rodič, 2017). A utilização da simulação tem se disseminado a vários setores, compreendendo áreas como hospitalar, militar, serviços e logística. No entanto, Negahban e Smith (2014) ressaltam que a maior aplicação da ferramenta tem sido observada na manufatura.

Benotsmane, Kovács e Dudás (2019) reforçam ao afirmar que a otimização dos processos de produção e o aproveitamento máximo dos recursos são alcançados por meio do uso da simulação. Portanto, ao aplicá-la à estudos sobre projeto e operacionalização de sistemas de manufatura tem se tornado crescente nas pesquisas tendo em vista o avanço da informática com aumento do poder da memória dos computadores, possibilitando assim a realização de pré-projetos de sistemas de manufatura dinâmicos e complexos, cujo objetivo é compreender o comportamento do sistema e identificar ineficiências e oportunidades de melhoria nos processos de engenharia.

Na revisão sistemática de literatura realizada por De Paula Ferreira; Armellini; De Santa-Eulalia (2020), foi estudado como as principais 10 abordagens baseadas em simulação, conforme visto na Figura 2, contribui para o contexto da I-4.0. Os resultados da pesquisa apontaram que a simulação híbrida e gêmeos digitais são as principais abordagens no contexto da I-4.0 e que a simulação de eventos discretos e ferramentas de *software* como Anylogic, Plant Simulation, entre outros, apesar de ser uma técnica mais tradicional, apresentaram papel vital neste processo. Portanto, os autores inferiram que a temática nas pesquisas tende a crescer justamente pela sua relevância para a indústria.

Figura 2 - Abordagens baseadas em simulação aplicadas no contexto da Indústria 4.0



Fonte: De Paula Ferreira; Armellini; De Santa-Eulalia (2020)

A simulação de evento discreto, do inglês *Discret event system* (DES), é uma das técnicas de modelagem computacional utilizada para simular e estudar sistemas de manufaturas dinâmicas que evoluem ao longo do tempo em momentos discretos, ou seja, os eventos ocorrem em momentos específicos como por exemplo, chegada de uma peça, montagem de um produto, término de um processo de corte. Ademais, possui flexibilidade para a criação de diferentes cenários para apoiar a tomada de decisão (Negahban; Smith, 2014). Além disso é considerado um método quantitativo cujo modelo computacional contém lógicas necessárias para representar as características e comportamento real do sistema (Huerta-Torruco *et al.*, 2022).

Conforme Scheidegger *et al.* (2018), uma justificativa para a adoção da simulação reside no custo elevado associado a experimentos envolvendo o sistema real a fim de analisar o desempenho dos processos ou ainda a sua concepção em um modelo físico. Para Gilchrist (2016), o uso de simulação e modelagem não apenas ajuda os fabricantes a reduzirem o ciclo de desenvolvimento do produto e evitar erros no projeto de sistemas de manufatura e nos estágios iniciais de implantação de um novo produto com elevado custo às empresas, como também permite que seja otimizada continuamente as instalações de produção durante as operações do dia a dia.

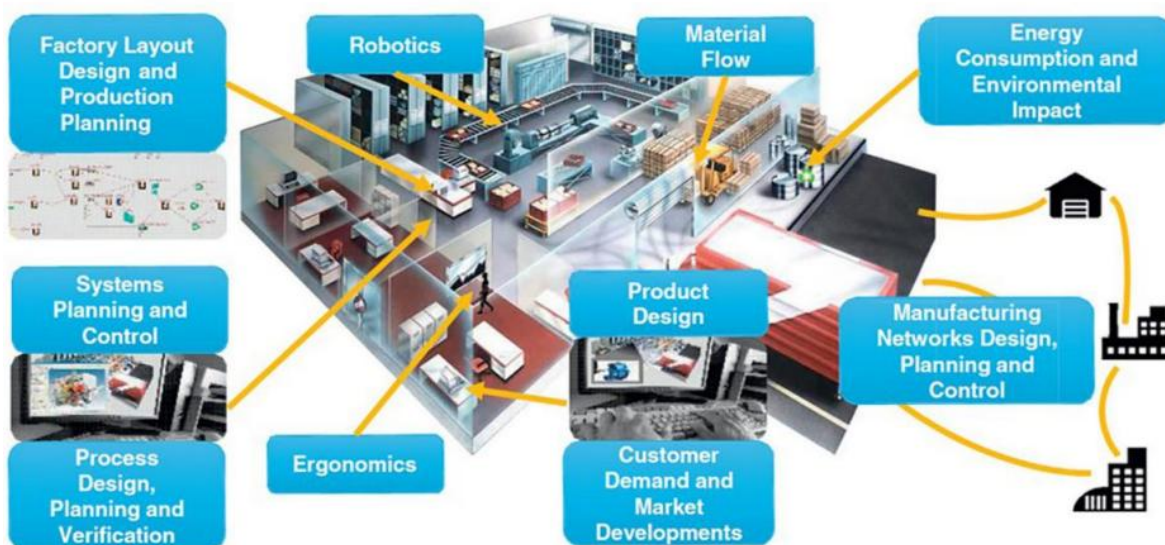
Posto isto, essa abordagem propicia uma análise detalhada do fluxo de eventos no sistema, possibilitando identificar oportunidades de economia de recursos, a identificação e resolução de pontos de gargalos e a maximização da produtividade da linha de produção (Karanjkar *et al.*, 2018).

Para Yücesan e Fowler (2000), tal como, Vieira *et al.* (2018) a simulação apresenta diversas vantagens, entre as quais destacam-se:

- Otimização de tempo: Possibilidade de simular a operação real de um sistema ao longo de vários anos, em um período significativamente menor.
- Integração de componentes: Capacidade de englobar os componentes de sistemas complexos a fim de examinar suas inter-relações de forma integral.
- Prevenção de riscos: Oportunidade de averiguar hipóteses ou perigos sem os riscos financeiros ou físicos associados à construção e análise de um sistema real.
- Escala física: Facilidade para estudar escalas em versões maiores ou menores do sistema para obter uma compreensão mais ampla do seu funcionamento.
- Repetibilidade: Viabilidade de analisar diferentes sistemas em ambientes idênticos ou analisar o mesmo sistema em diferentes cenários com o intuito de gerar resultados comparáveis e consistentes.
- Controle: Proporciona um ambiente simulado no qual todas as variáveis podem ser monitoradas e controladas com precisão, permitindo a realização de experimentos altamente controlados, bem como auxiliar na tomada de decisão.

Segundo evidenciado em seus estudos, Mourtzis; Doukas; Bernidaki (2014) aborda as áreas de domínio da simulação conforme visto na Figura 3. Essas áreas têm sido objeto de pesquisas com foco na investigação de métodos e ferramentas de simulação.

Figura 3 - Campos de estudo da pesquisa em simulação



Fonte: Mourtzis; Doukas; Bernidaki. (2014).

Contudo, ainda que a gama de aplicações da simulação seja ampla, percebe-se que a exposição a um ritmo acelerado e a um grande volume de mudanças têm uma influência direta no modo como os sistemas e processos são gerenciados. Neste cenário, é imprescindível salientar que o emprego da simulação igualmente se torna suscetível a essas alterações (Santos *et al.*, 2022).

Conforme Schluse *et al.* (2018) o DES pode ser visto como fonte de informações acerca de um processo dependendo das variáveis introduzidas no sistema, como tempo, processo, mão de obra, entre outras. O método DES pode não se comunicar diretamente com sistemas no mundo físico. Contudo, a superação dessa barreira tornou possível ao implementar a simulação de eventos discretos em conjunto com outras áreas da Indústria 4.0, como internet das coisas, realidade aumentada e gêmeos digitais. Então, essa integração do sistema de informação (SI) e simulação on-line permitiu a promoção de uma abordagem holística e conectada às operações industriais.

Enfatiza-se que alguns aspectos da DES são focados para torná-los meios capacitadores para implementação da Indústria 4.0. A primeira está relacionada com o recebimento de dados reais das máquinas e demais elementos do processo produtivo e a sua inserção também automática no modelo computacional, produzindo assim taxas crescentes de dados e resultados das simulações acuradas. O segundo aspecto é a capacidade de geração automática de modelos computacionais que se adequam rapidamente e sem esforços as mudanças das fábricas. Por fim, a habilidade de inserção do usuário em um ambiente de realidade virtual disponibilizado por muitos *softwares* de DES. (Negahban; Smith, 2014).

Desta maneira, o uso da simulação e modelagem é essencial para alavancar dados em tempo real e criar imagens espelhadas em ambientes virtuais do mundo físico. Este modelo virtual pode incluir máquinas, produtos e pessoas (Rüßmann *et al.*, 2015).

### 2.3. LOGÍSTICA 4.0

A volatilidade da demanda e curtos ciclo de vida de variados produtos forçam a implementação de flexibilidade operacional na logística. Em busca do aumento da eficiência nos ambientes de negócios motivadas pelas razões expostas anteriores, muitas tecnologias do contexto da Indústria 4.0 estão sendo desenvolvidas e/ou implementadas para adequar a cadeia de suprimento, desde a gestão de armazéns até o transporte e planejamento dos recursos logísticos. Com isso, surge um novo termo denominado logística 4.0 ou logística inteligente (Lagorio *et al.*, 2022).

Nessa conjuntura, há uma necessidade intensificada de transparência, que envolve uma visão completa da cadeia de suprimentos; de controle da integridade, assegurando que os produtos corretos sejam entregues no momento adequado, no local certo, na quantidade adequada, em boas condições e com o custo correto (Macaulay; Buckalew; Chung, 2015). Do mesmo modo, exige a capacidade de reconfiguração dinâmica das redes de abastecimento, especialmente através da revisão dos acordos de nível de serviço com fornecedores e contratados com o objetivo de alcançar cadeias de suprimentos enxutas, ágeis, resilientes e sustentáveis (Carvalho; Cruz-Machado, 2011).

Conforme apontado por Winkelhaus e Grosse (2020), considerando a premissa de que a Indústria 4.0 viabiliza a customização em massa, que engloba uma ampla variedade de produtos, surge a questão acerca da capacidade dos sistemas logísticos atuais em lidar com sistemas ainda mais complexos, como a produção de lotes unitários, sem comprometer a qualidade ou aumentar os custos.

Nesse contexto, é fundamental que o sistema logístico seja inteligente e possibilite a adaptação dinâmica e orientada às novas demandas dos clientes. Para isso, novas abordagens devem ser aderidas e três elementos-chave, descritos a seguir, contribuem para uma compreensão abrangente e coerente das definições existentes relacionadas à logística 4.0 (Winkelhaus; Grosse, 2020).

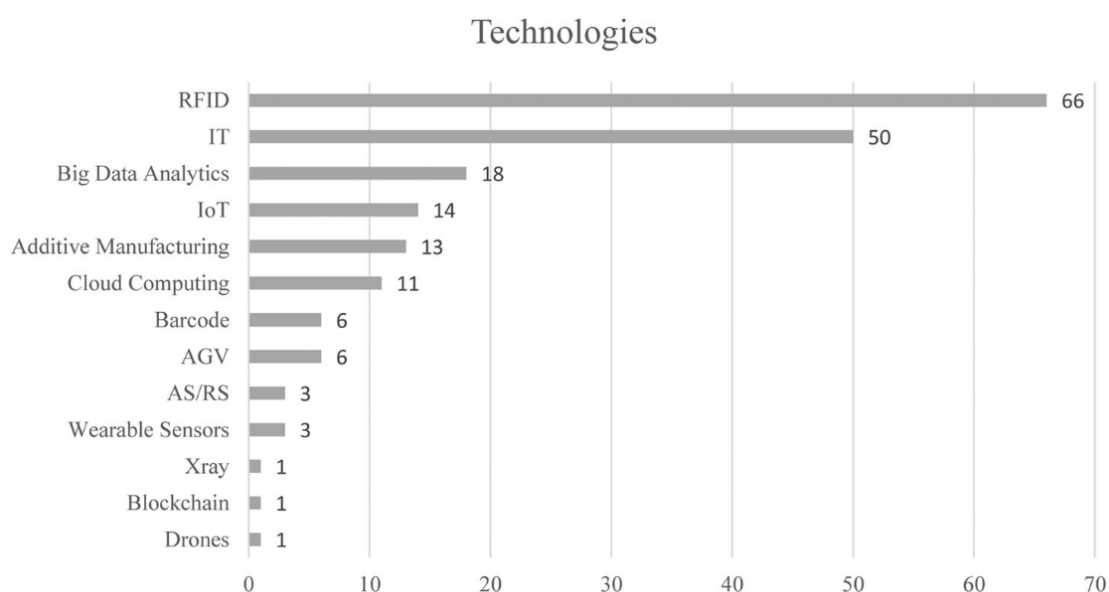
- Alteração no modelo de produção para a customização em massa;
- Introdução de novas tecnologias digitais como IoT e sistemas cyber-físicos resultando em mudanças nos processos logísticos e
- Foco nos seres humanos considerando sua importância em seus papéis como funcionários, clientes e outras partes interessada, juntamente com as mudanças no ambiente que os cercam. Oleśków-Szłapka *et al.* (2019) completa que não se trata apenas de substituir seres humanos, mas sim de otimizar e aperfeiçoar os fluxos operacionais.

Com isso em mente, Winkelhaus e Grosse (2020) estabelecem que a Logística 4.0 facilita o atendimento das necessidades individuais dos clientes sem aumentar os custos, além de apoiar no desenvolvimento da indústria e do comércio por meio do uso das tecnologias digitais. Esta visão baseia-se no princípio de que o novo sistema logístico não é um fim em si mesmo, mas uma parte vital das futuras redes de produção e comércio.

Vale ressaltar que a Logística 4.0 não se fundamenta em uma tecnologia específica (Winkelhaus; Grosse, 2020). Lagorio *et al.* (2022) levantou treze tecnologias adotadas nos

estudos de logística 4.0 pesquisados, conforme Figura 4, sendo destaque o RFID, as tecnologias da informação (TI), o *Big Data Analytics* e Internet das Coisas (IoT). Tais tecnologias objetivam criar sistemas mais transparentes de forma a compartilhar e acessar informações entre os envolvidos nos processos logísticos. Assim, desempenhará papel apoiador na tomada de decisão da organização.

Figura 4 - Tecnologia adotadas na logística 4.0



Fonte: Lagorio *et al.*, (2022)

Por intermédio de uma rede inteligente construída pelos sistemas cyber-físicos, os recursos logísticos se integram e operam com base em um banco de dados de logística inteligente (Yavas; Ozkan-Ozen, 2020). Com este foco, Glistau e Machado (2019) destacam algumas soluções típicas da Logística 4.0 firmadas nos módulos e utilitários cyber-físicos, assim como infraestrutura inteligente, como observa-se na Figura 5.

Ainda segundo Glistau e Machado (2019), a utilização de objetos inteligentes dar-se-á pelo emprego de sistemas embarcados para coleta de dados, comunicação e rede. Além de sensores, esses objetos inteligentes fazem uso de tecnologia de radiofrequência (RFID) para detectar e rastrear movimentos. Essas tecnologias proporcionam transparência em relação aos produtos logísticos e transportadoras identificadas, assim como seu comportamento. Dessa forma, essas informações formam a base de uma solução abrangente para rastreamento e controle de processos, o que leva a mudanças nos processos que envolvem objetos logísticos.

Figura 5 – Algumas soluções típicas da logística 4.0

| Smart logistical objects                                                                                            | Possibil. of autonomous driving                                                                                                                                                           | Organization of traffic by                      | New holistic software solutions                                                                                                                                                                          | New business processes                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Smart material<br>Smart product<br>Smart pallet<br>Smart box<br>Smart storage<br>Smart container<br>Smart packaging | Smart car<br>Smart van<br>Smart truck<br>Smart bus<br>Automated guided vehicle (AGV)<br>Mobile robot<br>Unmanned aerial vehicle (UAV)<br>Driverless train operation (DTO)<br>Robotic ship | Cooperative traffic control<br>Traffic platform | Holistic tracking and tracing solution<br>Automatic video control<br>Augmented reality (AR) for planning and for picking operations<br>Optimization of supply chain<br>Big data<br>Business intelligence | eProcurement platform and procurement process<br>3D printing supply chain |
| Cyber-physical modules and utilities                                                                                |                                                                                                                                                                                           | Smart infrastructure                            |                                                                                                                                                                                                          |                                                                           |

Fonte: Glistau; Coello Machado, P.38 (2019).

Para alcançar interações direcionadas dentro de uma rede global, é essencial identificar, localizar e controlar os objetos logísticos, além de registrar e interpretar seus estados (Schmidtke; Glistau; Behrendt, 2019). Diante desse cenário, há a necessidade de promover esforços científicos para acompanhar especialistas na jornada transformacional rumo aos processos logísticos da Indústria 4.0 (Hompe; Kerner, 2015).

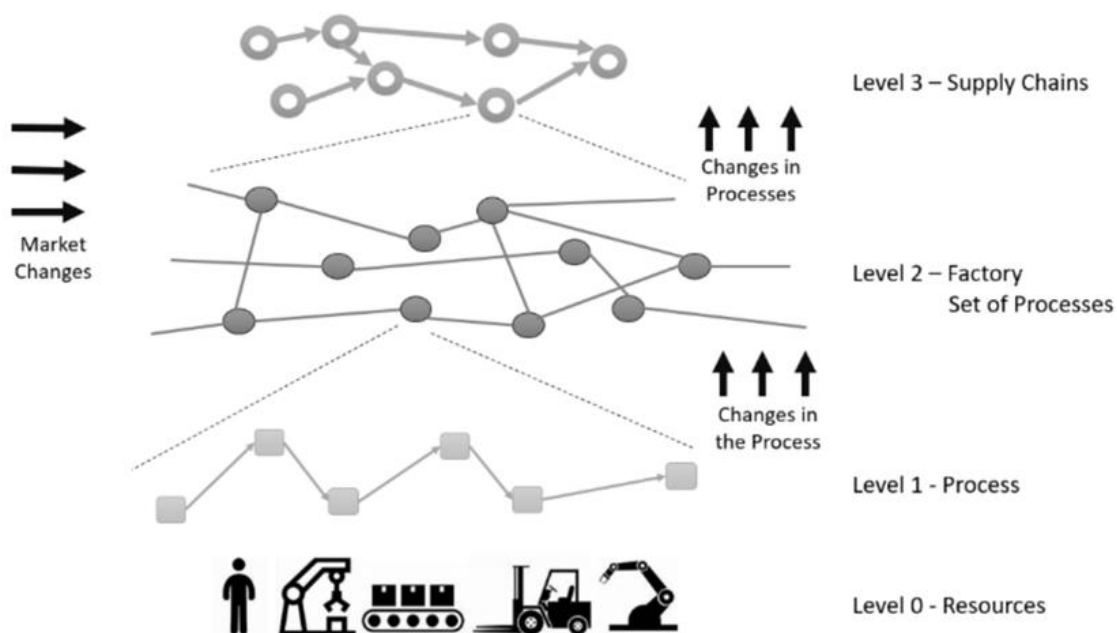
Esse novo paradigma surge como resultado do crescente uso da Internet, permitindo a comunicação em tempo real entre as máquinas e seres humanos, juntamente com a aplicação da digitalização avançada (Barreto; Amaral; Pereira, 2017). O fluxo de informação integra as complexas redes da cadeia de suprimentos globais. Com isso, a troca contínua de dados entre as partes interessadas do sistema evita erros e interrupções (Oleśków-Szłapka *et al.*, 2019).

### 2.3.1. Intralogística

Os sistemas complexos e dinâmicos não se limitam apenas às fábricas, mas também se estendem às suas cadeias de suprimento. Essa complexidade se manifesta na dinamicidade decorrente das mudanças nos mercados, que por sua vez geram alterações internas, como modificações no fluxo de materiais e introdução ou encerramento de novos produtos. Essa

interação de dinamismo e complexidade pode ser mais bem compreendida por meio da Figura 6

Figura 6 - Níveis de complexidade nas cadeias de suprimentos e fábricas e o impacto das mudanças externas e internas na dinâmica de todo o sistema



Fonte: Pawlewski; Kosacka-Olejnik; Werner-Lewandowska (2021)

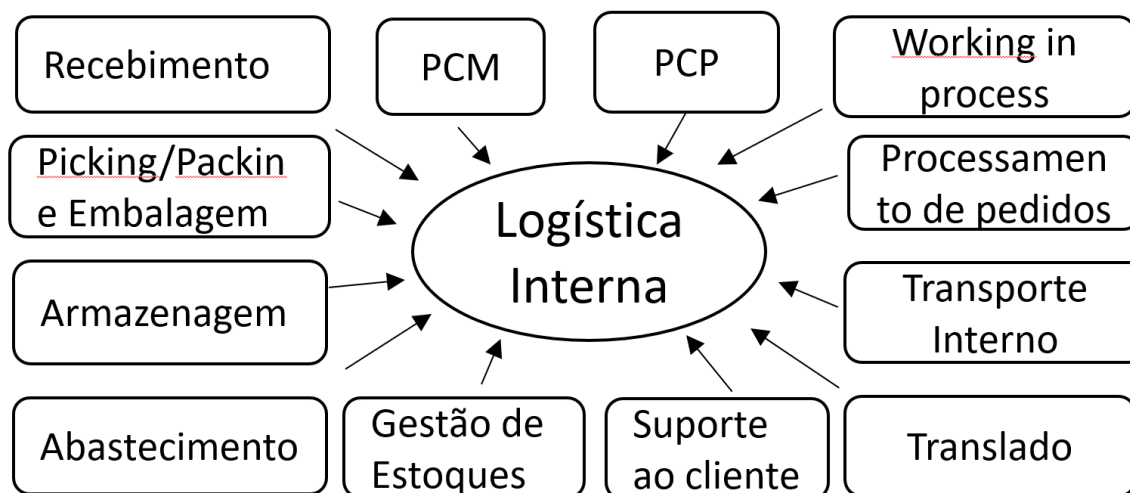
O campo de atuação da logística pode ser segmentada em diferentes categorias, como logística de aquisição (*inbound*), logística de produção ou intralogística, logística de distribuição (*outbound*), bem como logística de descarte. (Pawlewski; Kosacka-Olejnik; Werner-Lewandowska, 2021).

A intralogística ou logística interna é vista como uma área que engloba a organização, controle, implementação e otimização do fluxo interno de materiais e de informações além do manuseio de mercadorias. Desempenha, portanto, um papel fundamental em diversos setores, como indústria, varejo e instituições públicas. Nesse contexto, a intralogística engloba a implementação eficiente, o gerenciamento preciso, o monitoramento constante e a otimização contínua do manuseio de materiais e fluxos de informações, com o objetivo de promover operações mais eficientes e eficazes (Pawlewski; Kosacka-Olejnik; Werner-Lewandowska, 2021).

A partir de uma revisão de artigos e uma pesquisa realizada com 10 empresas selecionadas do polo industrial de Manaus, pertencentes ao setor de duas rodas, Pinheiro de

Lima *et al.* (2017) buscaram identificar os componentes essenciais da logística interna com base nos critérios estabelecidos pelos gerentes e diretores dessas empresas. Alguns componentes estabelecidos foram recebimento de matéria-prima, *picking*, *packing* e embalagem, gestão de estoques, transportes internos entre outros como visto na Figura 7.

Figura 7 – Partes componentes da logística interna



Fonte: Pinheiro de Lima *et al.* (2017)

Na atualidade são escassas as iniciativas que propõem abordagens sistemáticas e técnicas capazes de aprimorar tanto o sistema de fabricação quanto a logística interna, tal como, considerar o dinamismo da produção e os benefícios equivalentes (Pinheiro de Lima *et al.*, 2017). Entretanto, é primordial realizar estudos aprofundados, bem como explorar melhor as contribuições da Indústria 4.0 no campo da intralogística (Zrnić *et al.*, 2021).

Os requisitos diários no campo da intralogística exigem soluções mais avançadas do que apenas o uso de códigos de barras, a título de exemplo. Assim sendo, outras soluções podem ser concebidas como veículos guiados automaticamente, aprendizado de máquina, sistemas 3D-shuttle, sistemas de identificação baseadas em câmeras, *Gridsorter* ou modelos de simulação específicos para atividades de intralogística, que busca a otimização e redução de custos dos processos como armazenamento, carga e descarga de matérias-primas e movimentação de produtos acabados pelos operadores logísticos (Winkler; Zinsmeister, 2019).

Afonso *et al.* (2021) salienta que no âmbito da logística interna é de extrema importância automatizar os processos visando promover um fluxo físico eficiente e padronizado de materiais, eliminando desperdícios nas organizações. Simultaneamente, todas

as operações logísticas, incluindo as operações de produção, devem ser sustentáveis, por meio de iniciativas como a redução do espaço ocupado nos armazéns, aprimoramento da embalagem, otimização do transporte e movimentação de materiais. Zrnić *et al.* (2021) completa que a introdução das novas tecnologias na indústria deve ser orientada a um desenvolvimento sustentável considerando os aspectos econômicos, sociais e ambientais para garantir o seu sucesso e aplicação universal.

Ainda conforme Afonso *et al.* (2021), é essencial reorganizar todos os processos, desde o recebimento da matéria-prima até a expedição ao cliente, com o objetivo de eliminar quaisquer formas de desperdício. Consequentemente, ao reduzir o desperdício também se busca diminuir a carga de trabalho dos operadores, proporcionando-lhes um ambiente de trabalho saudável e favorável (Brito *et al.*; Carvalho Alves *et al.*, 2019).

### 2.3.2. Sistema de Manuseio de Materiais

Um sistema de manuseio de materiais eficiente desempenha um papel crucial na estratégia de execução da produção de uma empresa. O manuseio de materiais pode ser visto como um artifício para reduzir os custos totais de produção, por meio do controle de fluxo de materiais mais eficiente, redução de estoques e aumento da segurança. Entretanto, uma simples redução do manuseio não é suficiente para melhoramento da organização. Logo, é necessário um controle efetivo do fluxo de materiais para que se obtenha benefícios, visando assim um processo mais eficiente e otimizado (Tompkins *et al.*, 2013).

Conforme Negahban e Smith (2014) há um foco em estudos relacionados ao projeto de sistemas de manuseio de materiais, dado que parte significativa do custo total de produção está diretamente relacionada a essa atividade. Fernandes e Do Carmo-Silva (2006) citam que a adoção de mecanismos adequados de produção e controle de fluxo de materiais combinada com a implementação de tecnologias emergentes, pode ter um impacto significativo no aprimoramento do desempenho e na qualidade da fabricação, bem como no atendimento aos clientes.

A simulação de eventos discretos tem se destacado como uma ferramenta potente, robusta e eficaz para resolver problemas de projeto dos sistemas de manuseio de materiais. Essa ferramenta permite avaliar o desempenho do sistema em diferentes cenários, considerando variáveis dinâmicas e interações complexas, como fluxo de materiais, tempos de processamento, entre outros (Negahban; Smith, 2014).

A simulação como ferramenta de suporte ao projeto de instalação, permite a identificação de problemas potenciais e a realização de ajustes prévios à implementação, resultando em economia de tempo e recursos. Com isso, é possível obter uma visão abrangente e detalhada das implicações de diferentes contextos e alternativas de mudanças, avaliando o desempenho do sistema de manuseio de materiais e antecipando os desafios (Bateman *et al.*, 2013).

Para Bateman *et al.* (2013), a concepção do sistema de manuseio de materiais é um elemento crucial dentro do escopo global de projetos de instalações. O arranjo físico e o manuseio de materiais estão intrinsecamente interligados, sendo raramente abordados separadamente. A integração dessas duas funções de projeto desempenha um papel especialmente vital no desenvolvimento de uma nova instalação. A simulação possibilita uma visualização precisa e realista de como diferentes configurações do sistema de manuseio de materiais afetam o arranjo físico da instalação, e vice-versa. Essa abordagem integrada assegura a otimização do projeto, considerando aspectos como eficiência operacional, fluxo de materiais, produtividade e segurança.

Em resumo, a simulação desempenha um papel fundamental na integração entre o projeto do arranjo físico e o projeto do sistema de manuseio de materiais, proporcionando uma visão abrangente e detalhada que impulsiona a eficiência e o sucesso do projeto de instalações.

## 2.4. LAYOUT

O arranjo físico, também conhecido como layout, refere-se à disposição espacial dos recursos dentro de uma instalação operacional. Leva-se em consideração a localização e disposição de máquinas, equipamentos, estoques, estações de trabalho e outros recursos, buscando otimizar o fluxo de materiais, a comunicação entre os colaboradores e a utilização adequada do espaço disponível. Um projeto de arranjo físico bem elaborado tem a capacidade de refletir e impulsionar a organização rumo aos seus objetivos desejáveis. Trata-se, portanto, de uma decisão estratégica fundamental que impacta diretamente o desempenho competitivo da empresa (Corrêa; Corrêa, 2017).

A decisão do layout é de suma importância, pois um arranjo inadequado pode resultar em padrões de fluxo excessivamente longos ou confusos, formação de filas, tempos de processamento prolongados, operações inflexíveis, fluxo imprevisível e custos elevados. Além disso, a reestruturação de uma operação existente pode acarretar interrupções, gerando insatisfação por parte dos clientes ou perdas de tempo operacional. Tendo isto em vista,

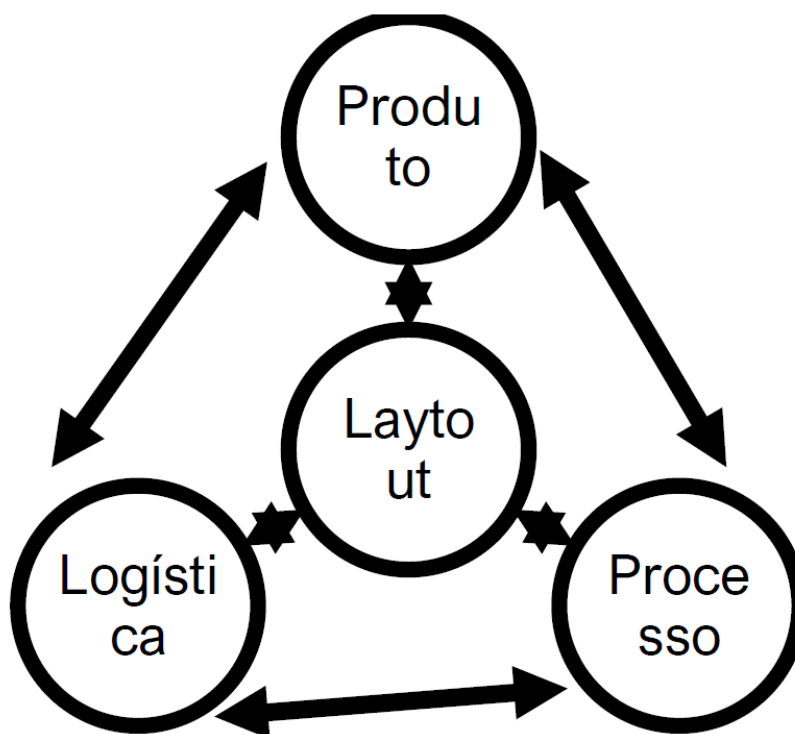
somado à complexidade e aos custos envolvidos, os gestores de operações tendem a evitar alterações frequentes no layout. Assim sendo, é fundamental realizar análises detalhadas e considerar os impactos potenciais antes de realizar quaisquer alterações significativas no layout de uma organização (Slack; Brandon-Jones; Johnston, 2013).

Os problemas relacionados ao arranjo físico possuem aspectos econômicos e científicos. Um arranjo eficiente dentro de uma indústria pode resultar em consideráveis reduções nos custos de produção. O constante investimento em novas áreas produtivas nas indústrias e demais instituições impulsiona a busca por novas abordagens para o problema de layout, exigindo um re-layout adequado, sobretudo devido ao progresso tecnológico que resulta em substituição mais frequente das máquinas e equipamentos, tornando modelos e métodos obsoletos. Em resumo, essas situações de re-layout de processos já existentes ou de modificação de arranjos em equipamentos específicos irão se tornando cada vez mais frequentes (Neumann; Scalice, 2021).

Assim, a análise e aprimoramento do layout não são apenas estratégias pontuais, mas sim uma abordagem constante para adaptar-se às mudanças do mercado e manter-se atualizado com as inovações tecnológicas. Ao investir no estudo do problema de layout, as organizações podem otimizar os processos produtivos, maximizar a utilização de recursos e garantir uma posição competitiva no mercado, ao mesmo tempo em que reduzem seus custos operacionais (Neumann; Scalice, 2021).

O produto, processo e *layout* estão ligados e dependentes um do outro. O layout apresenta-se como peça-chave para representar a disposição física dos equipamentos de forma visual e com base em suas funções, engloba o arranjo físico dentro de uma instalação existente ou planejada dos departamentos, estações de trabalho, máquinas, equipamentos, materiais e áreas comuns. E a intralogística exerce um papel essencial para a criação de um sistema harmônico entre os elementos. Em suma, e conforme visto na Figura 8, a interação dos elementos processo, produto, logística e *layouts* é de interdependência sendo este último o ponto central da estrutura (Pawlewski, 2019).

Figura 8 - Interação entre processo, produto, logística e layouts



Fonte: Pawlewski (2019), adaptado

Pawlewski, Kosacka-Olejnuk e Werner-Lewandowska (2021) evidenciam que qualquer remodelamento necessário no produto, tendo como exemplo uma alteração em seu design, interfere diretamente na configuração do processo e isso pode ocasionar mudanças na tecnologia utilizada pela organização. Sendo assim, a inserção de um novo produto requer a concepção de um novo processo, além disto, sua implementação resulta em ajustes no layout, bem como nas operações intralogísticas de manuseio de materiais. Essas mudanças são interdependentes e exigem uma abordagem integrada para garantir o equilíbrio e o desempenho adequado de todo o sistema.

O projeto de layout de fábrica é uma tarefa complexa e multidisciplinar, que requer um alto nível de conhecimento e desempenha um papel vital na sobrevivência dos fabricantes em um ambiente empresarial moderno e altamente competitivo a nível global. É por meio de um layout bem projetado que as empresas conseguem otimizar suas operações, melhorar a eficiência produtiva e atender às demandas do mercado de forma ágil e eficaz (Shariatzadeh; Sivard; Chen, 2012). Por isso, é necessário levar em consideração os critérios essenciais de decisão e as restrições fundamentais relacionadas ao projeto e desempenho do layout (Ver Quadro 2).

Quadro 2 – Critérios de decisão

| <b>Critério de decisão</b>                                                                                                                                                                                                                                                                            | <b>Restrições</b>                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimizações custos de manuseio de materiais</li> <li>• Minimização da distância percorrida pelos clientes;</li> <li>• Minimização da distância percorrida pelos empregados;</li> <li>• Maximização da proximidade de departamentos relacionados.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitação de espaço;</li> <li>• Necessidade de manter localização fixas para certos departamentos;</li> <li>• Normas de segurança;</li> <li>• Regulamentos relativos a incêndio.</li> </ul> |

Fonte: Neumann; Scalice (2021), p. 221.

Diante disso, a geração de *layouts* bem-sucedidos é uma questão importante ao adquirir um novo significado frente aos avanços das tecnologias da informação. E há razões para acreditar que o arranjo fabril se tornará um dos campos mais promissores no futuro para melhorar a produtividade nos sistemas hiper conectados (Alpala *et al.*, 2018).

Segundo Corrêa e Corrêa (2017), no contexto dos arranjos físicos, identificam-se três tipos principais que possuem características distintas, cada um deles possuindo potenciais específicos para contribuir e até mesmo impulsionar diferentes critérios de desempenho. Esses são conhecidos como os arranjos clássicos: layout por processo; layout por produto; layout posicional.

Ainda conforme os autores, esses arranjos clássicos possuem características específicas que, em certa medida, entram em conflito umas com as outras. Além disso, também existem outros tipos de arranjo físico, chamados de híbridos, que buscam combinar características de dois ou mais arranjos básicos. Entre eles, o arranjo celular é o mais comumente utilizado.

Ao considerar essas diferentes abordagens de arranjo físico, as empresas têm a oportunidade de escolher e adaptar a configuração mais adequada às suas necessidades, levando em conta os objetivos estratégicos, os produtos fabricados e os recursos disponíveis. Cada arranjo físico oferece vantagens e desafios específicos, e a seleção adequada pode contribuir significativamente para o desempenho global da organização, descritos de acordo com o Quadro 1.

Quadro 1 - Objetivos e aplicações dos tipos clássicos de layout

| <b>Layout</b>                                       | <b>Objetivos</b>                                                                                                                                                                                                             | <b>Aplicações</b>                                                                         |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Posicional</b><br>(fixo ou <i>Project shop</i> ) | Otimizar a localização dos centros de recursos ao redor de produtos de grande porte que têm uma sequência complexa e longa de atividades                                                                                     | Construção de edifícios, navios, ferrovias, aviões, turbinas, geradores                   |
| <b>Produto</b><br>(linha ou <i>flow shop</i> )      | Tentam maximizar a eficiência do operário agrupando as atividades de trabalho sequencial em estações (ou postos) de trabalho que fornecem uma alta utilização da mão de obra e do equipamento com um mínimo de tempo ocioso. | Linhas de montagem automóveis, computadores, indústrias de processos químicos, alimentos. |
| <b>Processo</b><br>(funcional ou <i>job shop</i> )  | Aproximar setores com maior tráfego para minimizar os custos de transporte de materiais, dimensionando e localizando os departamentos de acordo com o volume e fluxo dos produtos.                                           | Maquinário, impressos, hospitais, escolas, armazéns, bancos                               |
| <b>Celular</b>                                      | Otimizar a formação de famílias de peças e máquinas; dimensionar o número de máquinas de cada tipo em cada célula. Aumentar a flexibilidade.                                                                                 | Indústria de calçados, autopeças, mobiliário, utensílios, bancos.                         |

Fonte: Neumann; Scalice (2021) p. 233.

A compreensão das diferentes opções de arranjo físico é crucial para a tomada de decisões estratégicas em relação ao layout das instalações, permitindo o aproveitamento máximo dos recursos, a melhoria do desempenho operacional e a adaptação às necessidades do negócio. Sendo assim, o processo de desenvolvimento do layout inicia-se com uma compreensão abrangente dos objetivos que se deseja alcançar por meio dele. Contudo, essa compreensão representa apenas o ponto de partida de um processo que envolve várias etapas, culminando no estabelecimento do layout físico final da operação. Em geral, o layout busca minimizar o percurso necessário ao longo da operação, proporcionando uma clareza de fluxo ideal. Ademais, os layouts devem ser projetados de forma a garantir a utilização adequada do espaço disponível e proporcionar flexibilidade a longo prazo (Slack; Brandon-Jones; Johnston, 2013).

A simulação de eventos discretos emerge como uma valiosa ferramenta para a avaliação do layout atual, identificando áreas com potencial de melhoria e permitindo a análise de diferentes alternativas de arranjo físico. Como resultado, diversos pesquisadores têm aplicado a simulação em uma variedade de problemas relacionados ao layout de instalações (Negahban; Smith, 2014).

Através da utilização de objetos pré-definidos, torna-se possível implementar modelos de layout em três dimensões (3D), eliminando a necessidade de desenhar equipamentos e criando modelos de fábricas em realidade virtual que proporcionam ao usuário a capacidade de navegar por maquetes virtuais, percorrer os espaços, realizar inspeções e até mesmo animar o movimento dentro de um modelo de fábrica renderizado em 3D (Jamalnia; Feili, 2013).

De acordo com Baykasoğlu e Göçken (2011), outro método de grande relevância é a implementação de uma ferramenta baseada na web, capaz de gerar cronogramas de rotação de tarefas para sistemas de montagem envolvendo trabalhadores humanos. Além disso, Albey e Bilge (2011) citam que um método específico é aplicado em um caso automotivo, onde são derivadas alternativas de projeto de linha de montagem e avaliadas em relação a diversos critérios estabelecidos pelo usuário.

Dessa forma, essas abordagens demonstram o potencial da simulação de eventos discretos como uma ferramenta eficaz para aprimorar o layout de instalações industriais, proporcionando análises detalhadas, visualização imersiva e avaliação abrangente de diferentes cenários de arranjo físico (Negahban; Smith, 2014).

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. NATUREZA DA PESQUISA**

Quanto a natureza desta pesquisa, pode-se classificar como pesquisa aplicada, pois objetiva avaliar os conhecimentos gerados a partir da aplicação de técnicas de simulação computacional para resolução de problemas reais de logística interna de uma fábrica de fitas adesivas localizada na Polo Industrial de Manaus.

Esse tipo de pesquisa tem como finalidade “gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos. Envolve verdades e interesses locais.” (Matias-Pereira, 2019, p. 88).

#### **3.2. FORMA DE ABORDAGEM DO PROBLEMA**

A qualidade dos resultados alcançados pela pesquisa é o foco principal na abordagem do problema. Para isso, é essencial concentrar-se nos procedimentos adotados para obtenção, análise e interpretação dos dados (Marconi; Lakatos, 2022).

Em relação à abordagem do problema, esta pesquisa classifica-se como sendo qualitativa e quantitativa. Na abordagem qualitativa, a formulação do problema é resultado da imersão do pesquisado no contexto analisado da pesquisa. Na abordagem quantitativa, pretende-se explicar e prever os fenômenos pesquisados, buscando regularidades e relações de causa e efeito entre os elementos, caracterizado pelo uso de cálculos estatísticos como base do processo de análise de um problema (Marconi; Lakatos, 2022).

#### **3.3. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA QUANTO AOS OBJETIVOS**

Quanto aos objetivos, caracteriza-se uma pesquisa exploratória por proporcionar maior familiaridade com o problema, tornando-o explícito ou construindo hipóteses sobre ele. Descritiva por expor as características da população ou fenômeno a ser estudado que demanda técnicas padronizadas de coleta de dados. (Prodanov; Freitas, 2013).

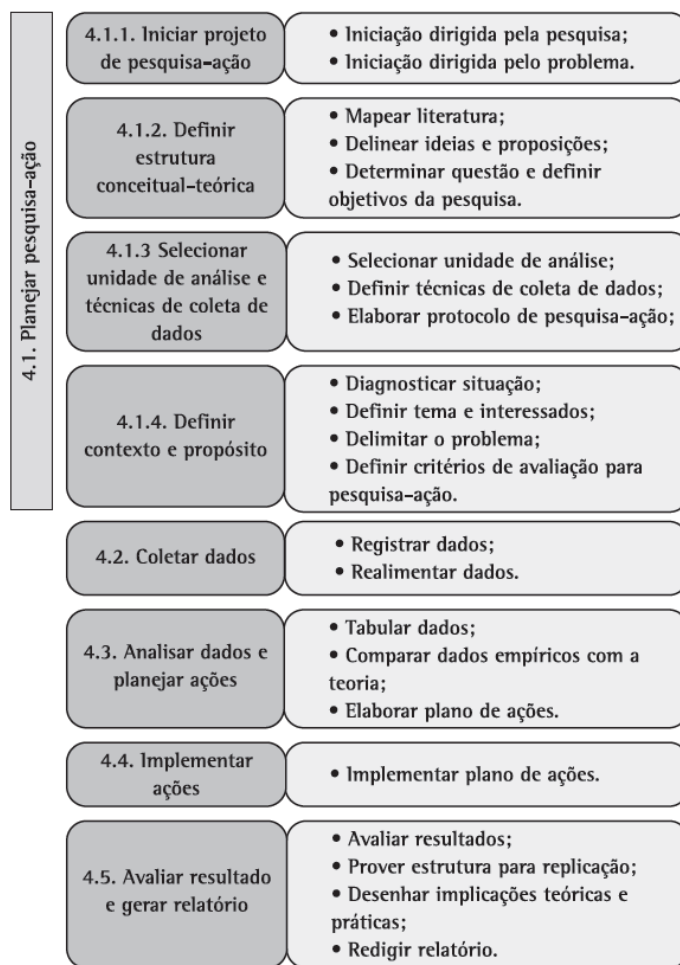
#### **3.4. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA QUANTO AOS PROCEDIMENTOS**

Quanto aos procedimentos, o presente estudo classifica-se como pesquisa-ação.

A pesquisa-ação foi o procedimento metodológico deste estudo por visar solucionar problemas práticos de logística interna no contexto de uma empresa fabricante de fitas adesivas

do polo industrial de Manaus por meio da colaboração do pesquisador e funcionários da empresa que serão participantes envolvidos na situação estudada com uma abordagem participativa, ou seja, co-pesquisadores. Foram consideradas as etapas adaptadas da pesquisa ação proposto por Gil (2002) e Mello et al., (2011), sendo este último detalhado na Figura 9.

Figura 9 -Detalhamento das fases, etapas e atividades da estrutura proposta para pesquisa-ação



Fonte: Mello *et al.*, (2011)

Planejamento da pesquisa ação: a iniciação é dirigida pelo problema, no qual a fábrica foco deste estudo, definiu um problema e o pesquisador, por meio desta pesquisa, participa das propostas para sua solução por meio do emprego do método pesquisa-ação. Neste momento as expectativas dos interessados (alta direção da empresa estudada) e escopo da participação e envolvimento que estes poderão ter no decorrer da pesquisa são alinhadas, determinando assim o campo de investigação. Para isso, foram realizadas visitas técnicas na fábrica, consulta a

documentações diversas do processo produtivo e diversas reuniões de discussão com os representantes dos envolvidos na pesquisa;

O problema foi definido com maior precisão com o foco na busca da solução do problema, neste caso ineficiência da movimentação de produtos acabados, não se restringindo a aspectos práticos, mas também com aspectos teórico-conceitual. Posteriormente, as diretrizes de pesquisa e ação foram definidas com base nos resultados da apresentação e discussão das propostas e contribuições dos participantes.

A estrutura da fundamentação teórica é uma etapa após a definição do problema cujo objetivo é contextualizá-lo e fundamentá-lo. A questão da pesquisa foi construída com recomendações para solucionar o problema ao mesmo tempo que contribui para a base do conhecimento.

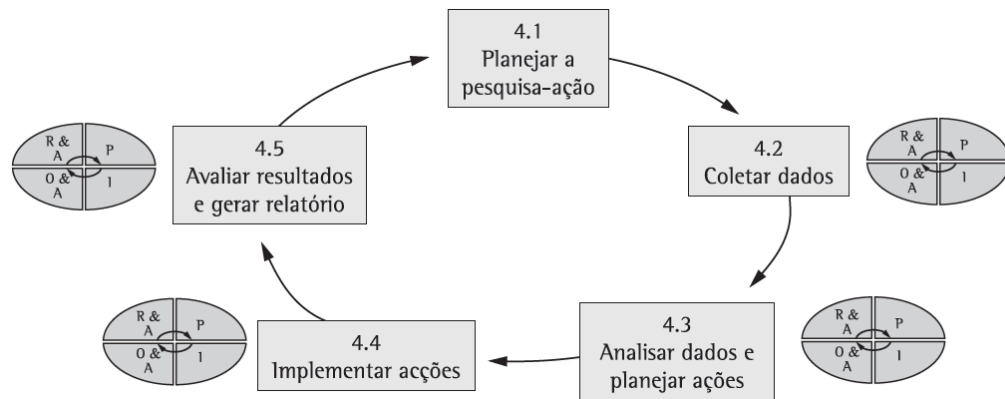
Na etapa de coleta de dados serão coletados os dados do processo produtivo, como tempos de operação e taxas de produção, e informações gerenciais relacionados para o desenvolvimento do modelo de simulação computacional com o enfoque na movimentação interna de materiais.

Também pretende-se utilizar os conceitos, métodos e metodologias do mapeamento do fluxo de valor e do sistema de manuseio de materiais este último podendo ser definido como a “ciência de mover, economizar, proteger e controlar o material por meio de seus processos de fabricação, distribuição, consumo e desperdícios” (Viteri-Viteri et al., 2021, p. 392).

Os dados coletados serão imputados no modelo de simulação criado no qual representará o cenário atual da fábrica. Pretende-se analisar o período de agosto a novembro de 2022 por se tratar do período de maior demanda. Para análise, interpretação dos dados e planejamento das ações serão adotados procedimentos de tabulação e análise estatísticas dos dados assim como discussões e interpretação dos seus resultados.

Na implementação das ações serão utilizadas as técnicas de simulação computacional, com o software Flexsim®. Cenários de melhorias e implementação das tecnologias aderentes à indústria 4.0 e um novo layout serão simulados em ambiente virtual. Os resultados desta simulação dos cenários serão avaliados e desenhados as implicações teóricas e práticas e redigidas em um capítulo dessa dissertação. A avaliação ocorrerá de modo que os principais indicadores chaves do processo serão comparados com os resultados do cenário atual e assim será possível descrever os impactos causados no processo produtivo. Este ciclo de coletar dados, implementar ação e avaliação dos resultados será contínuo conforme visto na Figura 10.

Figura 10 - Estruturação para condução da pesquisa-ação.



Fonte: Mello *et al.*, (2011) *apud* adaptado de Westbrook (1995); Coughlan, Cohlan (2002) e Thiollent (2007).

### 3.5. CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA FOCO DO ESTUDO

A empresa foco deste estudo foi fundada em 2005 e é especializada na fabricação de fitas adesivas, cuja trajetória de crescimento e consolidação no mercado nacional está fortemente associada ao desempenho de sua unidade industrial instalada no Polo Industrial de Manaus (PIM). A empresa atua no segmento de manufatura de fitas adesivas, atendendo a diferentes setores industriais e comerciais, e possui como visão estratégica tornar-se líder nacional em seu segmento, orientando suas operações para o fornecimento de produtos e serviços com padrões de qualidade compatíveis com exigências globais.

No período de realização desta pesquisa, a empresa encontrava-se em fase de expansão de sua área fabril e de reestruturação de seus processos produtivos, cenário que favoreceu a condução de estudos voltados à melhoria da logística interna. Paralelamente, a empresa já executava projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) voltados à introdução de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, conduzidos em atendimento às exigências fiscais da Superintendência da Zona Franca de Manaus (SUFRAMA), no âmbito da legislação do Processo Produtivo Básico (PPB). Destaca-se que tais projetos possuíam escopo previamente definido e independente, não sendo objeto de análise, seleção ou implementação no presente estudo, em consonância com a delimitação estabelecida para a pesquisa.

Uma das etapas da reorganização dos processos produtivos da empresa refere-se à reconfiguração do layout fabril, a qual constituiu uma ação estruturante para o rearranjo do arranjo físico da planta industrial, motivada pela necessidade de adequar a operação a um conjunto de mudanças em curso. Entre essas mudanças destacam-se a aquisição de uma nova máquina com o objetivo de ampliar a capacidade produtiva, a construção de um galpão destinado ao armazenamento de matéria-prima, o que possibilitou o aumento da área útil da

produção, bem como a instalação de uma ponte rolante para o manuseio de bobinas de fitas adesivas. Adicionalmente, o layout passou a demandar ajustes para acomodar as novas tecnologias introduzidas por meio da solução tecnológica, detalhada no tópico 4.3.1 desta dissertação. Nesse contexto, a empresa apresentou restrita abertura para a proposição de diferentes alternativas de layout, uma vez que foram impostas restrições técnicas e estratégicas definidas pela alta direção, especialmente no que se refere à minimização da movimentação das máquinas existentes. Tal diretriz teve como objetivo o reaproveitamento da infraestrutura elétrica e pneumática já instalada, ao mesmo tempo em que se buscou assegurar a flexibilidade necessária para a futura incorporação de novas tecnologias e equipamentos.

Diante desse contexto, a atuação do pesquisador, autor desta dissertação, ocorreu de forma alinhada às diretrizes e decisões previamente estabelecidas pela organização, não contemplando a proposição de um novo layout integral baseado exclusivamente em suas observações. Assim, o trabalho concentrou-se na avaliação do layout previamente definido pela empresa, com a apresentação de ajustes pontuais e sugestões de melhoria, visando à otimização do fluxo interno de materiais, à redução de deslocamentos desnecessários e ao aprimoramento da eficiência da logística interna, sempre em consonância com as restrições técnicas, operacionais e estratégicas estabelecidas. Essas propostas foram posteriormente analisadas por meio da simulação computacional, possibilitando a avaliação de seus impactos sobre o desempenho intralogístico da empresa.

### 3.6. PROCEDIMENTOS PARA A COLETA DE DADOS

A pesquisa bibliográfica foi a primeira etapa da pesquisa científica. Foi pesquisado obras e publicações científicas que versam sobre os seguintes temas centrais: Indústria 4.0, logística e intralogística, simulação computacional e layout fabril. Dentro desses temas, a pesquisa se concentrará nas aplicações da Indústria 4.0 nestas áreas de conhecimento e suas integrações com o objetivo de fundamentar a pesquisa e buscar aplicações de tecnologias da quarta revolução industrial em contextos semelhantes aos desta pesquisa.

Na etapa seguinte será realizada a coleta de dados para a construção do modelo conceitual do cenário atual, sendo realizada a coleta e análise de documentos do processo como ordens de produção e relatórios de embarque. Também serão realizadas visitas técnicas para realização de entrevistas com os gestores e colaboradores e observações in loco para compreensão do fluxo das atividades tanto de produção quanto de expedição da fábrica. Além de cronoanálises de atividades tanto do alimentador (funcionário responsável pelo transporte

de embalagens e produto acabado no processo produtivo) e das atividades de embarque como transporte de cargas, conferência dos paletes, carregamento da carreta e entre outras atividades inerentes.

Na terceira etapa, será feito a coleta de dados necessários para a construção de cenários de melhorias. Neste sentido serão realizados testes para coletas de dados de tempos para as novas atividades, decorrentes das novas tecnologias com requisitos da indústria 4.0 a serem propostas e implementadas.

### 3.7. PROCEDIMENTOS PARA A ANÁLISE DOS DADOS

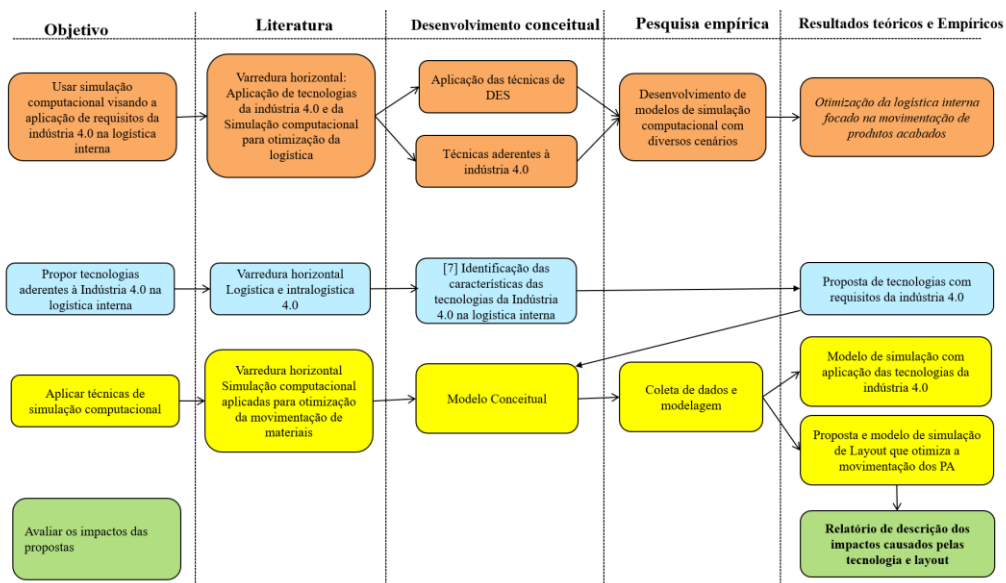
Após o levantamento e coleta dos dados, serão tratados da seguinte forma:

- Para os dados com enfoque qualitativo será utilizada a metodologia da análise de conteúdo no qual analisará os dados que descrevem e ilustram a realidade extraídos dos documentos e informações coletadas e observadas nas visitas técnicas.
- Já para os dados com enfoque quantitativo será construído planilhas com auxílio a ferramenta Excel. Será utilizada a estatística descritiva por meio de tabelas e gráficos na ferramenta Power BI e Expert Fit dentro do Software Flexsim®.

### 3.8. ETAPAS DA PESQUISA

As etapas da pesquisa são demonstradas no modelo de fases apresentado na Figura 11.

Figura 11: Modelos de fase da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

## 4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir será apresentado o impacto da implementação de tecnologias da Indústria 4.0, como RFID e IoT, bem como as etapas para a modelagem e simulação computacional da logística interna compreendendo o transporte, movimentação, armazenamento e expedição de paletes de produto acabado.

Considerando que a solução visa otimizar os processos físicos na área da logística interna da empresa, de forma a identificar, movimentar, rastrear, acondicionar e monitorar as diversas cargas de produto acabado, nesta sessão serão apresentados e discutidos os impactos das possíveis mudanças nos processos logísticos da fábrica. Para isso, quatro grandes cenários foram simulados:

- Cenário 0: Cenário atual da fábrica, base para os demais cenários;
- Cenário 1: Cenário com inclusão do setor de embalagem para unitização de carga;
- Cenário 2: Cenário com a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 e a unitização de carga;
- Cenário 3: Cenário 2 com uma proposta de novo layout e definição de parâmetros operacionais levando em consideração estudos de pesquisa operacional.

Para fins de comparação, serão simulados os três turnos de trabalho da fábrica durante um período de 4 meses de produção baseados em dados históricos referentes ao período de agosto a novembro de 2022.

### 4.1. CENÁRIO 0 - ATUAL

#### 4.1.1. Modelo Conceitual e Coleta de dados

A empresa atua em um sistema de produção denominado *Make to Order* (MTO), ou seja, produção sob encomenda, nessa conjuntura possui um estoque mínimo e com rápida movimentação. Após o envio do pedido de compra pelo cliente, é elaborada uma ordem de produção (OP) que contém informações sobre o produto e os insumos a serem alocados para a fase de produção. Em seguida a área de Planejamento e Controle da Produção (PCP) planeja a produção das fitas conforme a disponibilidade das máquinas.

Após a produção da fita nas células produtivas, ela é embalada em caixas de papelão que são empilhadas em paletes, vide Figura 12. Quando o palete está completo, o operador da

máquina aciona visualmente o operador chamado de alimentador para coletar o palete de produto acabado (PA) e transportá-lo até uma das áreas de armazenamento na fábrica.

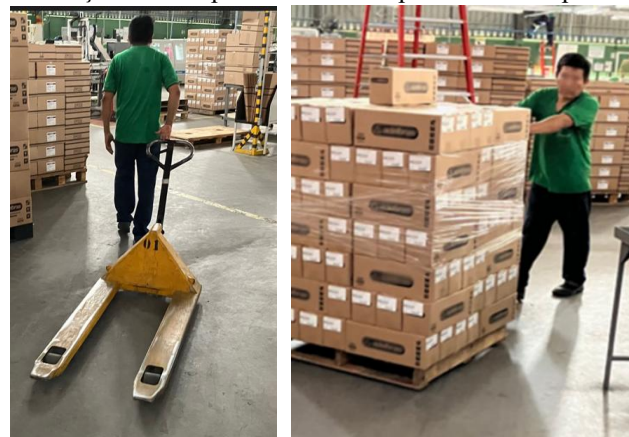
Figura 12 - Ilustração de empilhamento das caixas em paletes no setor de produção



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O transporte interno é realizado por meio de uma transpaleteira hidráulica-manual (matrim) e as cargas podem chegar a pesar até 1.100 kg, fator de risco para a saúde e segurança ocupacional do colaborador (Ver Figura 13).

Figura 13 - Ilustração do transporte interno dos paletes com os produtos acabados



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

No contexto atual, o alimentador possui duas principais funções: alimentar postos de trabalho com embalagens (caixas, arruelas e filmes) e transportar paletes com produto acabado. Para o transporte de produto acabado, o alimentador segue uma rota de deslocamento no chão de fábrica. Se houver um palete de PA durante a execução dessa rota, ele será transportado para uma das áreas de armazenamento da fábrica (estoques). Posteriormente, o operador faz o apontamento do palete de PA manualmente em uma planilha impressa e, por fim, realimenta o

respectivo posto com o palete vazio. Após esse processo, ele volta a seguir sua rota programada, fazendo isso repetidas vezes de 15 em 15 minutos.

Uma vez que o palete se encontra em uma área de armazenamento (Ver Figura 14), o gestor da produção se incumba de verificar, de tempos em tempos, se possuem paletes armazenados suficientemente para iniciar o processo de expedição do produto ao cliente.

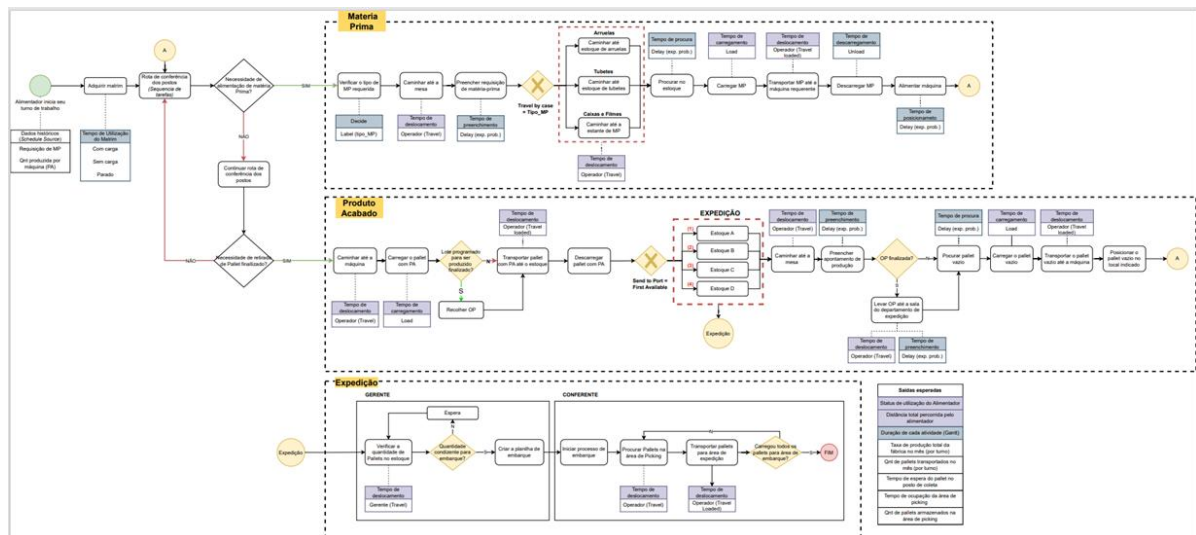
Figura 14 - Ilustração do transporte interno dos paletes com os produtos acabados



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

As informações descritas anteriormente culminaram no modelo conceitual do cenário atual conforme visto na Figura 15.

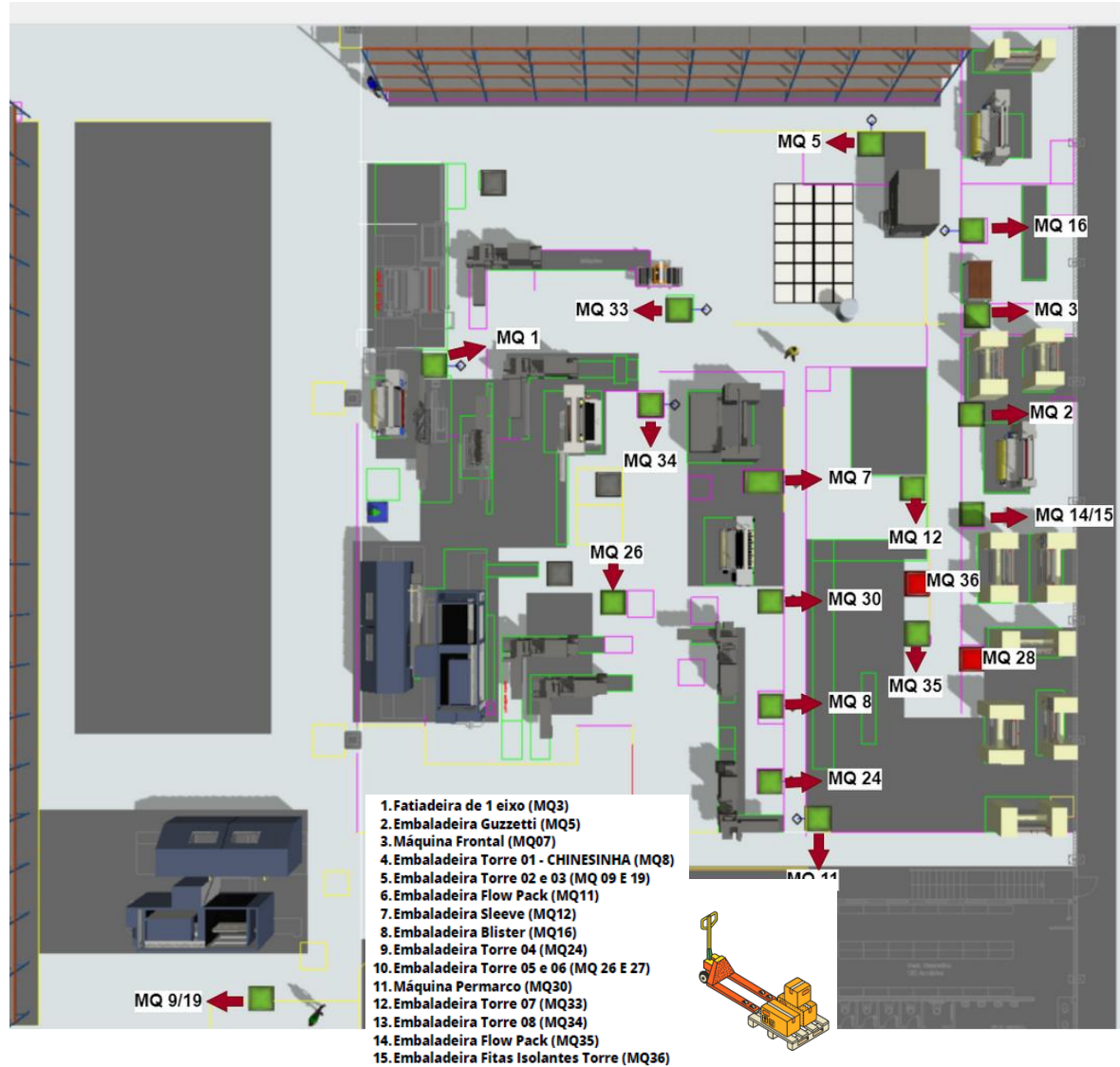
Figura 15 - Modelo Conceitual do cenário atual



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 16 ilustra o *layout* atual da fábrica considerando o transporte interno de paletes de produtos acabados e a área reservada para armazenamento. Atualmente a empresa conta com cerca de 15 pontos de coleta de paletes e 4 pontos de armazenamento de Produto Acabado.

Figura 16 – Layout com indicação do posicionamento das máquinas e lista dos postos onde serão implementados os Totens de chamada



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 17 - Imagens dos postos onde serão implementados os Totens de chamada



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Finalizada a elaboração do modelo conceitual e identificação dos dados de entrada necessários para elaboração do modelo de simulação computacional, iniciou-se a etapa de coleta de dados. Para isso, realizou-se diversas visitas técnicas e levantamento de documentações do processo produtivo da empresa a fim de embasar a construção do modelo computacional.

A quantidade de paletes produzidos no período deste estudo foram retirados das ordens de produção. Essas planilhas forneceram informações sobre a quantidade produzida por dia e/ou por turno, o tipo de produto, as máquinas utilizadas e a quantidade de paletes finalizados bem como a data, o tipo de caixa e o total de caixas embarcadas (Ver Figura 18).

Outros dados, como tempo das atividades realizadas pelo alimentador e conferente de embarque, foram extraídos das filmagens realizadas na fábrica.

A análise e levantamento destes dados foi suportada por atividades de associação, classificação e agregação dos documentos de acordo com sua natureza, de forma a discriminar a quantidade de caixas/paletes produzidos, visto que cada setor da empresa registra os dados de

modo distinto, e não há um agrupamento de informações dos departamentos no sistema, ou seja, os dados estão dispersos.

Figura 18 - Tabulação dos dados de Produto Acabado para inclusão no Modelo Computacional

| Start      | End        | Qnt | Nam | Mq                 | Tipo Pal | Mq_Pallet                 | Type |
|------------|------------|-----|-----|--------------------|----------|---------------------------|------|
| 06:00:00   | 14:00:00   | 6   |     | Model.find("MQ9")  | P        | Model.find("Pallet_MQ9")  | 1    |
| 06:00:00   | 14:00:00   | 7   |     | Model.find("MQ11") | P        | Model.find("Pallet_MQ11") | 1    |
| 06:00:00   | 14:00:00   | 2   |     | Model.find("MQ30") | P        | Model.find("Pallet_MQ30") | 1    |
| 06:00:00   | 14:00:00   | 2   |     | Model.find("MQ33") | P        | Model.find("Pallet_MQ33") | 1    |
| 14:00:00   | 22:00:00   | 3   |     | Model.find("MQ9")  | P        | Model.find("Pallet_MQ9")  | 1    |
| 14:00:00   | 22:00:00   | 9   |     | Model.find("MQ11") | P        | Model.find("Pallet_MQ11") | 1    |
| 14:00:00   | 22:00:00   | 2   |     | Model.find("MQ30") | P        | Model.find("Pallet_MQ30") | 1    |
| 14:00:00   | 22:00:00   | 6   |     | Model.find("MQ33") | P        | Model.find("Pallet_MQ33") | 1    |
| 1:06:00:00 | 1:14:00:00 | 14  |     | Model.find("MQ9")  | P        | Model.find("Pallet_MQ9")  | 1    |
| 1:06:00:00 | 1:14:00:00 | 4   |     | Model.find("MQ11") | P        | Model.find("Pallet_MQ11") | 1    |
| 1:06:00:00 | 1:14:00:00 | 3   |     | Model.find("MQ12") | P        | Model.find("Pallet_MQ12") | 1    |
| 1:06:00:00 | 1:14:00:00 | 2   |     | Model.find("MQ30") | P        | Model.find("Pallet_MQ30") | 1    |
| 1:06:00:00 | 1:14:00:00 | 4   |     | Model.find("MQ33") | P        | Model.find("Pallet_MQ33") | 1    |
| 1:14:00:00 | 1:22:00:00 | 2   |     | Model.find("MQ5")  | P        | Model.find("Pallet_MQ5")  | 1    |
| 1:14:00:00 | 1:22:00:00 | 10  |     | Model.find("MQ9")  | P        | Model.find("Pallet_MQ9")  | 1    |
| 1:14:00:00 | 1:22:00:00 | 4   |     | Model.find("MQ12") | P        | Model.find("Pallet_MQ12") | 1    |
| 1:14:00:00 | 1:22:00:00 | 2   |     | Model.find("MQ30") | P        | Model.find("Pallet_MQ30") | 1    |
| 1:14:00:00 | 1:22:00:00 | 5   |     | Model.find("MQ33") | P        | Model.find("Pallet_MQ33") | 1    |
| 1:14:00:00 | 1:22:00:00 | 2   |     | Model.find("MQ34") | P        | Model.find("Pallet_MQ34") | 1    |
| 2:06:00:00 | 2:14:00:00 | 6   |     | Model.find("MQ9")  | P        | Model.find("Pallet_MQ9")  | 1    |
| 2:06:00:00 | 2:14:00:00 | 4   |     | Model.find("MQ11") | P        | Model.find("Pallet_MQ11") | 1    |
| 2:06:00:00 | 2:14:00:00 | 5   |     | Model.find("MQ12") | P        | Model.find("Pallet_MQ12") | 1    |
| 2:06:00:00 | 2:14:00:00 | 2   |     | Model.find("MQ30") | P        | Model.find("Pallet_MQ30") | 1    |
| 2:06:00:00 | 2:14:00:00 | 4   |     | Model.find("MQ33") | P        | Model.find("Pallet_MQ33") | 1    |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

No caso das embalagens realizou-se a estimativa de quantidades considerando os dados coletados no mês que ocorreram as visitas técnicas na fábrica, tendo em vista que não possuem o histórico dos apontamentos do uso de embalagens dos meses anteriores.

Para as caixas, considerou-se as quantidades de pacotes utilizados, conforme o levantamento das ordens de produção (OP). E para estimar a quantidade de viagens, entendeu-se que a transpaleteira manual utilizado suporta até 8 pacotes. Tais dados foram formatados em planilha de Excel conforme visto na

Figura 19.

Para simular a criação das arruelas (embalagem), utilizou-se uma constante de 5 itens por turno trabalhado com base nas observações e informações coletadas com o operador Alimentador pois não havia históricos em documentos (Ver Figura 20). As quantidades a serem transportadas são destinadas às máquinas 9 e 21, pois são as que utilizam este material no processo produtivo.

Figura 19 - Tabulação das Embalagens – Caixa para inclusão no modelo computacional

| Start      | End        | Qnt de pacotes de Cxs | Qnt Viagens | Mq |
|------------|------------|-----------------------|-------------|----|
| 06:00:00   | 14:00:00   | 4                     | 1           | 9  |
| 06:00:00   | 14:00:00   | 15                    | 2           | 11 |
| 06:00:00   | 14:00:00   | 2                     | 1           | 30 |
| 06:00:00   | 14:00:00   | 1                     | 1           | 33 |
| 14:00:00   | 22:00:00   | 2                     | 1           | 9  |
| 14:00:00   | 22:00:00   | 18                    | 2           | 11 |
| 14:00:00   | 22:00:00   | 1                     | 1           | 30 |
| 14:00:00   | 22:00:00   | 3                     | 1           | 33 |
| 1:06:00:00 | 1:14:00:00 | 10                    | 2           | 9  |
| 1:06:00:00 | 1:14:00:00 | 10                    | 2           | 11 |
| 1:06:00:00 | 1:14:00:00 | 7                     | 1           | 12 |
| 1:06:00:00 | 1:14:00:00 | 3                     | 1           | 30 |
| 1:06:00:00 | 1:14:00:00 | 2                     | 1           | 33 |
| 1:14:00:00 | 1:22:00:00 | 0                     | 0           | 5  |
| 1:14:00:00 | 1:22:00:00 | 6                     | 1           | 9  |
| 1:14:00:00 | 1:22:00:00 | 10                    | 2           | 12 |
| 1:14:00:00 | 1:22:00:00 | 2                     | 1           | 30 |
| 1:14:00:00 | 1:22:00:00 | 3                     | 1           | 33 |
| 2:06:00:00 | 2:14:00:00 | 1                     | 1           | 34 |
| 2:06:00:00 | 2:14:00:00 | 4                     | 1           | 9  |
| 2:06:00:00 | 2:14:00:00 | 7                     | 1           | 11 |
| 2:06:00:00 | 2:14:00:00 | 11                    | 2           | 12 |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 20 - Tabulação das Embalagens – Arruelas para inclusão no modelo computacional

| ARRUELA |            |            |     |         |                    |
|---------|------------|------------|-----|---------|--------------------|
|         | Start      | End        | Qty | Tipo_MP | MQ                 |
| Segunda | 06:00:00   | 14:00:00   | 2   | ARRUELA | Model.find("MP10") |
|         | 06:00:00   | 14:00:00   | 3   | ARRUELA | Model.find("MP21") |
|         | 14:00:00   | 22:00:00   | 3   | ARRUELA | Model.find("MP10") |
|         | 14:00:00   | 22:00:00   | 2   | ARRUELA | Model.find("MP21") |
|         | 22:00:00   | 1:06:00:00 | 2   | ARRUELA | Model.find("MP10") |
|         | 22:00:00   | 1:06:00:00 | 3   | ARRUELA | Model.find("MP21") |
| Terça   | 1:06:00:00 | 1:14:00:00 | 2   | ARRUELA | Model.find("MP10") |
|         | 1:06:00:00 | 1:14:00:00 | 3   | ARRUELA | Model.find("MP21") |
|         | 1:14:00:00 | 1:22:00:00 | 3   | ARRUELA | Model.find("MP10") |
|         | 1:14:00:00 | 1:22:00:00 | 2   | ARRUELA | Model.find("MP21") |
|         | 1:22:00:00 | 2:06:00:00 | 2   | ARRUELA | Model.find("MP10") |
|         | 1:22:00:00 | 2:06:00:00 | 3   | ARRUELA | Model.find("MP21") |
| Quarta  | 2:06:00:00 | 2:14:00:00 | 2   | ARRUELA | Model.find("MP10") |
|         | 2:06:00:00 | 2:14:00:00 | 3   | ARRUELA | Model.find("MP21") |
|         | 2:14:00:00 | 2:22:00:00 | 3   | ARRUELA | Model.find("MP10") |
|         | 2:14:00:00 | 2:22:00:00 | 2   | ARRUELA | Model.find("MP21") |
|         | 2:22:00:00 | 3:06:00:00 | 2   | ARRUELA | Model.find("MP10") |
|         | 2:22:00:00 | 3:06:00:00 | 3   | ARRUELA | Model.find("MP21") |
| Quinta  | 3:06:00:00 | 3:14:00:00 | 2   | ARRUELA | Model.find("MP10") |
|         | 3:06:00:00 | 3:14:00:00 | 3   | ARRUELA | Model.find("MP21") |
|         | 3:14:00:00 | 3:22:00:00 | 3   | ARRUELA | Model.find("MP10") |
|         | 3:14:00:00 | 3:22:00:00 | 2   | ARRUELA | Model.find("MP21") |
|         | 3:22:00:00 | 4:06:00:00 | 2   | ARRUELA | Model.find("MP10") |
|         | 3:22:00:00 | 4:06:00:00 | 3   | ARRUELA | Model.find("MP21") |
| Sexta   | 4:06:00:00 | 4:14:00:00 | 2   | ARRUELA | Model.find("MP10") |
|         | 4:06:00:00 | 4:14:00:00 | 3   | ARRUELA | Model.find("MP21") |
|         | 4:14:00:00 | 4:22:00:00 | 3   | ARRUELA | Model.find("MP10") |
|         | 4:14:00:00 | 4:22:00:00 | 2   | ARRUELA | Model.find("MP21") |
|         | 4:22:00:00 | 5:06:00:00 | 2   | ARRUELA | Model.find("MP10") |
|         | 4:22:00:00 | 5:06:00:00 | 3   | ARRUELA | Model.find("MP21") |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na sequência, procedeu-se à tabulação dos dados relativos aos filmes (embalagem), levando em conta o histórico de registros coletados in loco para o mês de outubro pois os demais meses a empresa já havia descartados os documentos de apontamento. Em outubro foram realizadas 502 viagens para transportar filme, e 1923 viagens para transportar paletes com produto acabado da produção. A proporção entre essas viagens é de aproximadamente 26%. Também foi observado que 41% das viagens ocorreram no primeiro turno, 36% no segundo e 23% no terceiro turno.

Para os meses restantes, adotou-se uma abordagem proporcional com base na relação "filmes / produtos acabados" (26%) observada em outubro. Dessa maneira, calculou-se uma média diária de filmes distribuídos, alinhada com a produção dos diferentes turnos, exibido na Tabela 2.

Tabela 1 - Indicadores mensais de transporte de filmes

| Período  | Viagens no mês (PA) | Viagens no mês (Filme) | Dias trabalhados | Viagens no dia (Filmes) |
|----------|---------------------|------------------------|------------------|-------------------------|
| Agosto   | 1274                | 332                    | 27               | 12                      |
| Setembro | 1483                | 387                    | 26               | 15                      |
| Outubro  | 1923                | 502                    | 26               | 19                      |
| Novembro | 1916                | 500                    | 26               | 19                      |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 - Média diária de alimentação de filme por turno

| Turno        | Proporção   | Alimentação diária (Filme) |           |           |           |
|--------------|-------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|
|              |             | Ago                        | Set       | Out       | Nov       |
| 1º Turno     | 41,00%      | 5                          | 6         | 8         | 8         |
| 2º Turno     | 36,00%      | 4                          | 5         | 7         | 7         |
| 3º Turno     | 23,00%      | 3                          | 4         | 4         | 4         |
| <b>Total</b> | <b>100%</b> | <b>12</b>                  | <b>15</b> | <b>19</b> | <b>19</b> |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Posteriormente realizou-se a tabulação dos registros de embarque (Figura 21), considerando data, tipo de caixa e o total de caixas embarcadas. Tais dados foram primordiais para estimar o número de paletes embarcados por dia, considerando o total de caixas que cabem em cada paleta.

Figura 21 - Tabulação dos dados de Embarque

|   | A       | B      | C          | D  | E      | F       | G      | H                        | I           |
|---|---------|--------|------------|----|--------|---------|--------|--------------------------|-------------|
|   | Planilh | Data   | CÓDIGO     | CX | CX COI | TOT. CX | Pallet | Qty de Palets embarcados | Arredondado |
| 1 | 1       | 01/set | 3601080019 | R  | 120    | 128     | 35     | 3.66                     | 4           |
| 1 | 1       | 01/set | 3613080001 | Q  | 72     | 114     | 50     | 2.28                     | 3           |
| 1 | 1       | 01/set | 3613080005 | W  | 24     | 282     | 180    | 1.57                     | 2           |
| 1 | 1       | 01/set | 3601080030 | R  | 120    | 1127    | 35     | 32.20                    | 33          |
| 1 | 1       | 01/set | 3613080004 | Q  | 48     | 192     | 50     | 3.84                     | 4           |
| 1 | 1       | 01/set | 3613080006 | W  | 20     | 208     | 180    | 1.16                     | 2           |
| 1 | 1       | 01/set | 3601080033 | A  | 240    | 149     | 50     | 2.98                     | 3           |
| 1 | 1       | 01/set | 3601080008 | A  | 240    | 50      | 50     | 1.00                     | 1           |
| 1 | 1       | 01/set | 3611080011 | w  | 60     | 202     | 180    | 1.12                     | 2           |
| 1 | 1       | 01/set | 3607080017 | W  | 15     | 3       | 180    | 0.02                     | 1           |
| 2 | 1       | 01/set | 3608080009 | W  | 15     | 1       | 180    | 0.01                     | 1           |
| 3 | 1       | 01/set | 3607080029 | W  | 15     | 3       | 180    | 0.02                     | 1           |
| 4 | 1       | 01/set | 3607080014 | W  | 9      | 2       | 180    | 0.01                     | 1           |
| 5 | 1       | 01/set | 3611080006 | w  | 60     | 610     | 180    | 3.39                     | 4           |
| 5 | 1       | 01/set | 3618080020 | C  | 20     | 61      | 120    | 0.51                     | 1           |
| 7 | 2       | 01/set | 3601080047 | D2 | 60     | 396     | 50     | 7.92                     | 8           |
| 3 | 2       | 01/set | 3604080002 | 10 | 1      | 200     | 80     | 2.50                     | 3           |
| 3 | 2       | 01/set | 3601080875 | D2 | 60     | 3       | 50     | 0.06                     | 1           |
| 2 | 2       | 01/set | 3601080876 | A2 | 45     | 3       | 50     | 0.06                     | 1           |
| 1 | 2       | 01/set | 3601080875 | D2 | 60     | 2       | 50     | 0.04                     | 1           |
| 2 | 2       | 01/set | 3601080049 | E2 | 120    | 35      | 35     | 1.00                     | 1           |
| 3 | 3       | 03/set | 3601080582 | 9  | 100    | 10      | 50     | 0.20                     | 1           |
| 4 | 3       | 03/set | 3601080504 | 14 | 72     | 51      | 40     | 1.28                     | 2           |
| 5 | 3       | 03/set | 3601080580 | 7  | 100    | 10      | 50     | 0.20                     | 1           |
| 5 | 3       | 03/set | 3601080579 | 12 | 72     | 50      | 40     | 1.25                     | 2           |
| 7 | 3       | 03/set | 3601080836 | 4  | 6      | 11      | 45     | 0.33                     | 1           |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Contudo, constatou-se uma significativa variabilidade nos dados amostrais, o que demandou a adoção de estratégias para mitigar essa dispersão. Para tanto, a amostra — correspondente ao volume de paletes embarcados — foi categorizada em intervalos discretos, originando três classes distintas de desempenho: Devagar, Médio e Rápido. A classificação seguiu critérios quantitativos predefinidos:

- Embarque Devagar: corresponde a cargas entre 1 e 60 paletes diários;
- Embarque Médio: compreende a faixa de 60 a 80 paletes diários;
- Embarque Rápido: aplica-se a cargas superiores a 80 paletes diários.

Adicionalmente, a coleta de dados permitiu quantificar a proporção de cada categoria em relação ao universo amostral (Ver Figura 22). Por fim, as informações foram agregadas no formato exibido na Figura 22 abaixo para inclusão no Modelo Computacional.

Tabela 3 - Tipos de embarque

| <b>Tipo do Embarque</b> | <b>Quantidade de paletes</b> | <b>Quantidade (Qnt)</b> |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Devagar (1)             | 0–60                         | 48                      |
| Média (2)               | 60–80                        | 14                      |
| Rápida (3)              | >80                          | 27                      |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 22 - Tabulação dos dados de embarque para inclusão no Modelo Computacional

| 89.00      | linhas |          |          | FLEXSIM INPUT EMBARQUE |             |         |               |
|------------|--------|----------|----------|------------------------|-------------|---------|---------------|
| Data       | Dia    | Start    | End      | Start                  | End         | Pallets | Tipo_Embarque |
| 01/08/2022 | 1      | 07:00:00 | 17:00:00 | 07:00:00               | 17:00:00    | 59      | 1             |
| 02/08/2022 | 2      | 07:00:00 | 17:00:00 | 1:07:00:00             | 1:17:00:00  | 59      | 1             |
| 03/08/2022 | 3      | 07:00:00 | 17:00:00 | 2:07:00:00             | 2:17:00:00  | 59      | 1             |
| 04/08/2022 | 4      | 07:00:00 | 17:00:00 | 3:07:00:00             | 3:17:00:00  | 59      | 1             |
| 05/08/2022 | 5      | 07:00:00 | 17:00:00 | 4:07:00:00             | 4:17:00:00  | 54      | 1             |
| 08/08/2022 | 8      | 07:00:00 | 17:00:00 | 7:07:00:00             | 7:17:00:00  | 62      | 2             |
| 09/08/2022 | 9      | 07:00:00 | 17:00:00 | 8:07:00:00             | 8:17:00:00  | 60      | 1             |
| 10/08/2022 | 10     | 07:00:00 | 17:00:00 | 9:07:00:00             | 9:17:00:00  | 37      | 1             |
| 11/08/2022 | 11     | 07:00:00 | 17:00:00 | 10:07:00:00            | 10:17:00:00 | 40      | 1             |
| 12/08/2022 | 12     | 07:00:00 | 17:00:00 | 11:07:00:00            | 11:17:00:00 | 47      | 1             |
| 15/08/2022 | 15     | 07:00:00 | 17:00:00 | 14:07:00:00            | 14:17:00:00 | 45      | 1             |
| 16/08/2022 | 16     | 07:00:00 | 17:00:00 | 15:07:00:00            | 15:17:00:00 | 30      | 1             |
| 17/08/2022 | 17     | 07:00:00 | 17:00:00 | 16:07:00:00            | 16:17:00:00 | 0       | 1             |
| 18/08/2022 | 18     | 07:00:00 | 17:00:00 | 17:07:00:00            | 17:17:00:00 | 26      | 1             |
| 19/08/2022 | 19     | 07:00:00 | 17:00:00 | 18:07:00:00            | 18:17:00:00 | 82      | 3             |
| 22/08/2022 | 22     | 07:00:00 | 17:00:00 | 21:07:00:00            | 21:17:00:00 | 62      | 2             |
| 23/08/2022 | 23     | 07:00:00 | 17:00:00 | 22:07:00:00            | 22:17:00:00 | 72      | 2             |
| 24/08/2022 | 24     | 07:00:00 | 17:00:00 | 23:07:00:00            | 23:17:00:00 | 46      | 1             |
| 25/08/2022 | 25     | 07:00:00 | 17:00:00 | 24:07:00:00            | 24:17:00:00 | 50      | 1             |
| 26/08/2022 | 26     | 07:00:00 | 17:00:00 | 25:07:00:00            | 25:17:00:00 | 51      | 1             |
| 27/08/2022 | 27     | 07:00:00 | 17:00:00 | 26:07:00:00            | 26:17:00:00 | 60      | 1             |
| 29/08/2022 | 29     | 07:00:00 | 17:00:00 | 28:07:00:00            | 28:17:00:00 | 40      | 1             |
| 30/08/2022 | 30     | 07:00:00 | 17:00:00 | 29:07:00:00            | 29:17:00:00 | 120     | 3             |
| 01/09/2022 | 31     | 07:00:00 | 17:00:00 | 30:07:00:00            | 30:17:00:00 | 82      | 2             |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Em relação aos tempos de duração das atividades, fez-se um estudo de tempos e métodos (cronoanálise) das atividades desempenhadas pelo alimentador e demais atividades da expedição com base em gravação de vídeos realizadas durante as visitas técnicas.

Para inserir os dados coletados no modelo, utilizou-se o software de análise estatística do Flexsim®, o ExpertFit®, cuja função é encontrar a distribuição de probabilidade que melhor

se ajusta ao conjunto de dados. O ExpertFit® identifica as melhores distribuições de probabilidade para a amostra e informa ao usuário se a distribuição é adequada o suficiente para ser inserida no modelo de simulação. Se nenhuma das distribuições fornecer um ajuste adequado, o software pode construir uma distribuição empírica.

As distribuições geradas foram inseridas no modelo computacional após validação nos testes estatísticos e/ou nas comparações gráficas conforme visto na Tabela 4.

Todas essas informações constituíram os dados de entrada no modelo computacional.

Tabela 4 - Resultado do ExpertFit® para o Modelo Computacional

| Atividade                      | Distribuição                                                  | Relative Score | Testes           |                    |              | Evaluation    | %Erro relativo à média | Nº de amostras |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------|------------------|--------------------|--------------|---------------|------------------------|----------------|
|                                |                                                               |                | Anderson-Darling | Kolmogorov-Smirnov | Qui-quadrado |               |                        |                |
| Expedição_Conferência          | johnsonbounded(2.911071, 227.162861, 2.505244, 0.865649)      | 96,74          | Aprovado         | Aprovado           | Aprovado     | Good          | 0,34                   | 76             |
| Expedição_Embarque_1           | johnsonbounded(2.298070983, 1435.067579, 1.2498914, 0.621618) | 100,00         | Aprovado         | Aprovado           | Aprovado     | Good          | 0,14                   | 56             |
| Expedição_Embarque_2           | pearson6(100.982284, 2883.926034, 1.138971, 14.973689)        | 93,27          | Aprovado         | Aprovado           | Aprovado     | Good          | 0,04                   | 126            |
| Expedição_Embarque_3           | johnsonbounded(23.375055, 1499.987738, 1.752628, 0.634001)    | 98,75          | Aprovado         | Aprovado           | Aprovado     | Indeterminate | 0,64                   | 245            |
| Alimentar linha com MP (Caixa) | weibull(0.000000, 48.309534, 1.737223)                        | 95,32          | Aprovado         | Aprovado           | Aprovado     | Good          | 0,06                   | 38             |
| Alimentar linha com MP (Filme) | lognormal(2.871867, 2.651360, 1.193220)                       | 97,00          | Aprovado         | Aprovado           | Aprovado     | Good          | 12,24                  | 23             |
| Alimentar linha com MP (Geral) | johnsonbounded(3.137077, 80.398001, 0.725511, 0.400232)       | 100,00         | Aprovado         | Aprovado           | Aprovado     | Good          | 1,68                   | 70             |
| Procurar MP no estoque         | beta(3.136292, 176.733365, 0.595567, 2.228962)                | 100,00         | Aprovado         | Aprovado           | Aprovado     | Good          | 0,29                   | 56             |
| Anotar Requisição de MP e PA   | weibull(3.588584, 27.439786, 1.248572)                        | 97,83          | Aprovado         | Aprovado           | Aprovado     | Good          | 0,10                   | 139            |

Tabela 4 (Continuação) – Resultado do ExpertFit® para o Modelo Computacional

| Atividade            | Distribuição                                                | Relative<br>Score | Testes               |                        |                  | Evalua<br>tion | %Erro<br>relativo à<br>média | Nº de<br>amostras |
|----------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------|------------------------|------------------|----------------|------------------------------|-------------------|
|                      |                                                             |                   | Anderson-<br>Darling | Kolmogorov-<br>Smirnov | Qui-<br>quadrado |                |                              |                   |
| Operador na sala ADM | johnsonbounded(7.642196, 270.235204,<br>1.823372, 0.555508) | 92,25             | Aprovado             | Aprovado               | Reprovado        | Good           | 1,25                         | 12                |
| Realocação de pallet | loglaplace(1.833965, 36.486035,<br>2.643805)                | 100,00            | Aprovado             | Aprovado               | Aprovado         | Good           | 1,38                         | 33                |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

#### 4.1.2. Modelo Computacional

O desenvolvimento do modelo de simulação computacional contou com a utilização das ferramentas *Process Flow*, *Model 3D*, *Global Tables*, *Groups*, *Time Tables* e Parâmetros do *software* de simulação de eventos discretos Flexsim®.

O *Process Flow* é uma ferramenta utilizada para criar lógicas mais complexas e customizáveis por meio de programação em blocos utilizando atividades presentes na biblioteca e/ou através de *custom codes* que são códigos personalizados na linguagem *Flexscript*, baseados na linguagem C. Na Figura 23 apresenta-se uma visão geral da versão final do *Process Flow* das etapas simuladas apresentadas no modelo conceitual do processo, divididas em “Alimentador” e “Expedição”.

O modelo 3D é responsável por representar as localizações de máquinas, equipamentos e caminhos a serem percorridos seguindo o layout atual da fábrica em escala real, além de armazenarem os objetos que serão transportados durante a execução da simulação Figura 25.

Figura 23 - *Process Flow* da Expedição e do Alimentador

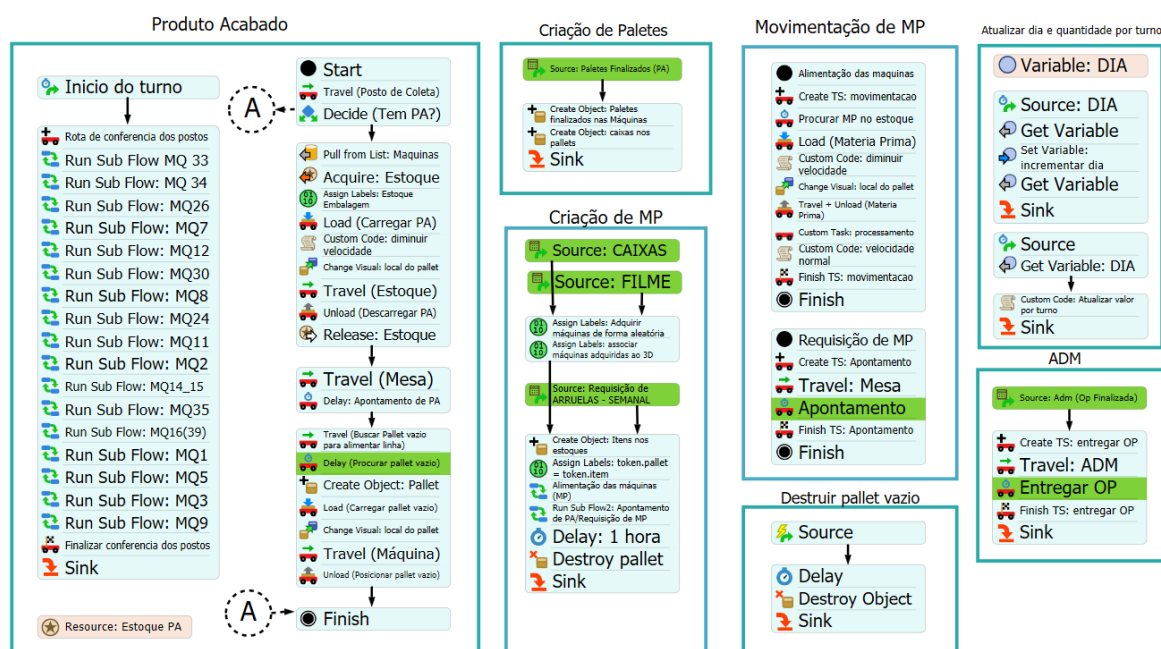
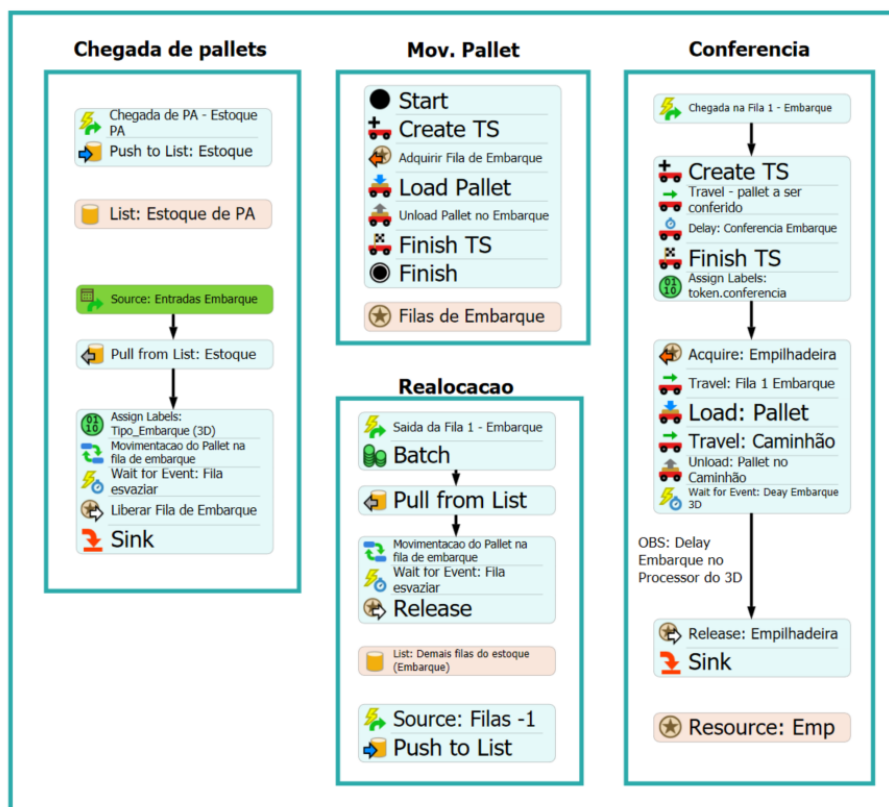
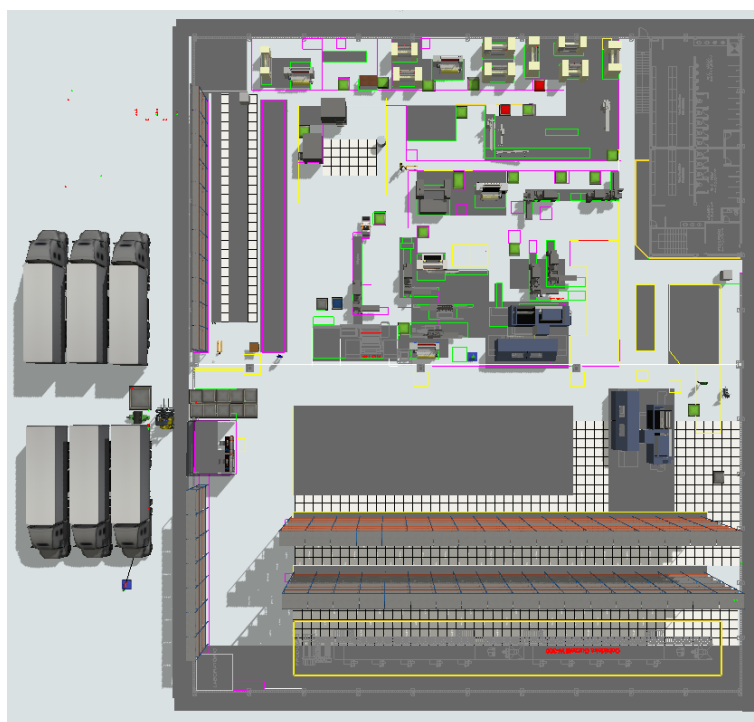


Figura 24 (Continuação) - *Process Flow* da Expedição e do Alimentador  
Expedição



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 25 - Vista superior do modelo 3D da simulação

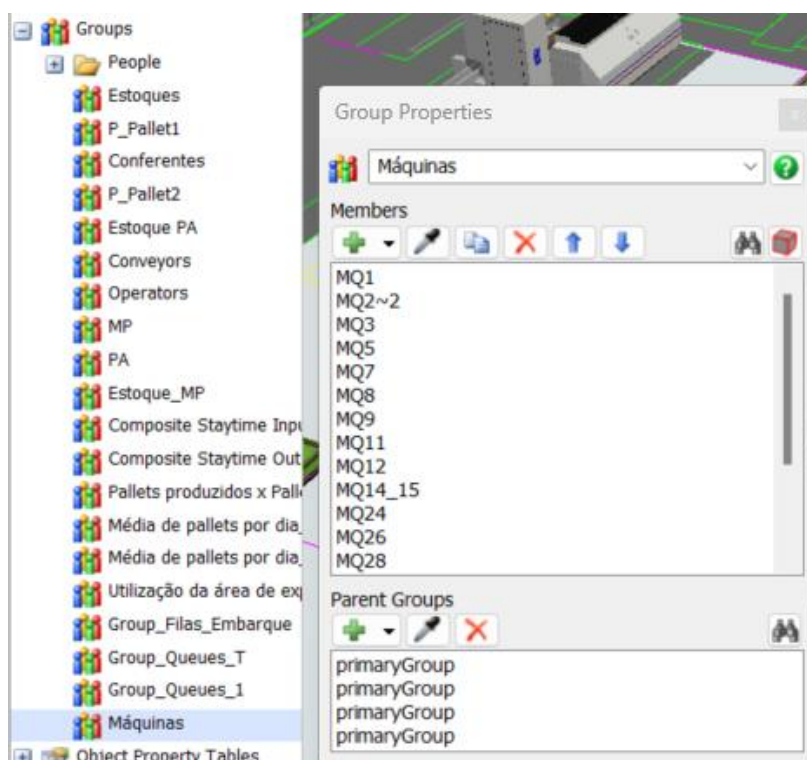


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para a construção do modelo computacional optou-se pelo uso de *Groups* (Grupos) que permitem organizar e classificar objetos 3D que possuem uma função lógica comum em objetos/elementos distintos. Neste modelo foram criados grupos referentes ao estoque de produto acabado (PA), máquinas (postos de coleta), estoque de embalagens, dentre outros. Esses grupos auxiliam também para a programação de triggers, lógica implementada sempre que um evento especificado ocorre no modelo. Os grupos referentes ao modelo computacional pode ser visualizado na

Figura 26.

Figura 26 - Exemplo de um grupo utilizado no modelo

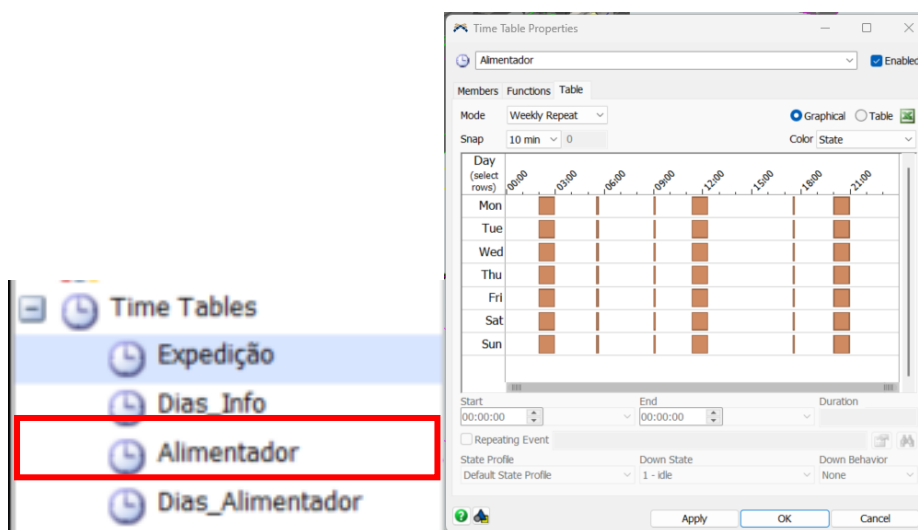


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Utilizou-se também a ferramenta de *Time Tables*, para agendar mudanças de estado, como tempo de inatividade programadas como almoço, jantar e lanche durante a semana e dias não trabalhados. O modelo contou com quatro *Times Tables*, evidenciadas na Figura 27.

Já os tempos das atividades foram configurados no *Parameters* para facilitar o ajuste caso seja necessário, como mostra a Figura 28.

Figura 27 - Exemplo de *Times Tables* referente ao Alimentador.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 28 - Parâmetros configurados no modelo

| Name                               | Value                                                       |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Expedicao_Realocacao_Pallets       | inversegaussian( 10.030555, 51.419445, 33.692976)           |
| Expedicao_Conferencia              | johnsonbounded( 2.911071, 227.162861, 2.505244, 0.865649)   |
| Expedicao_Desembarque_MP           | 1.67                                                        |
| Expedicao_Embarque_1               | pearsont6( 100.982284, 2883.926034, 1.138971, 14.973698)    |
| Expedicao_Embarque_2               | johnsonbounded( 21.722879, 138.094469, 1.229429, 1.144198)  |
| Alimentador_Procurar MP no estoque | beta( 3.136292, 176.733365, 0.595567, 2.228962)             |
| Alimentador_Apontamento            | weibull( 3.588584, 27.439786, 1.248572)                     |
| Alimentador_Inspecao               | johnsonbounded( 124.226761, 393.141486, 0.756496, 0.651502) |
| Alimentador_Linha_MP_Caixa         | weibull( 0.000000, 48.309534, 1.732723)                     |
| Alimentador_Linha_MP_Filme         | lognormal2( 2.871867, 2.651360, 1.193220)                   |
| Alimentador_Linha_MP_Geral         | johnsonbounded( 3.137077, 80.398001, 0.725511, 0.400232)    |
| Alimentador_ADM                    | johnsonbounded( 7.642196, 270.235204, 1.823372, 0.555508)   |
| Alimentador_Posicionar_escada      | johnsonbounded( 5.663241, 47.358215, 0.902597, 0.758358)    |
| Alimentador_Linha_MP_Arruela       | johnsonbounded( 3.131037, 106.642942, 0.980355, 0.427626)   |
| Alimentador_paletteiro_vazio       | loglaplace( 1.833965, 36.486035, 2.643805)                  |
| dia                                | 1                                                           |
| Prim_turno                         | 5                                                           |
| Seg_turno                          | 4                                                           |
| Terc_turno                         | 3                                                           |
| cx_prim_turno                      | 10                                                          |
| cx_seg_turno                       | 10                                                          |
| cx_terc_turno                      | 7                                                           |
| Tempo_rota                         | 900                                                         |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

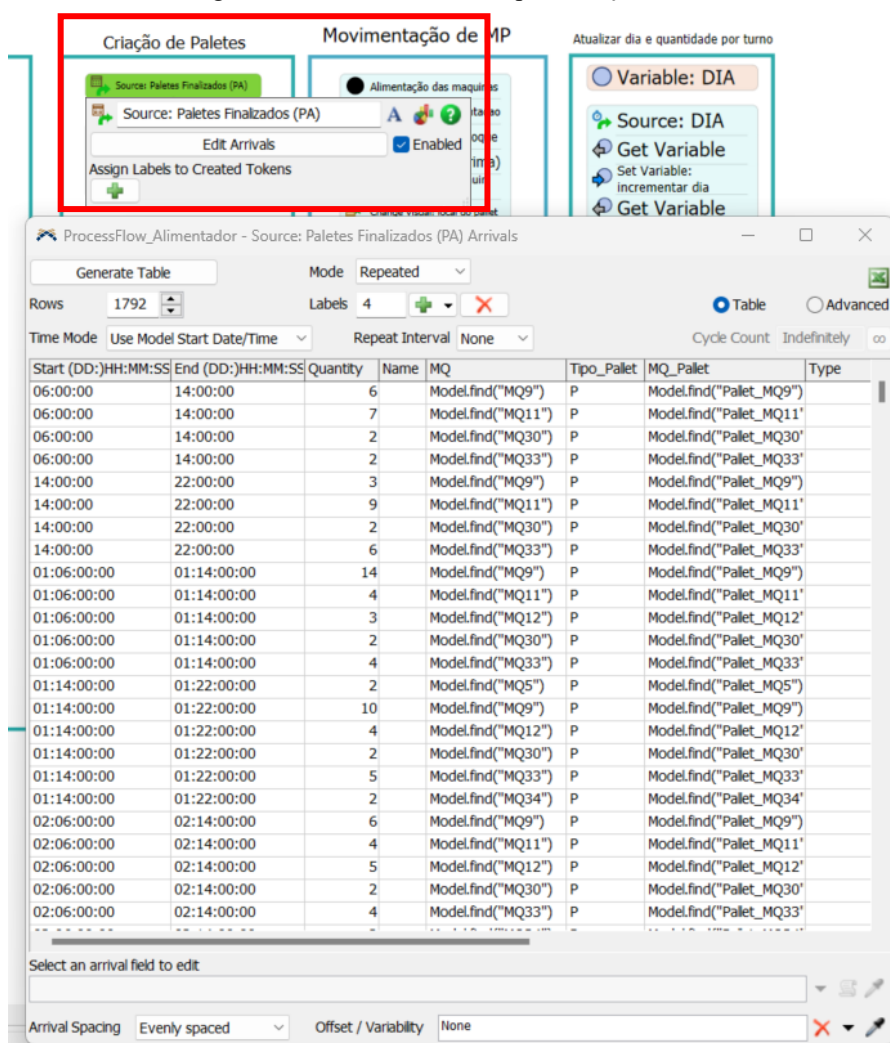
Para uma melhor organização do *Process Flow* do modelo computacional e construção da lógica, optou-se pela divisão da lógica em dois fluxos: Alimentador e Expedição. O *Process*

*Flow* referente ao Alimentador é responsável por toda lógica das operações do operador Alimentador, incluindo movimentação de paletes vazios e ocupados com PA, embalagens (filme, caixas e arruelas), dentre outros. Já o *Process Flow* de Expedição diz respeito a todo fluxo referente a expedição de PA, incluso a chegada de paletes no espaço de movimentação, realocação de paletes e conferência e embarque dos produtos.

#### 4.1.2.1. Modelo computacional - Process Flow Alimentador

O Alimentador possui duas principais funções, alimentar postos de trabalho com embalagens (caixas, arruelas e filmes) e transportar os paletes com PA. Assim, o *Process Flow* do alimentador foi estruturado com esses dois principais fluxos. Para transporte de produto acabado (PA), o alimentador segue uma rota de deslocamento no chão de fábrica, e caso haja algum paleta completo, ele irá transportá-lo para a área de armazenagem da fábrica (estoque). Posteriormente, o operador faz o apontamento de PA na planilha impressa e por fim realimenta o respectivo posto com o paleta vazio. Após esse processo ele volta a seguir sua rota programada, fazendo isso repetida vezes de 15 em 15 minutos. Toda essa lógica citada anteriormente é evidenciada na Figura 23.

A inserção dos dados referentes a criação de paletes com produtos acabados (PA) nos postos se fez através do *Data Time Source* no *Process Flow*, no qual é possível configurar um intervalo de tempo e a quantidade de Tokens que este bloco irá criar, além de várias *Labels* a serem usadas posteriormente em outras lógicas. Tal configuração pode ser visualizada na Figura 29.

Figura 29 - *Data Source Time* para criação de PA

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Após a criação desses *tokens* segue a lógica de criação dos paletes (Figura 30) e as caixas sobre esse palet a fim de tornar o modelo 3D mais realista.

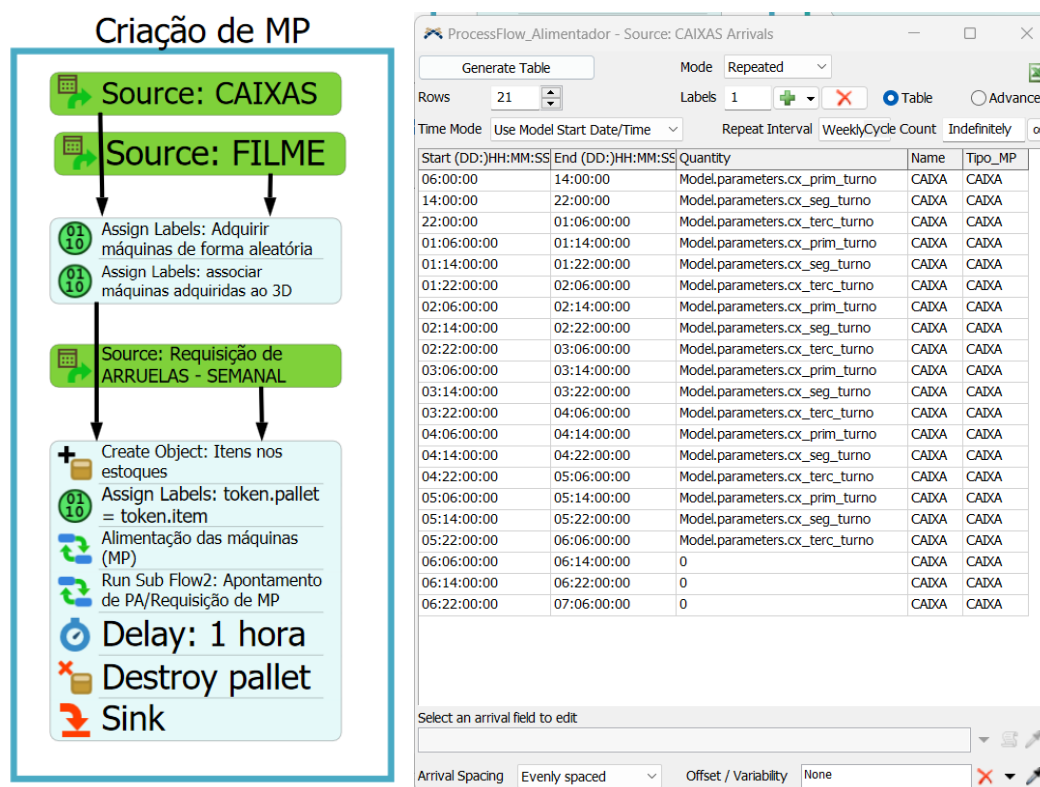
Figura 30 – Lógica de criação de PA



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para criação de embalagens utilizou-se a mesma lógica principal, valendo-se de um *Data Time Source* alimentado com os dados históricos. As Embalagens são divididas em 3 tipos no modelo: arruela, filmes e caixas sendo que cada um possui um *Source* distinto, conforme visto destacado em verde na Figura 31.

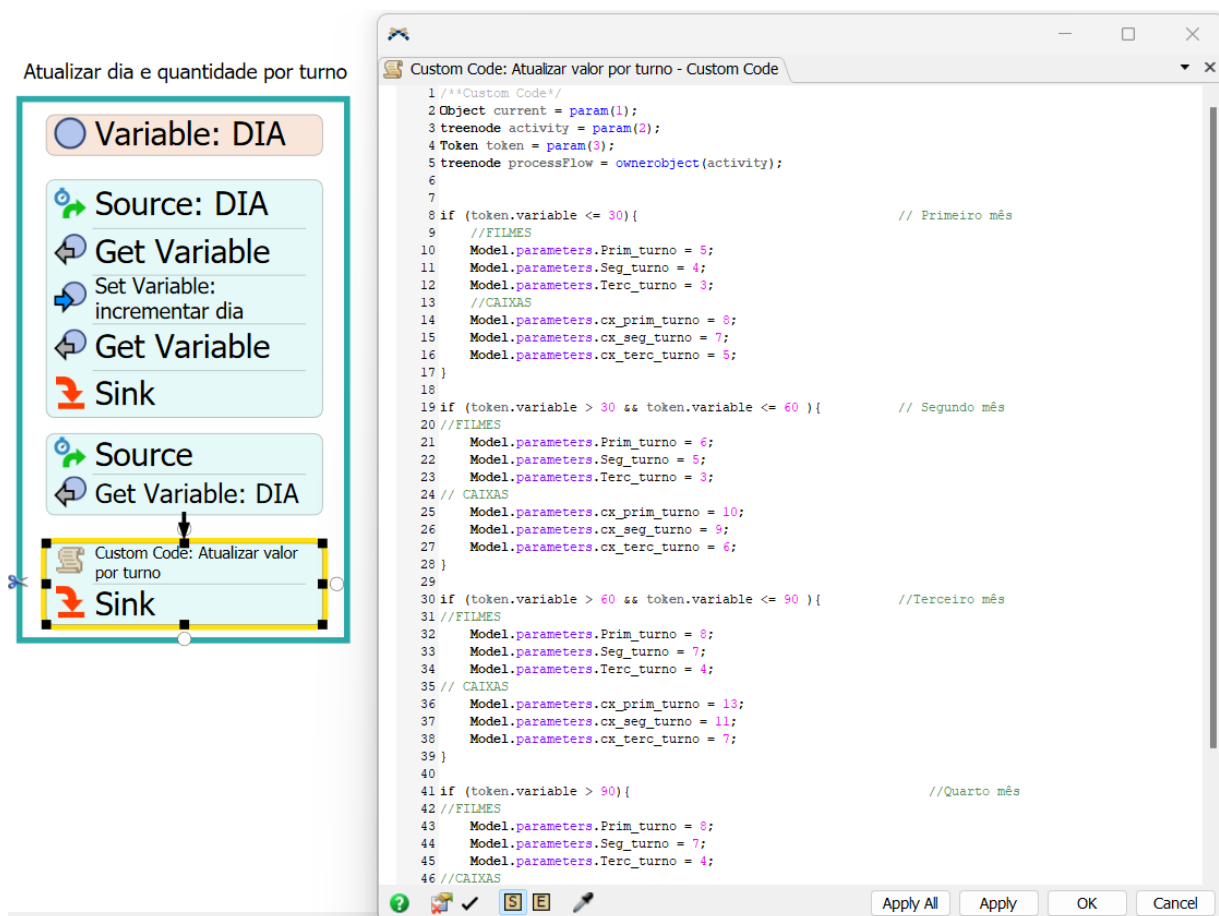
Figura 31 – Lógica para a criação de MP



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os *Sources* possuem lógica de repetição semanal e a quantidade de criação de *tokens* é realizada a partir de parâmetros cadastrados para os filmes e caixas que são atualizados a cada mês através de um bloco de lógica dentro do *Process Flow*, de forma a simplificar a lógica e reduzir as linhas dentro do *Data Time Source*, visto que isso sobrecarrega o modelo. Tal lógica pode ser visualizada na Figura 32 abaixo.

Figura 32 – Lógica para atualização dos parâmetros filmes e caixas por dia/mês



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Embalagem criada, inicia-se a lógica, em *Subflow*, da movimentação de embalagens, evidenciado na Figura 33. A lógica do processo prevê o deslocamento do operador até o estoque para a coleta das embalagens, seguido do abastecimento do posto de trabalho e, posteriormente, do registro da atividade realizada.

Em seguida a lógica de destruição de palete vazio é acionada. Tal lógica foi criada apenas para tornar o modelo visualmente mais realista, pois caso não destruísse o palete, os mesmos ficariam se sobrepondo no modelo computacional (Ver Figura 33).

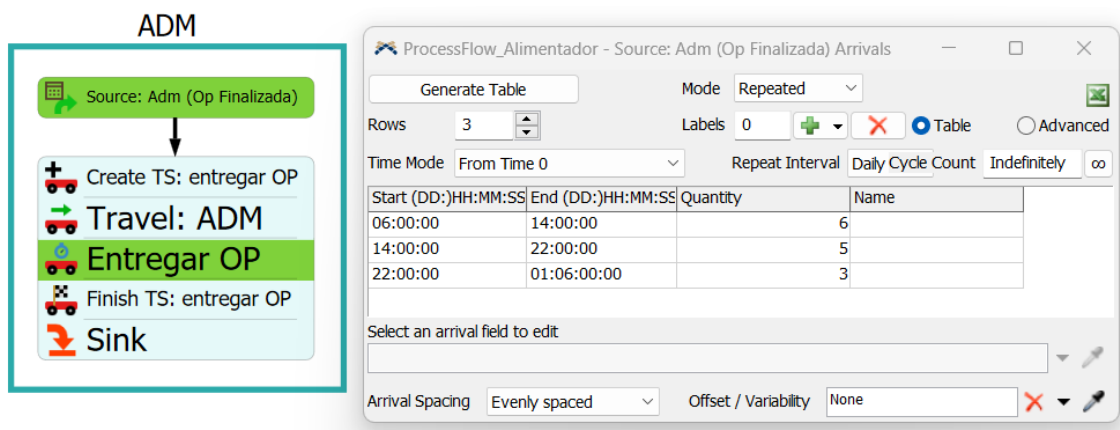
Figura 33 - *Process Flow* de movimentação de embalagens e destruição de paleta vazio



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Uma última atividade realizada pelo operador é o descolamento até a sala de administração da fábrica (ADM) para entregar a ordem de produção (OP) finalizada. Utilizou-se também o *Data Time Sources* para iniciar a lógica, levando em consideração a média de viagens realizadas por turno evidenciada na Figura 34.

Figura 34 - Lógica de viagens do Alimentador a ADM



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

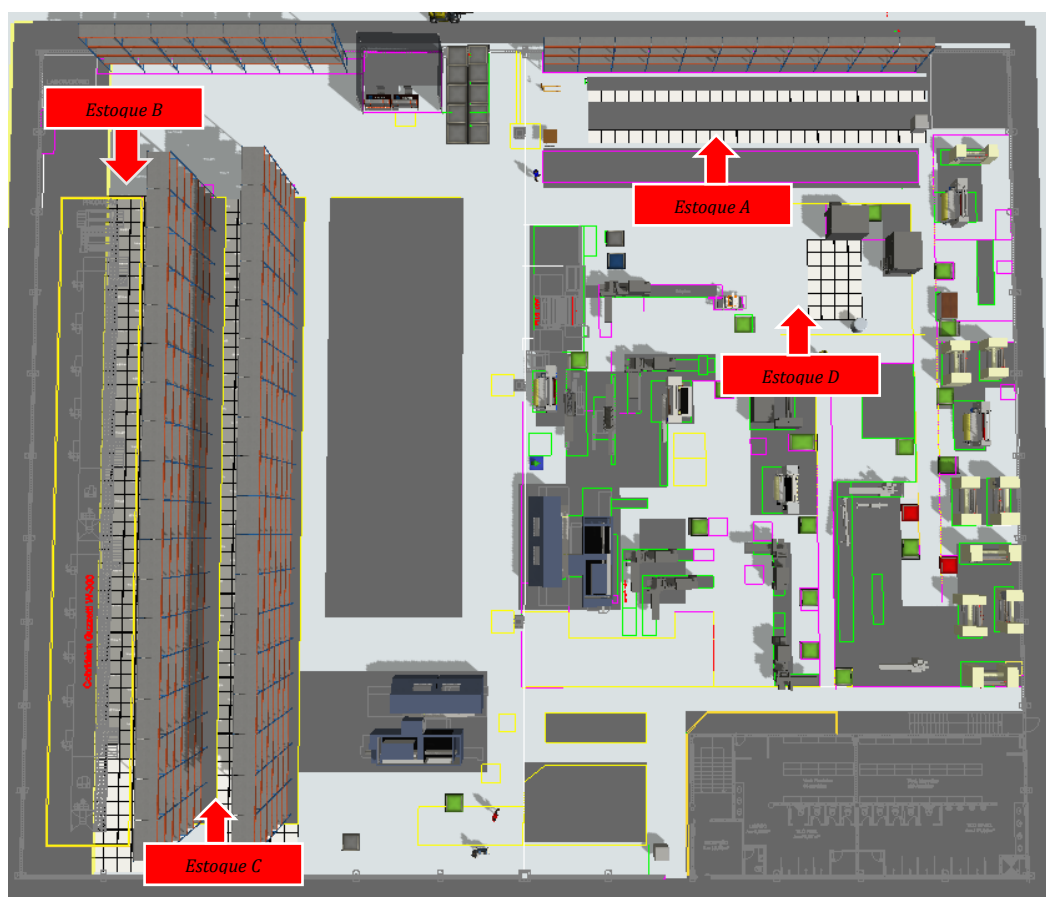
#### 4.1.2.2. Modelo computacional - *Process Flow* Expedição

O modelo de simulação da expedição foi configurado para iniciar com um estoque inicial de 60 paletes de produto acabado (PA), correspondente a um saldo remanescente de produção não embarcado no período anterior. Para representar esse cenário, utilizou-se um objeto do tipo *Source* no ambiente 3D do modelo, responsável pela geração dos paletes diretamente no estoque, possibilitando o início imediato do processo de embarque.

Feito isso, o estoque de PA é abastecido pelo próprio Alimentador que os transposta durante o seu turno de trabalho para essas áreas de armazenagem. E posteriormente é retirado pelos operadores da expedição para embarque nas carretas e caminhões.

O estoque de PA é dividido em 4 (quatro) áreas distintas, sendo nomeados de Estoque A, B, C e D, conforme exposto na Figura 35.

Figura 35 - Estoques de PAs no Modelo Computacional

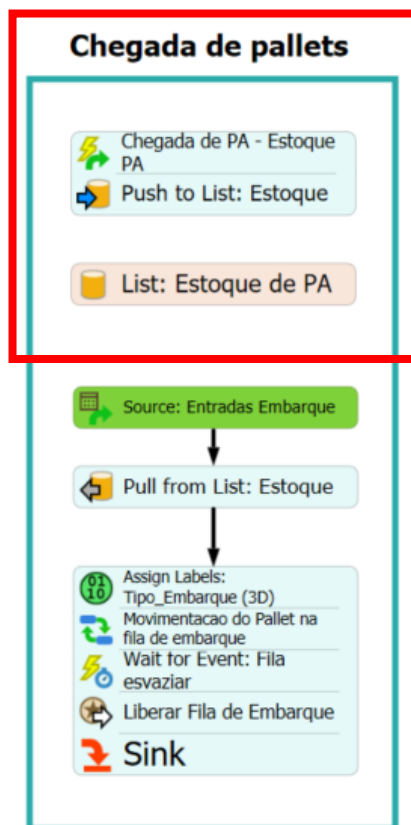


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Ao chegar paletes no estoque, é acionado a *list do Process Flow* responsável por rastrear cada paleta. Esta referência é utilizada pelo operador da expedição na atividade transporte do paleta do estoque para expedição. Tal ação é feita através de um *Event Triggered Source* configurado para que, toda vez que um paleta é descarregado em um dos estoques, ele

cria um *Source* e referencia o paleta através do *Assing*. A Figura 36 evidencia essa lógica citada anteriormente.

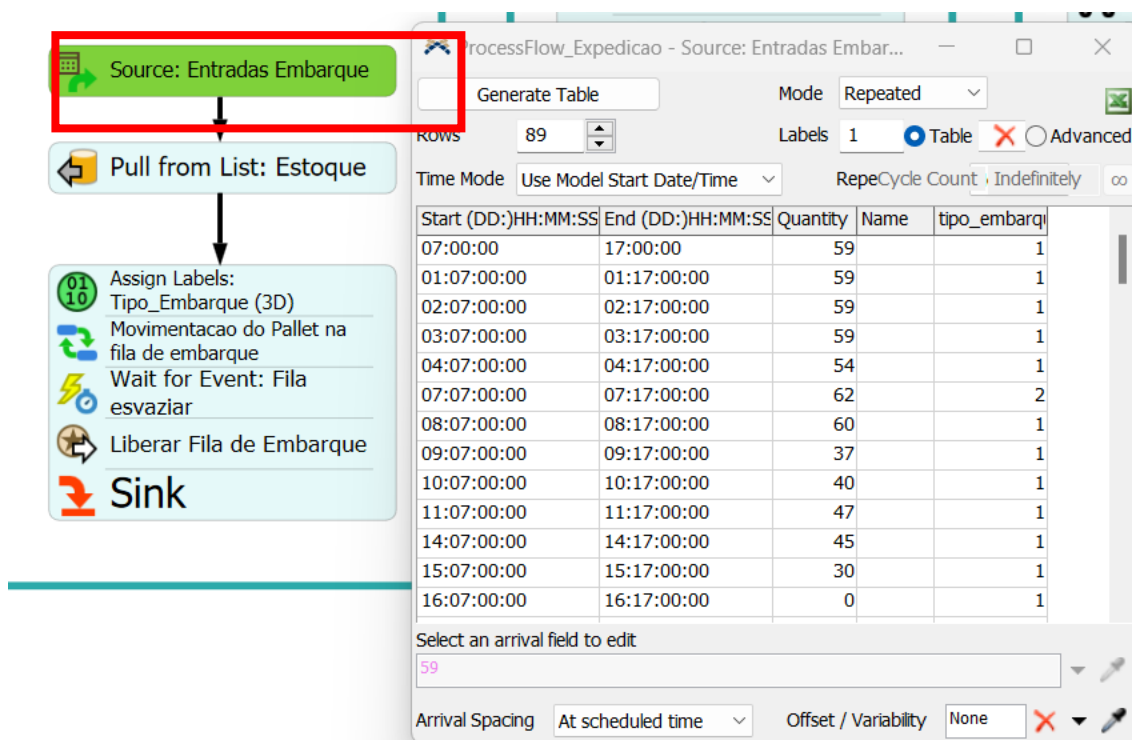
Figura 36 - *Process Flow* com a lógica de alimentação da lista de Estoques de PAs



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Finalizada essa lógica de estoque é possível iniciar a lógica de Embarque, sendo ela iniciada através de um *Data Time Source* (Ver Figura 37). Após os *Tokens* serem criados, é necessário puxar a referência dos paletes armazenada na Lista através do *Pull from List* e posteriormente é utilizado um *Assign Labels* para o *token.embarque* receber a *Label* *tipo\_embarque* que foi carimbado dentro do *Source* indicando se o embarque é do tipo devagar, médio ou rápido. Tal *Label* foi configurada para ser utilizada no *Delay* de embarque que está presente dentro do modelo 3D. Finalizado esse processo, o *Token* é direcionado ao *Subflow* de movimentação de paleta.

Figura 37 - Process Flow com a lógica de início do Embarque

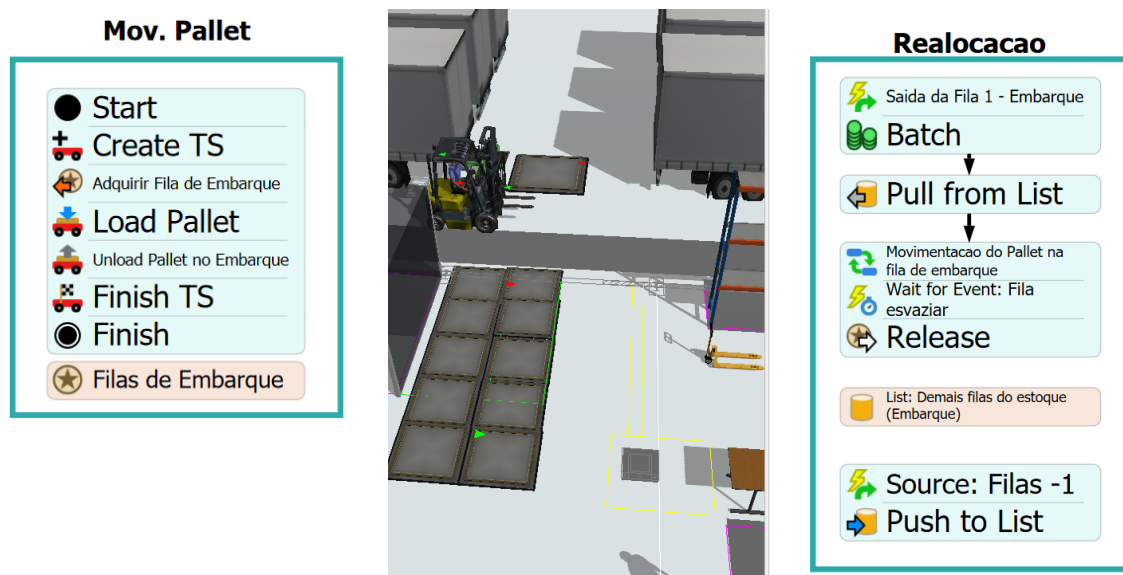


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O *Subflow* de movimentação de paleta é responsável por adquirir esse chamado de embarque, retirar o paleta do estoque e posicionar os paletes na expedição, que possui uma capacidade de até 10 paletes para conferência e posteriormente embarque no caminhão. Por possuir uma fila com capacidade de 10 paletes, o operador necessita ficar realocando os paletes à medida que operador da empilhadeira embarca no caminhão. A lógica de realocação de paleta conta com a utilização de uma *List*, na qual toda vez que é posicionado um paleta nas filas de 2 a 10 é feito a adição desse paleta nesta *List*. Posteriormente o operador irá realocar esse paleta por essas filas até finalmente chegar à Fila 1 e ser acionado a conferência e embarque na carreta.

Figura 38 - *Subflow* de Movimentação de Palete e Modelo 3D e Process Flow de Realocação de palete

Fonte: elaborado pelo próprio autor.



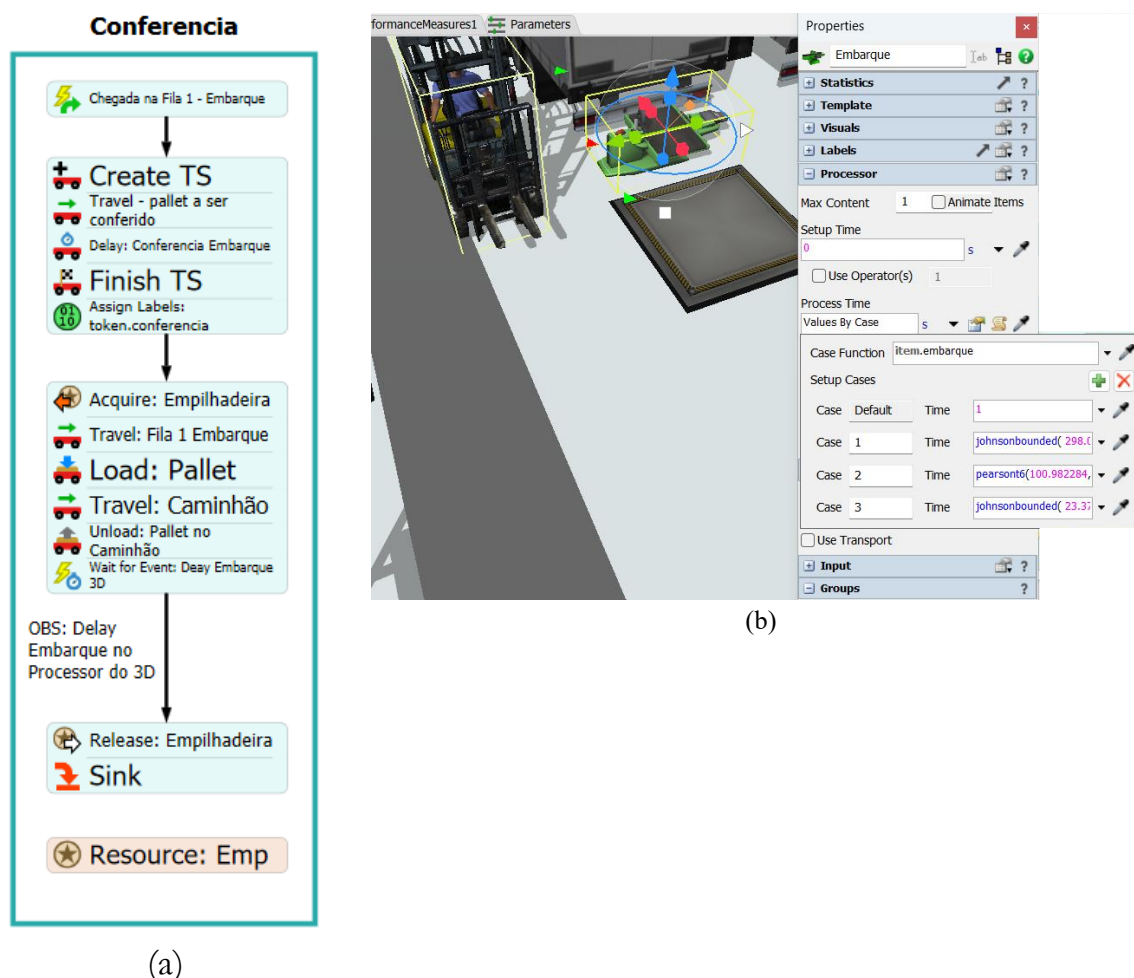
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A lógica de conferência do palete inicia apenas quando ele chega na Fila 1 (Figura 39). Vale a pena ressaltar que não necessariamente só nesta posição que a conferência é realizada, porém utilizou-se essa estratégia lógica pois a conferência é efetuada apenas uma vez nessa etapa. Caso fosse utilizado um *Delay* de conferência com o gatilho de entrada em uma das 10 filas, este *Delay* de conferência seria repetido em cada uma dessas posições, o que não condiz com a realidade e se tornaria um erro na construção da modelagem do sistema em estudo.

Após o *Delay* de conferência, o conferente é liberado e o operador da empilhadeira é adquirido através de um *Resource*. Ele então se transporta até a Fila 1, carrega o palete e faz o seu transporte até o caminhão, feito isso ele descarrega o palete e espera o *Delay* de embarque finalizar através do *Wait for Event*. Para o *Delay* de embarque empregou-se este tempo no próprio Modelo 3D, que possui um *Processor* com este *Delay*. O embarque possui 3 tipos de *Delay* conforme classificado na *Assing label* citado anteriormente, e possui valor de 1 a 3 para devagar, médio e rápido.

Figura 39 – (a) Lógica de Conferência e transporte do palete realizado pelo operador da empilhadeira e (b)

Configuração do delay de Embarque



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

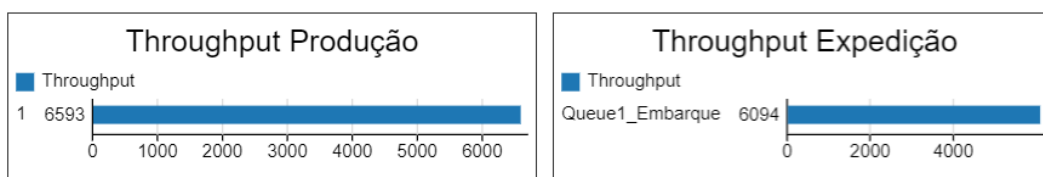
#### 4.1.3. Resultados

Antes de iniciar o desenvolvimento dos cenários de melhoria, é possível obter os resultados do modelo computacional e observar alguns comportamentos.

O total de produção para esses 4 (quatro) meses analisados foi de 6593 paletes com produtos acabados, já a expedição apresentou um quantitativo de 6094 paletes (Gráfico 1). A disparidade entre Produção e Expedição destaca a presença do estoque de produtos em processo no chão de fábrica, evidenciando desperdícios.

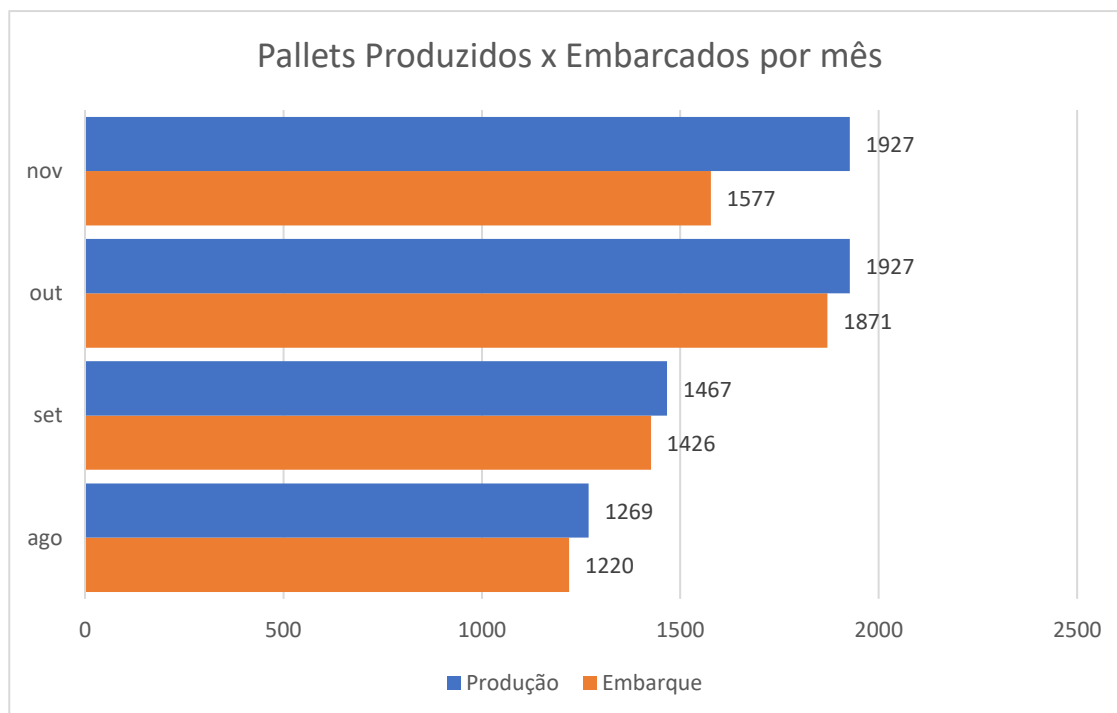
No Gráfico 2, pode-se observar que a saída de paletes produzidos supera, nos 4 meses, a quantidade de paletes embarcados. Em novembro essa diferença é ainda maior, aproximadamente 350 paletes, gerando um estoque relevante de paletes com PA no chão-de-fábrica.

Gráfico 1 - Produção VS Embarque (total de agosto a novembro)



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

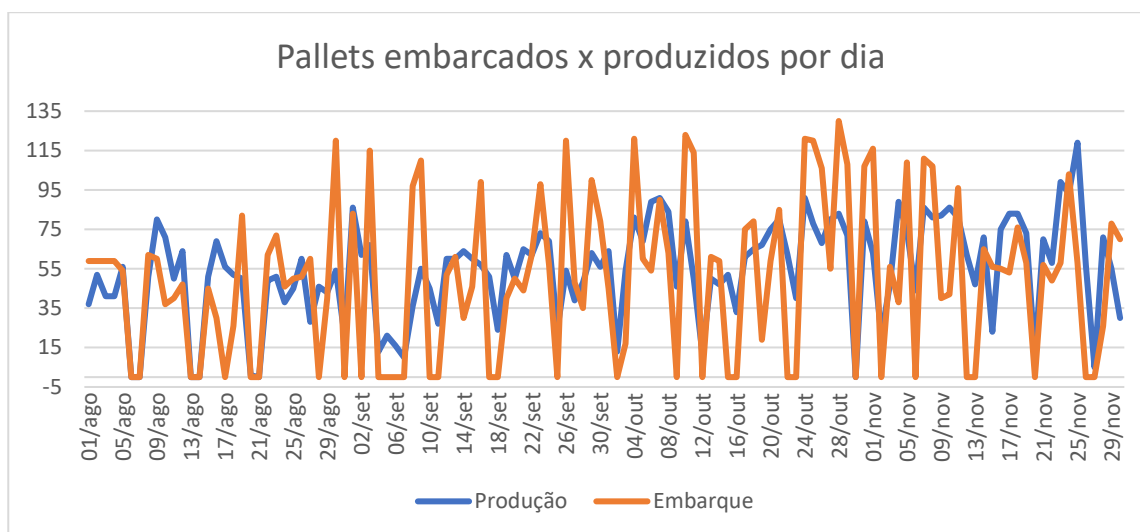
Gráfico 2 - Saída total de Paletes



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

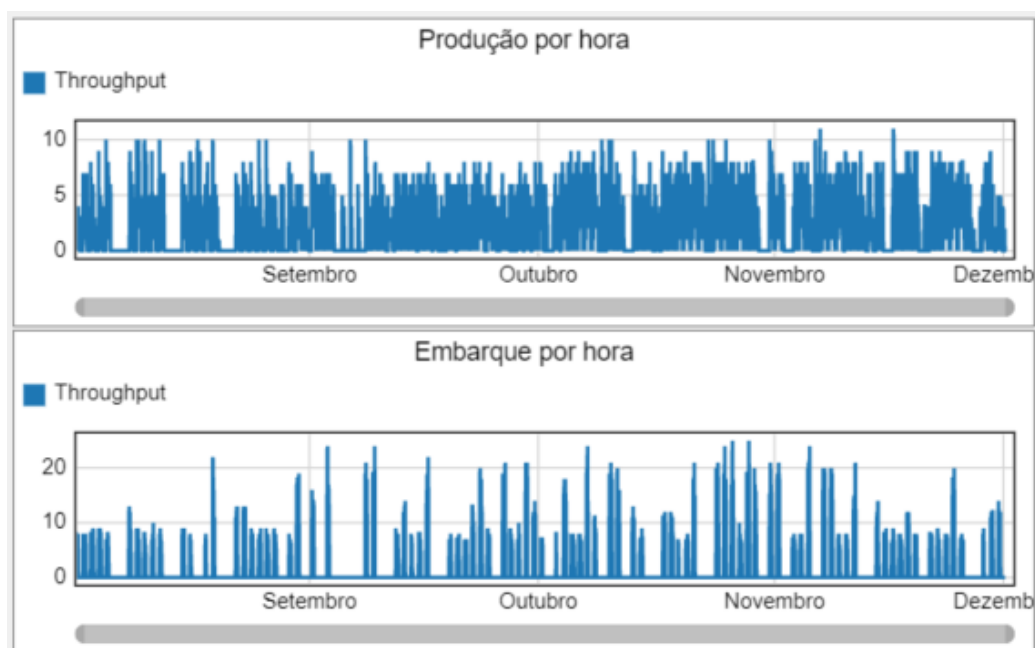
Os Gráfico 3 e Gráfico 4 evidenciam que a produção se mantém constante durante os turnos e horários operacionais. Em contrapartida, a expedição apresenta um ritmo mais lento, devido à necessidade de planejamento logístico por parte do gerente. Esse processo envolve a verificação da disponibilidade de paletes no estoque para o carregamento completo de uma carreta. É importante ressaltar que em dias de sábado o embarque ocorre apenas até às 14 horas e no domingo não existe embarque, mas existe produção, gerando um acúmulo de PA no chão de fábrica que só poderão ser embarcados no próximo dia útil.

Gráfico 3 - Embarque vs Produção de paletes por dia



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Gráfico 4 - Produção e embarque por hora



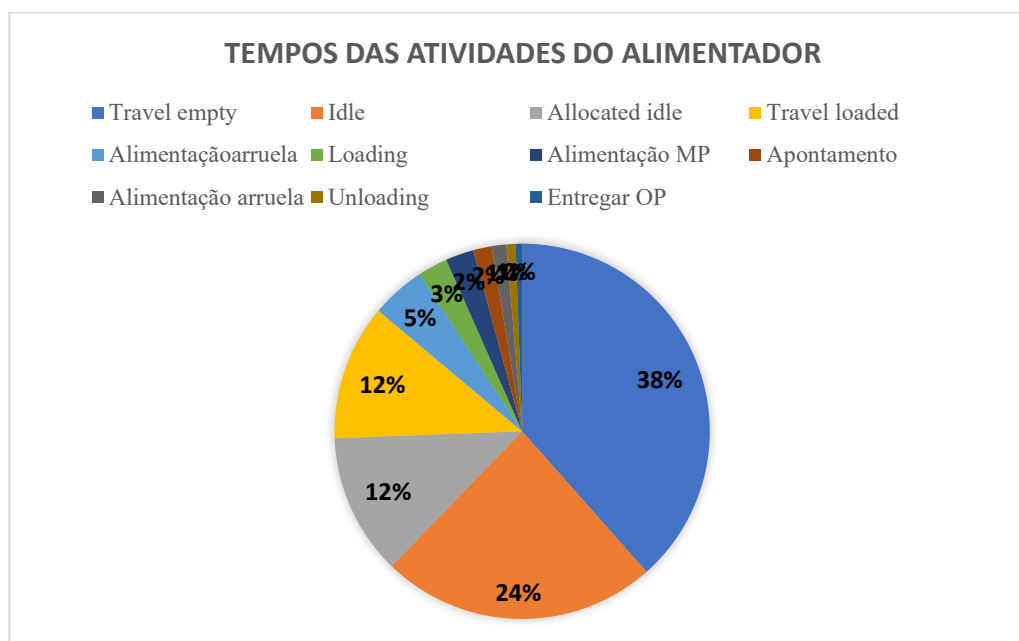
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A análise da utilização do operador Alimentador, conforme apresentado no Gráfico 5, revelou uma taxa de ocupação de 82,87% do tempo. Observações realizadas in loco indicaram que grande parte dessa ocupação corresponde a deslocamentos frequentes e à execução de atividades não padronizadas, realizadas de forma aleatória e sem uma sequência definida. Dentre essas atividades, destacam-se: abastecimento de embalagens, carregamento de paletes com produto acabado (PA), deslocamentos com a transpaleteira vazia, registros de embalagem

e produto acabado, verificação do status de produção nos postos de trabalho e entrega de ordens de produção (OP), entre outras.

Vale a pena ressaltar que o operador 38% tempo realizando a atividade de viagem livre (*Travel Empty*), correspondente a transporte de paleta vazio e outras operações como ajudar na organização das caixas sobre o paleta, a fechar caixas, dentre outros.

Gráfico 5 - Utilização do Alimentador



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A distância média percorrida pelo alimentador por hora foi de 1630.39 metros ou aproximadamente 1,6 km por hora, sendo evidenciado na Gráfico 6 abaixo. Isso se dá pela rotina que o operador executa durante o seu turno de trabalho, sendo uma das suas principais funções ficar verificando por toda a fábrica quais pontos precisam de Embalagens, paletes vazios ou retirada de paletes nas células produtivas e transportá-las para o estoque.

Gráfico 6 - Distância percorrida pelo Alimentador em metros



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

## 4.2. CENÁRIO 1 – UNITIZAÇÃO DOS PALETES

O processo atual de embarque é realizado com carga batida, onde as mercadorias são arrumadas, individualmente, uma sobre a outra e em suas próprias embalagens (caixas), no caminhão. Antes de iniciar o embarque, o conferente passa por todos os estoques analisando onde estão os paletes de produtos a serem embarcados, então o paleta é transportado até o local de embarque na expedição. Esta atividade é feita até que se atinja a quantidade total de paletes a serem embarcados e concluindo com a entrega do relatório de embarque para o gerente de produção. Este processo atual apresenta uma série de pontos negativos, tais como ilustra a Quadro 3

Quadro 3 - Problemas identificados no Cenário Atual

| Áreas           | Problemas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Produção</b> | Observou-se a ausência de dados referentes a movimentação dos paletes entre as máquinas e a área de armazenagem, o que compromete melhoria contínua no fluxo logístico interno como por exemplo o planejamento do número de alimentadores de produção, do número de transpaleteira, e redefinição das rotas internas;                               |
|                 | Há possibilidade de atraso na retirada do paleta da máquina durante o processo produtivo, seja por esquecimento ou pela priorização de outras tarefas por parte do operador Alimentador, mesmo após notificação prévia realizada pelo operador da máquina;                                                                                          |
|                 | Identificou-se desgaste físico significativo do operador Alimentador em decorrência do transporte manual de cargas paletizadas, utilizando uma transpaleteira convencional, com peso de até 1.100 kg. Tal condição contribui para a variação no ritmo das atividades de transporte e representa um potencial risco à saúde e segurança ocupacional; |
|                 | Dificuldade de determinação do ritmo de produção das máquinas, uma vez que esta informação não chega em tempo real e/ou é desvirtuada por problemas ocasionados por falha de comunicação entre o operador da máquina e o alimentador de produção;                                                                                                   |
|                 | A comunicação entre o operador da máquina e o Alimentador pode apresentar ruídos, exigindo, por vezes, que o operador deixe seu posto para sinalizar a finalização do paleta, o que compromete a produtividade e retarda a movimentação do produto acabado.                                                                                         |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Quadro 3 (Continuação) - Problemas identificados no Cenário Atual

| Áreas                | Problemas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Armazenamento</b> | Atualmente não há uma padronização do espaço utilizado nem endereçamento individual para as fitas que estão na área de armazenagem, ficando ao critério do alimentador de paletes;                                                                                                                                                                       |
|                      | Falta de informação sobre o tempo de armazenamento para planejamento do estoque;                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                      | Pode haver congestionamento (falta de espaço) de paletes montados nas áreas de armazenagem, por falta de notificação ao gestor da produção, em tempo real, para que seja iniciado o planejamento da expedição;                                                                                                                                           |
| <b>Expedição</b>     | O gestor da produção não recebe a informação em tempo real dos produtos que já estão na área de armazenagem e precisa se deslocar ao local para realizar este levantamento várias vezes ao dia;                                                                                                                                                          |
|                      | O embarque é realizado com carga batida, as mercadorias são organizadas individualmente, uma sobre a outra, em suas próprias embalagens (caixas). Esse método demanda elevada utilização de mão de obra, expõe os trabalhadores a atividades pesadas, repetitivas e ergonomicamente inadequadas, além de resultar em um processo operacional mais lento. |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Antes da criação do modelo computacional para simulação do processo com as tecnologias da indústria 4.0, necessitou-se incluir um novo processo de unitização dos paletes devido a mudanças ocorridas na fábrica durante a realização da pesquisa.

Essa avaliação é relevante para o estudo pois a unitização dos paletes alterou a quantidade de caixas por paleta, conforme demonstrado na Tabela 5, um aumento de 40% na saída de produto acabado dos postos de coleta.

Na Figura 40 é possível ver alguns exemplos de paletes simulados, em paletes no padrão PBR, para os modelos de caixa 10, W, 7 e 11.

Tabela 5 - Novo padrão de caixas por paleta (Cenário Unitização)

| Tipo de Caixa | Capacidade Atual | Capacidade Unitizada | Diferença |
|---------------|------------------|----------------------|-----------|
| 11            | 35               | 21                   | -14       |
| R / R2        | 35               | 24                   | -11       |

Tabela 5 (Continuação)- Novo padrão de caixas por palete (Cenário Unitização)

| <b>Tipo de Caixa</b> | <b>Capacidade Atual</b> | <b>Capacidade Unitizada</b> | <b>Diferença</b> |
|----------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------|
| E2                   | 35                      | 24                          | -11              |
| 12                   | 40                      | 24                          | -16              |
| 14                   | 40                      | 24                          | -16              |
| L2                   | 40                      | 25                          | -15              |
| D2                   | 50                      | 30                          | -20              |
| 7                    | 50                      | 30                          | -20              |
| 8                    | 50                      | 30                          | -20              |
| 9                    | <b>50</b>               | <b>30</b>                   | <b>-20</b>       |
| 3                    | <b>50</b>               | <b>32</b>                   | <b>-18</b>       |
| 13                   | <b>50</b>               | <b>32</b>                   | <b>-18</b>       |
| S                    | <b>36</b>               | <b>36</b>                   | <b>0</b>         |
| 6                    | <b>50</b>               | <b>36</b>                   | <b>-14</b>       |
| A / A2               | <b>40</b>               | <b>30</b>                   | <b>-10</b>       |
| 4                    | <b>45</b>               | <b>48</b>                   | <b>3</b>         |
| 10                   | <b>80</b>               | <b>48</b>                   | <b>-32</b>       |
| 2                    | <b>50</b>               | <b>60</b>                   | <b>10</b>        |
| 5                    | <b>50</b>               | <b>80</b>                   | <b>30</b>        |
| Q                    | <b>50</b>               | <b>108</b>                  | <b>58</b>        |
| C                    | <b>120</b>              | <b>112</b>                  | <b>-8</b>        |
| W / W2 / 1           | <b>180</b>              | <b>144</b>                  | <b>-36</b>       |
| H / H2 / H3          | <b>160</b>              | <b>144</b>                  | <b>-16</b>       |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 40 - Comparação da disposição das caixas nos paletes

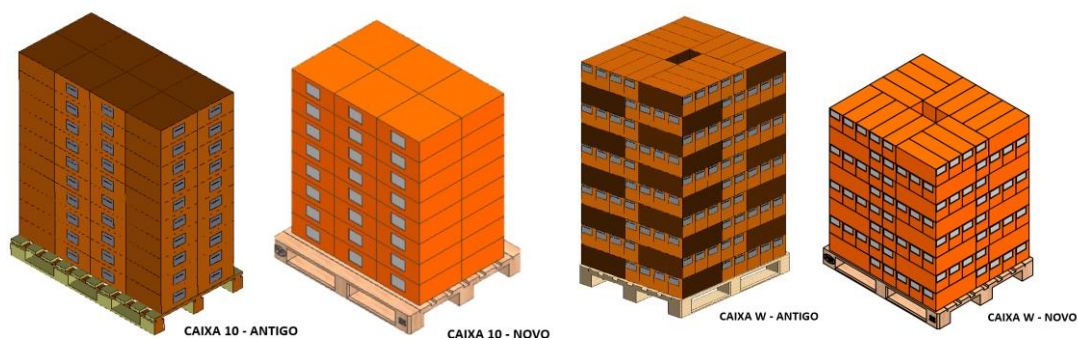
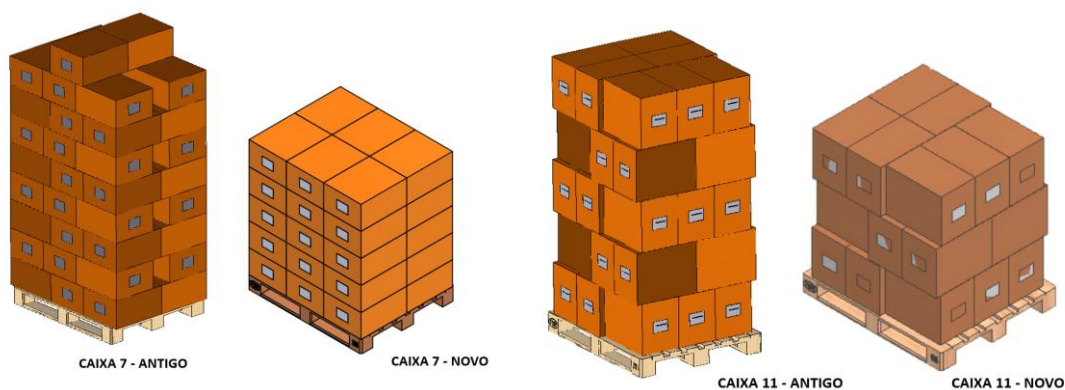


Figura 41 (Continuação) - Comparação da disposição das caixas nos paletes



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A unitização exigiu a criação de um processo de embalagem. O posto de embalagem conta com duas principais etapas: inspeção e conferência da quantidade de caixas no paletes e a etapa de colocação das cantoneiras e aplicação do filme *stretch* (Ver Figura 42). As atividades são realizadas em conjunto por dois operadores. Por fim eles são armazenados no porta-paleta para aguardar o início do embarque.

Figura 42 - Processo de unitização do paleta



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Com a inclusão destas etapas, teve-se a alteração no layout fabril, conforme demonstrado na Figura 43. A princípio esta área comporta até 16 paletes que serão inspecionados e unitizados pelos operadores do posto.

Figura 43 - Evidência do Antigo e Novo posicionamento de PAs não embalados na fábrica



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Anteriormente, a armazenagem do produto acabado era realizada de forma descentralizada em quatro estoques distribuídos pela planta fabril. Com a disponibilização de uma nova área centralizada com porta-paletes dedicada ao armazenamento, dotado de 144 slots distribuídos em três níveis (Figura 44), destinados à estocagem dos paletes após a etapa de embalagem. Essa reorganização permitiu a transição para um processo de embarque paletizado, promovendo maior padronização e eficiência logística.

Figura 44 - Área de Porta-paleta/estoque da Expedição da Fábrica



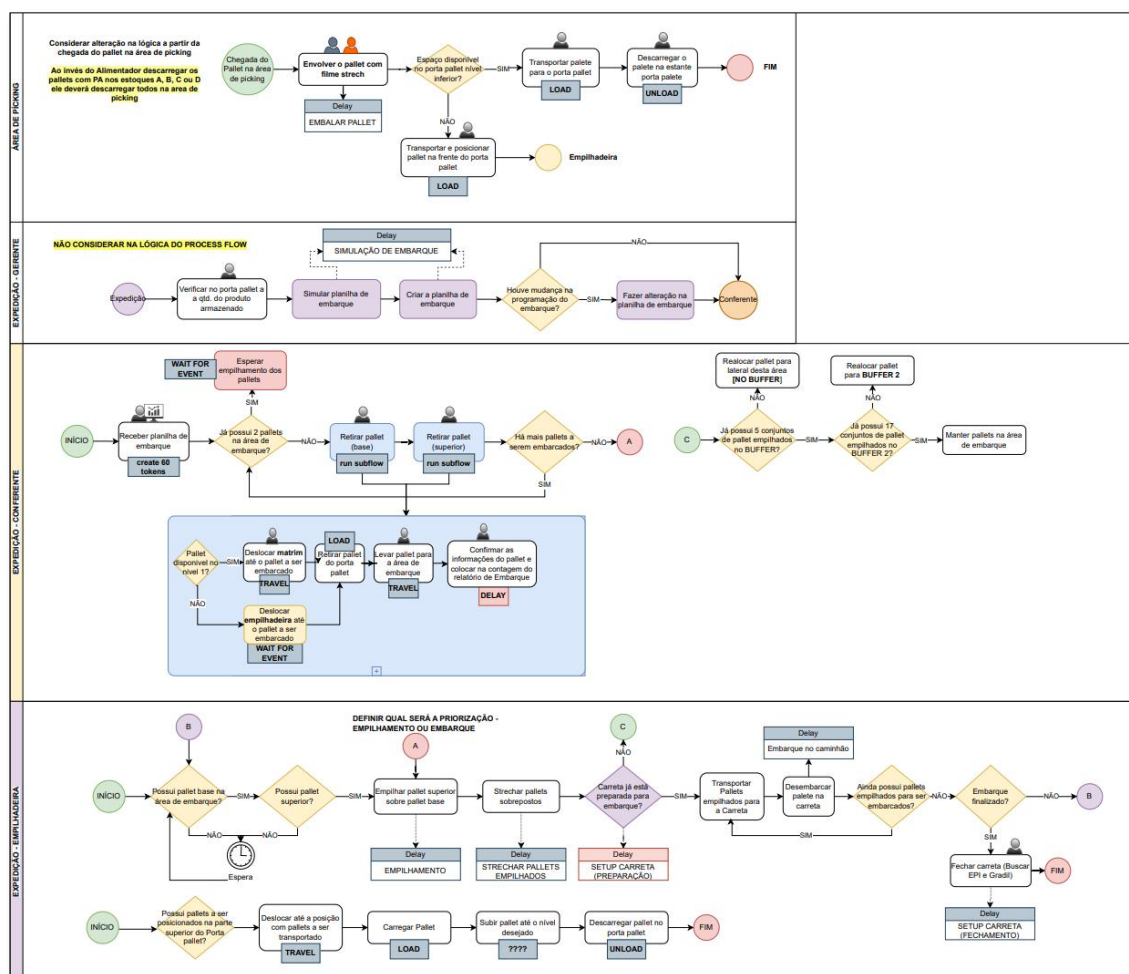
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Em resumo adicionou-se alguns parâmetros ao cenário atual tais como ilustra a Quadro 4. O modelo conceitual absorveu tais parâmetros. A reconstrução do modelo exigiu acompanhamento em chão de fábrica para coleta de dados e compreensão das novas etapas, resultando em uma nova versão conforme encontra-se na Figura 45.

Quadro 4 – Parâmetros adicionais do modelo para o Cenário 1

| Áreas         | Parâmetros adicionadas                                                                                                                                                                                                |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PRODUÇÃO      | Nova taxa de saída de PA por máquina, considerando a nova organização de caixas nos paletes.                                                                                                                          |
| ARMAZENAMENTO | Unitização dos paletes: criação de uma nova área de armazenamento dos PA em processo de unitização.<br>Padronização do espaço utilizado para o armazenamento de paletes já inspecionados.                             |
| EXPEDIÇÃO     | Alteração na lógica para permitir o máximo de embarques possíveis por dia, de acordo com o estoque disponível.<br>O embarque teve seu tempo de duração reduzido em razão da unitização das cargas (carga paletizada). |

Figura 45 - Modelo Conceitual do Cenário 1 – Paleta Unitizado



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para a tabulação dos dados referentes ao processo de unitização, foi realizada a análise dos registros em vídeo obtidos durante as visitas à planta fabril. Os tempos coletados estão apresentados na Tabela 6.

Ainda na Tabela 6, apresentam-se os dados referentes ao processo de embarque, considerando as seguintes atividades:

- Empilhamento dos pallets, executado pelo operador de empilhadeira com o apoio do conferente;
- Aplicação de *stretch film* nos pallets empilhados, realizada pelo operador da área de expedição;
- Embarque dos pallets na carreta/caminhão, realizado por meio da empilhadeira.

Os novos dados inseridos no modelo foram:

Tabela 6 - Dados de entrada do Cenário 1

| Atividade                                                       | Amostras | Tempo Médio (s) |
|-----------------------------------------------------------------|----------|-----------------|
| Embalar pallet (área de embalagem– operadores)                  | 7        | 233,29          |
| Conferência automática do Palete (SmartLog)                     | 7        | 30              |
| Empilhamento de pallets (empilhadeira)                          | 27       | 36,52           |
| <i>Stretch</i> de pallets empilhados (conferente)               | 26       | 28,68           |
| Embarque no caminhão (empilhadeira)                             | 30       | 41,24           |
| <i>Setup</i> – Preparação do caminhão (operador)                | 2        | 900,00          |
| <i>Setup</i> – Fechamento do caminhão (empilhadeira + operador) | 2        | 769,50          |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

#### 4.2.1. Modelo Computacional - Cenário 1

Como o modelo do Cenário 1 constitui uma adaptação do modelo do cenário 0, representativo da situação atual da empresa, mantiveram-se as informações previamente analisadas e tabuladas para os processos que permaneceram inalterados.

O desenvolvimento do Modelo de Simulação Computacional do Cenário 1 também utilizou as ferramentas *Process Flow*, *Model 3D*, *Global Tables*, *Groups*, *Time Tables*, *Dashboard* e parâmetros do *software* de simulação de eventos discretos Flexsim®.

##### 4.2.1.1. Alimentador

Para as atividades referentes ao Alimentador manteve-se a lógica construída no modelo computacional do cenário atual. O único ajuste realizado nessa lógica foi a localização de descarregamento dos paletes com PA oriundos da produção, que passou a ter um novo local definido. O antigo e o novo local de descarregamento de PA realizado pelo alimentador pode ser visto na Figura 43.

##### 4.2.1.2. Embalagem

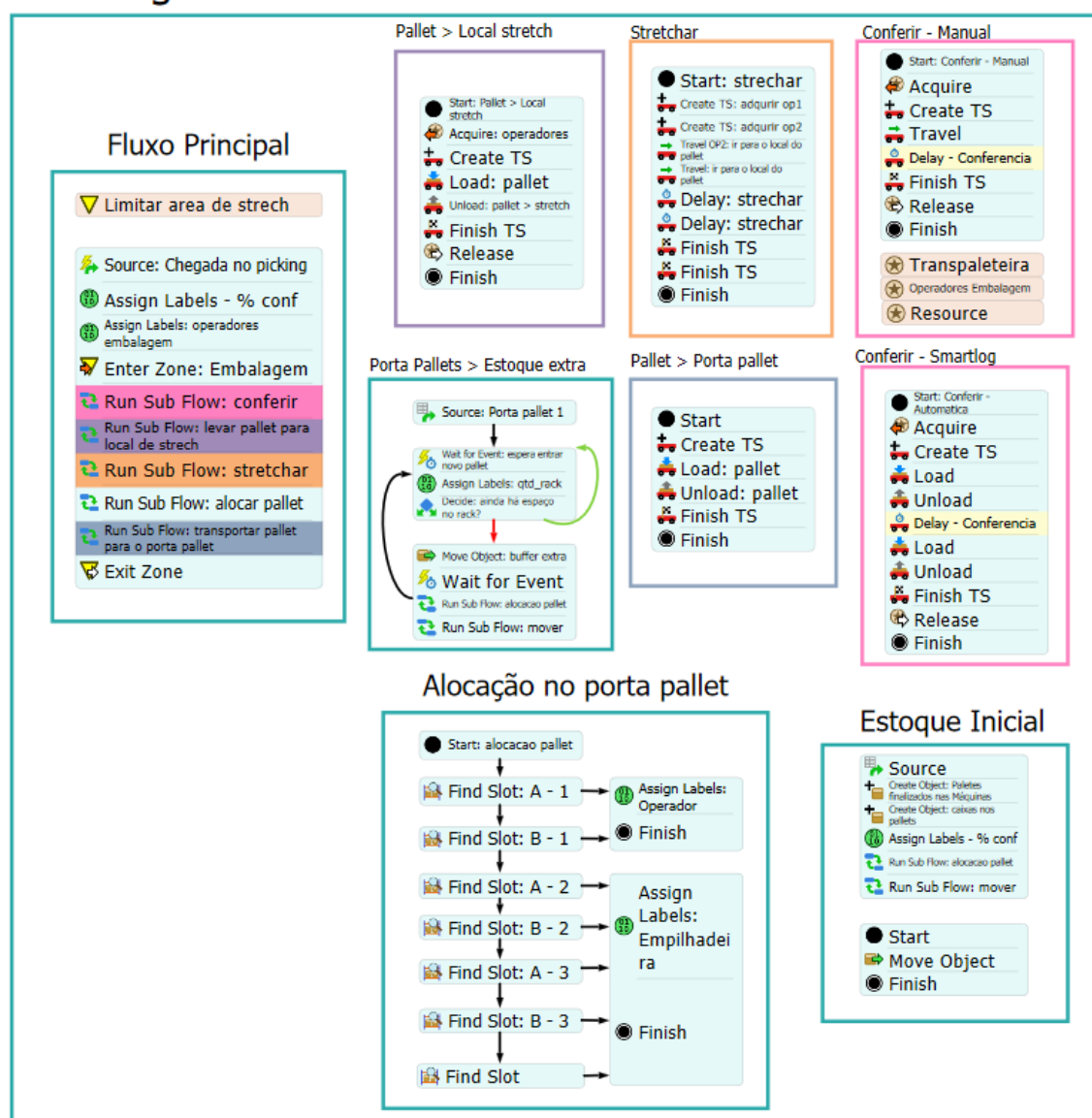
A embalagem possui gatilho de início das atividades toda vez que chegam novos paletes da embalagem no estoque. Posteriormente é decidido se a conferência será feita de forma manual ou automática na máquina SmartLog. Tal informação é carimbada em uma *label* no *Assign Label*.

Da mesma forma é carimbado os dois operadores que irão realizar, em conjunto, o processo de embalagem. Para isso, foi utilizado um *Zone* para limitar em 1 a quantidade de paletes embalados por vez conforme visto na Figura 46 mas especificamente no fluxo principal.

A etapa seguinte é um a lógica de conferência realizada por um *SubFlow*, ele destina o *token* de ativação de lógica conforme a *label* de tipo de conferência carimbado anteriormente, se o conteúdo da *label* for 1 ele executará a lógica de conferência automática e se for 2 a conferência será de forma manual (Ver Figura 47)

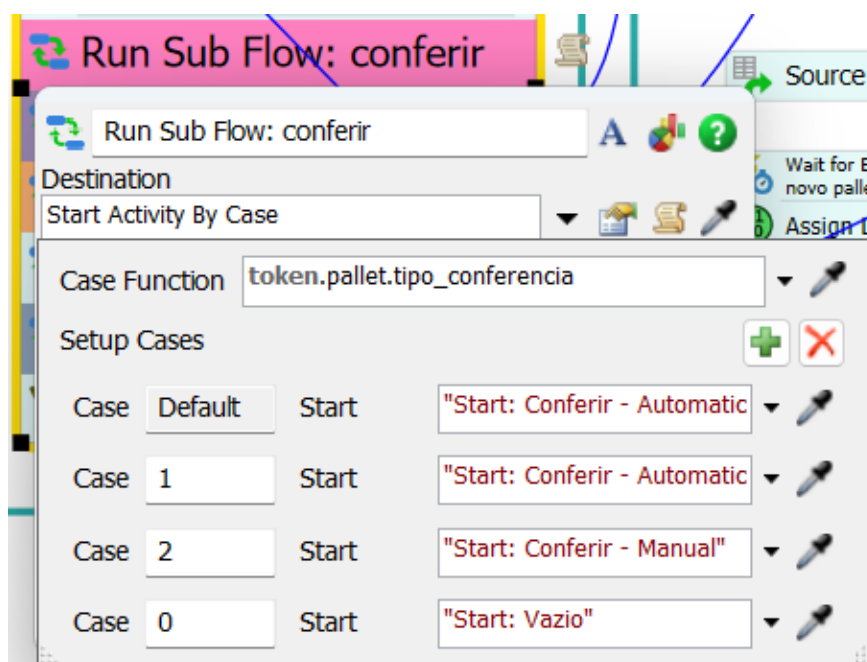
Figura 46 - *Process flow* com a lógica principal de embalagem do cenário 1

## Embalagem



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 47 - Configuração do Run Sub Flow de Conferência (by Case)



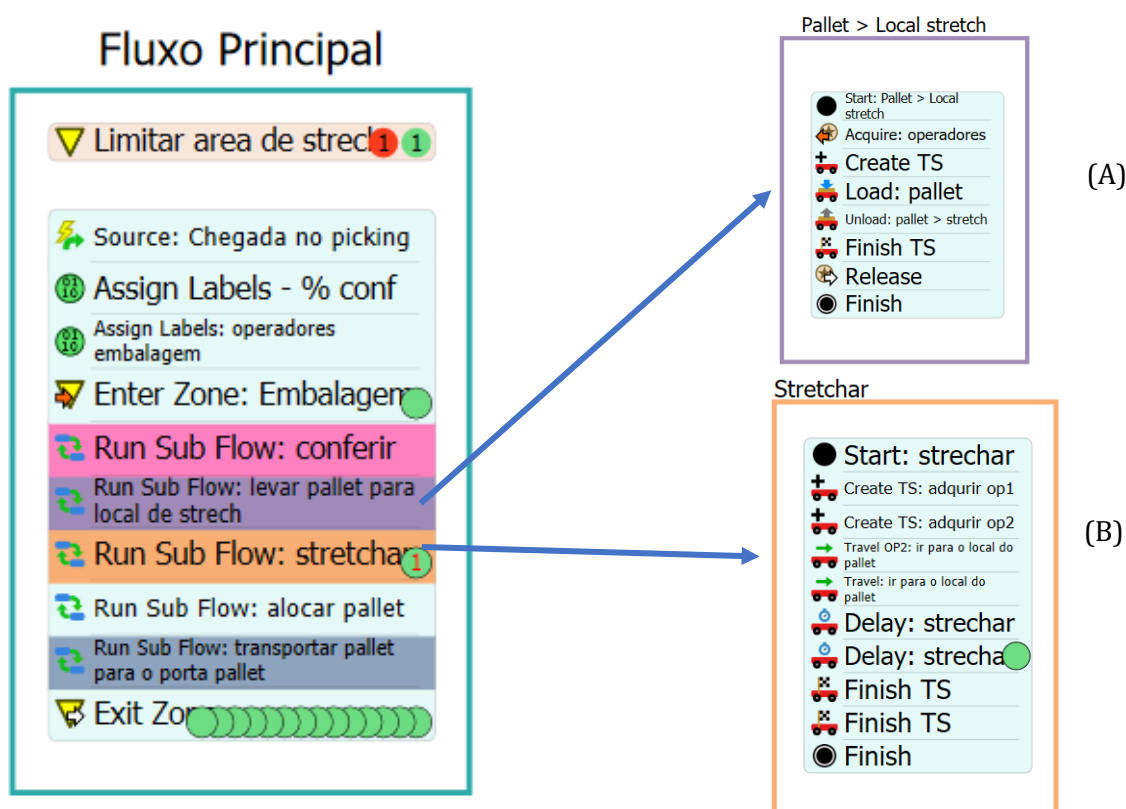
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

As respectivas lógicas de conferência manual e automática podem ser vistas na Figura 48, mais especificamente nos blocos de cor rosa (Conferir -Manual e Conferir – Smartlog). As lógicas são semelhantes sendo a principal diferença entre elas o tempo de conferência e o local em que ela é realizada. A conferência manual realizada no próprio posto de embalagem e a conferência automática realizada dentro da máquina Smartlog, posicionada ao lado. Os tempos de cada uma das conferências são configurados nos parâmetros do modelo.

O processo seguinte trata-se do transporte do palete para o local de *stretch* conforme visto na Figura 48 (A), e posteriormente realizado o processo de estrechar, visto na Figura 46 (B).

Tal como relatado anteriormente, este processo é realizado por dois operadores em conjunto. Dessa forma o *Sub Flow* possui a duplicação dos blocos de *Create TS*, *Travel*, *delay* e *Finish TS*, um para cada, executado paralelamente para não ocorrer o erro de duplicação do tempo. Um operador irá ditar o ritmo desse processo através da configuração “*Wait Until Complete*” que retém o token até a finalização da atividade.

Figura 48 - Sub Flow de Transporte e Stretch

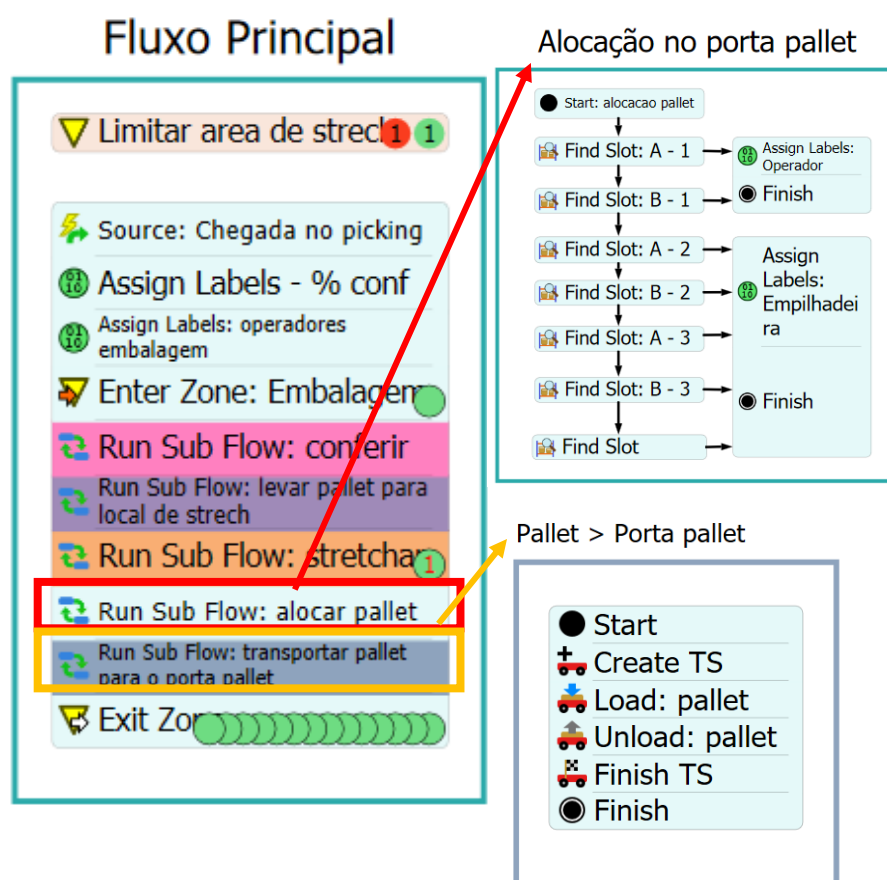


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Por fim o processo de embalagem conta com o transporte do palete unitizado para o porta-paleta posicionado próximo a saída de carga da fábrica. A lógica contou com a alocação de paletes no primeiro nível (chão) realizado pelos próprios operadores da embalagem com o auxílio da transpaleteira convencional, e em casos de alocação no segundo e terceiro nível ele é realizado pela empilhadeira com seu respectivo operador.

Como mostra a Figura 49, o “Run SubFlow: Alocar paleta” verifica a disponibilidade do porta-paleta através do *Find Slot* para os níveis e ambos porta-paletes. Se houver disponibilidade no nível 1, é carimbado a informação da disponibilidade no token do operador alimentador, que irá realizar o transporte. Caso só tenha disponibilidade nos níveis 2 e 3, é carimbado no *token* do operador da empilhadeira. Selecionado o operador responsável pelo transporte. O “Run Sub Flow: transportar paleta para o porta-paleta” executa a lógica do transporte em si.

Figura 49 - Lógica de Definição do operador para transporte de PA unitizado e realização do transporte



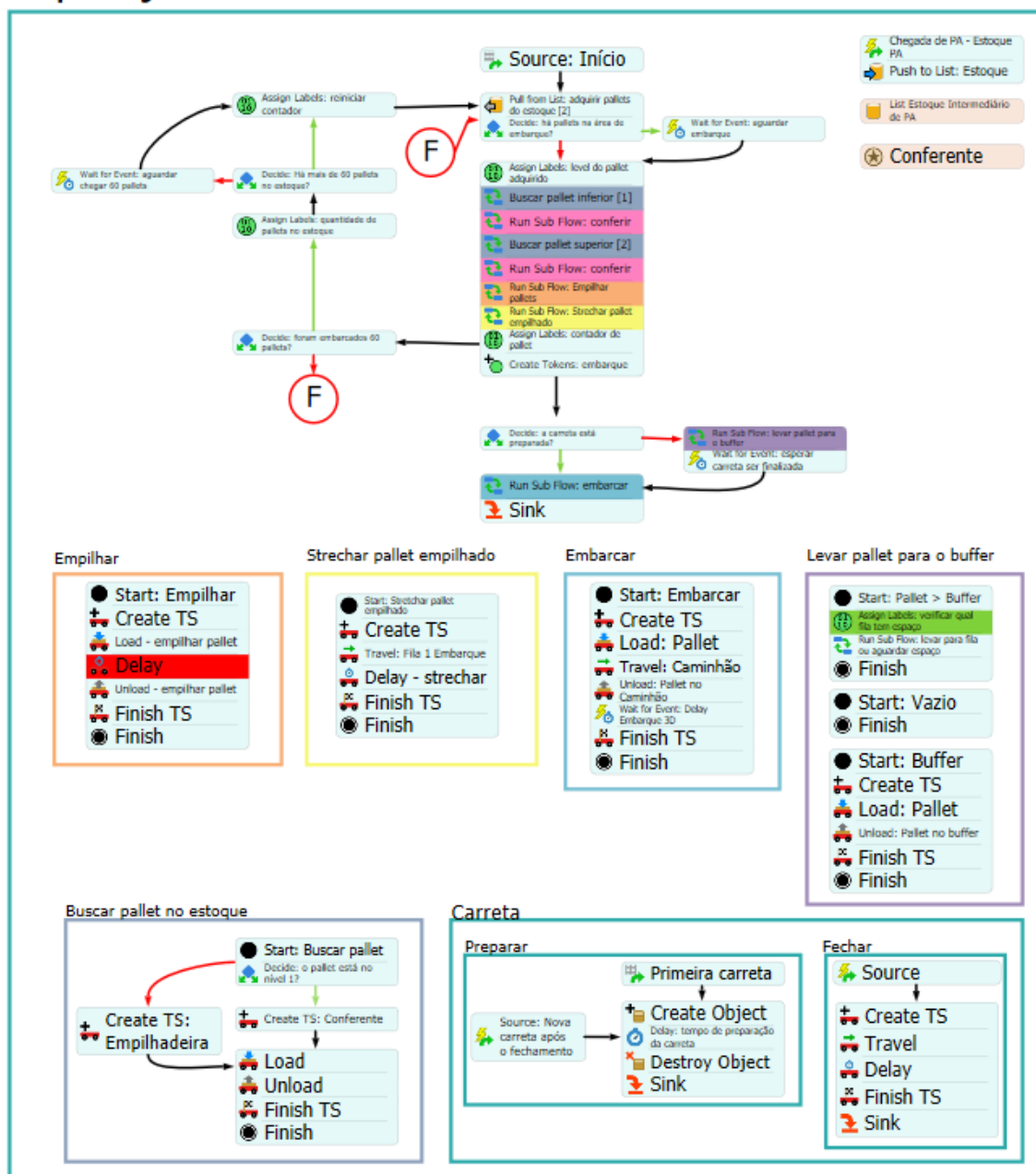
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

#### 4.2.2. Expedição

A lógica de expedição também passou por grandes modificações em relação ao modelo computacional anterior, visto que a carga passou a ser unitizada e empilhada antes do embarque. Assim como as demais lógicas, a da expedição foi organizada com um bloco de fluxo principal e outros blocos em *SubFlow* contendo as lógicas detalhadas dos processos em questão. Conforme visto na Figura 50.

Figura 50 - Lógica com o Fluxo Principal Expedição

## Expedição



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Nesse modelo, adotou-se um *token* único de ativação que circula sequencialmente pelos blocos subsequentes ao *Source*. Ao concluir o ciclo, o token retorna ao início da lógica, reiniciando o processo. O sistema inicia com 100 paletes unitizados armazenados nos porta-paletes.

A lógica da expedição só é acionada quando o estoque atinge pelo menos 60 paletes, correspondendo à capacidade máxima de uma carreta. O controle da quantidade em estoque é

realizado por meio de uma lista que armazena as informações individuais de cada palete, bem como o total disponível.

Uma vez que o paleta está registrado na lista, o processo de expedição é iniciado com um *Pull from List* para recuperar seus dados. Como os paletes são empilhados em pares, a operação recupera as informações de dois paletes por vez. Em seguida, um bloco *decide* verifica se há paletes na área de empilhamento. Caso não existam, o fluxo segue normalmente; caso contrário, o sistema aguarda a remoção desses paletes por um operador de empilhadeira em um processo paralelo. Posteriormente, um *Assign Label* é utilizado para registrar as variáveis "*Queue\_Embarque*", "*palette1\_level*" e "*palette2\_level*", que serão empregadas nos *SubFlows* em etapas posteriores.

Após feito todo esse processo de verificação do estoque, acesso as informações do paleta e carimbo das informações no *token*, é iniciado a busca pela localização do paleta nos níveis do porta-paleta (inferior ou superior) de forma que caso esteja no nível do térreo o conferente irá o transporte do paleta e caso esteja nos níveis superiores o operador com a empilhadeira que irá transportar, conforme visto no bloco “Busca paleta no estoque” da Figura 50.

Após os paletes serem posicionados na área de empilhamento para embarque, é executado os dois *subflows* referente a empilhamento e *Stretch* dos paletes empilhados. Os recursos utilizados são a empilhadeira e o conferente respectivamente (Ver blocos “Empilhar”, na cor laranja, e “Strechar paleta empilhado” da Figura 50).

Finalizado os processos anteriores é utilizado uma *label* contadora responsável por controlar a quantidade de paletes que já foram empilhados e embarcados uma vez que o embarque se encerra com 60 paletes como destacado com retângulo vermelho Figura 51.

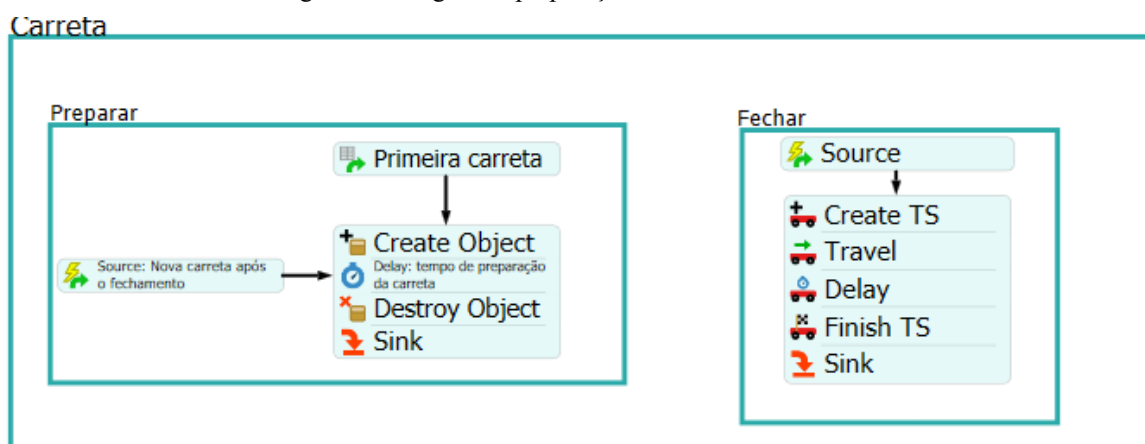
Ainda na Figura 51, retângulo azul, possui um *decide* que verifica, antes de iniciar o embarque, se a carreta já finalizou o *setup*. Caso não esteja pronta, ativa-se a lógica de transporte para um buffer próximo a saída da fábrica e assim que a carreta for liberada, os paletes são embarcados na carreta.

Figura 51 – Lógica no *Process Flow* do processo de Embarque

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

As lógicas do setup de preparação da carreta e o processo de fechamento da carreta podem ser visualizadas na Figura 52.

Figura 52 - Lógica de preparação e fechamento da carreta



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

#### 4.2.3. Resultado da Simulação - Cenário 1

Os resultados obtidos a partir da simulação do Cenário 1 possibilitaram a geração de dados representativos do comportamento do sistema de logística interna, ainda na fase inicial de implementação no chão de fábrica do processo de unitização de carga. Tais dados constituíram a base para a construção de cenários subsequentes, nos quais se incorporaram tecnologias associadas à Indústria 4.0 e proposição de um novo layout como estratégias para a otimização do fluxo logístico.

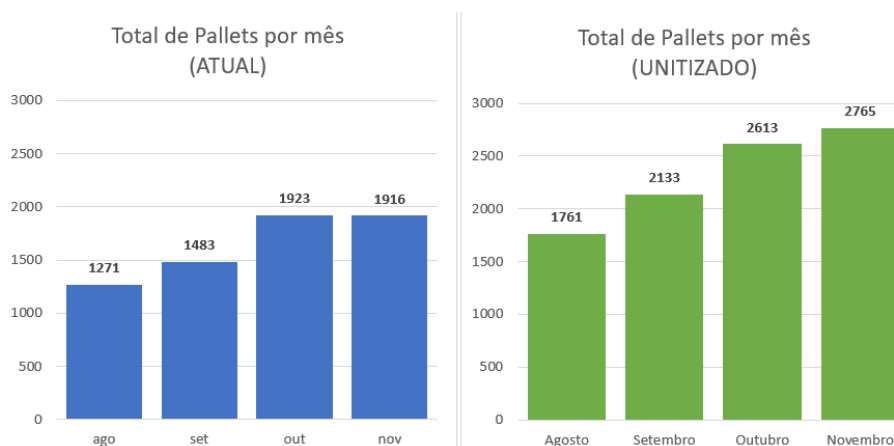
Os dados de saída do modelo computacional serão apresentados de forma estruturada, de modo a permitir a estimativa da capacidade das áreas de embalagem e expedição, bem como a análise dos níveis de estoque tanto na área de embalagem quanto nos porta-paletes.

Como resultado, busca-se determinar o número de turnos ideal para o setor de embalagem levando em consideração a limitação da capacidade de armazenamento dos porta-paletes, fixada em 144 espaços de armazenamento.

#### 4.2.4. Análise do Produto Acabado

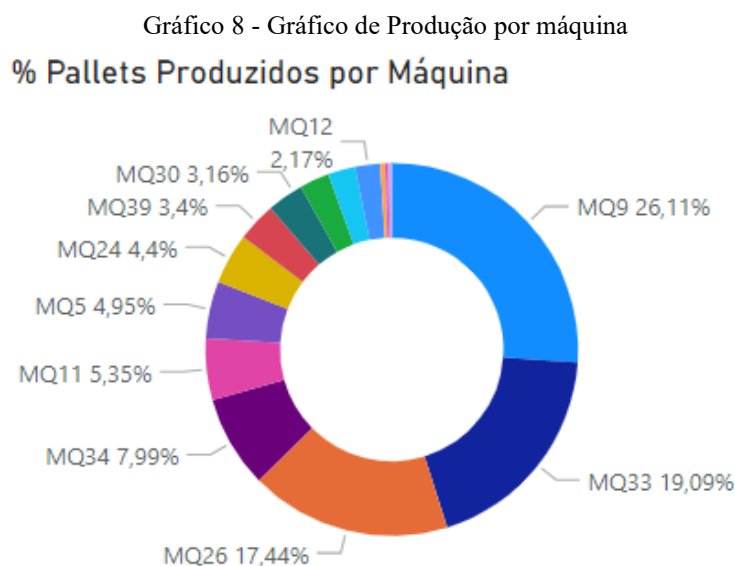
O cenário 1 apresentou um aumento na quantidade da saída de paletes comparada ao cenário Atual (Cenário 0). O aumento se deu pelo fato da unitização diminuir a quantidade de caixas por palete, conforme visualizado no Gráfico 7. A produção total do período de agosto a novembro de 2022 alcançou 9276 paletes de produto acabado, com uma média de 83,57 paletes por dia ou 4,72 paletes por hora. A produção máxima diária atingiu 151 paletes, com uma taxa máxima de 11 paletes por hora.

Gráfico 7 - Gráfico comparativo de produção total de paletes por mês do Cenário Atual e Cenário 1



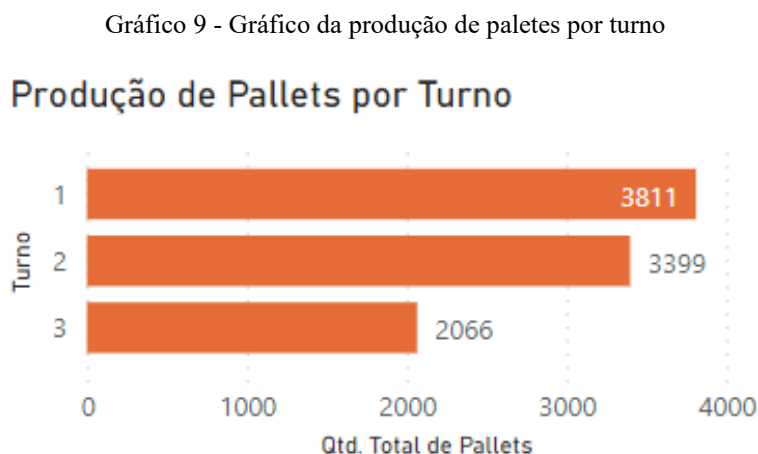
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Ao correlacionar a quantidade produzida com as máquinas, observa-se que as máquinas 9, 33, 26, 34, 11 e 5 são responsáveis por aproximadamente 80% da produção total.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os Gráfico 9 e 10 ilustram que o primeiro turno apresenta a maior produção comparada aos demais turnos, sendo notável que o terceiro turno registra uma diferença na produção de 46% se comparado ao primeiro turno. As possíveis causas observadas para esse fenômeno incluem a inatividade de determinadas máquinas no terceiro turno nos quatro meses analisados, em função da menor demanda associada aos produtos nelas fabricados, quando comparados àqueles produzidos em outras máquinas. Adicionalmente, destaca-se a baixa produtividade observada no terceiro turno especificamente no mês de agosto.

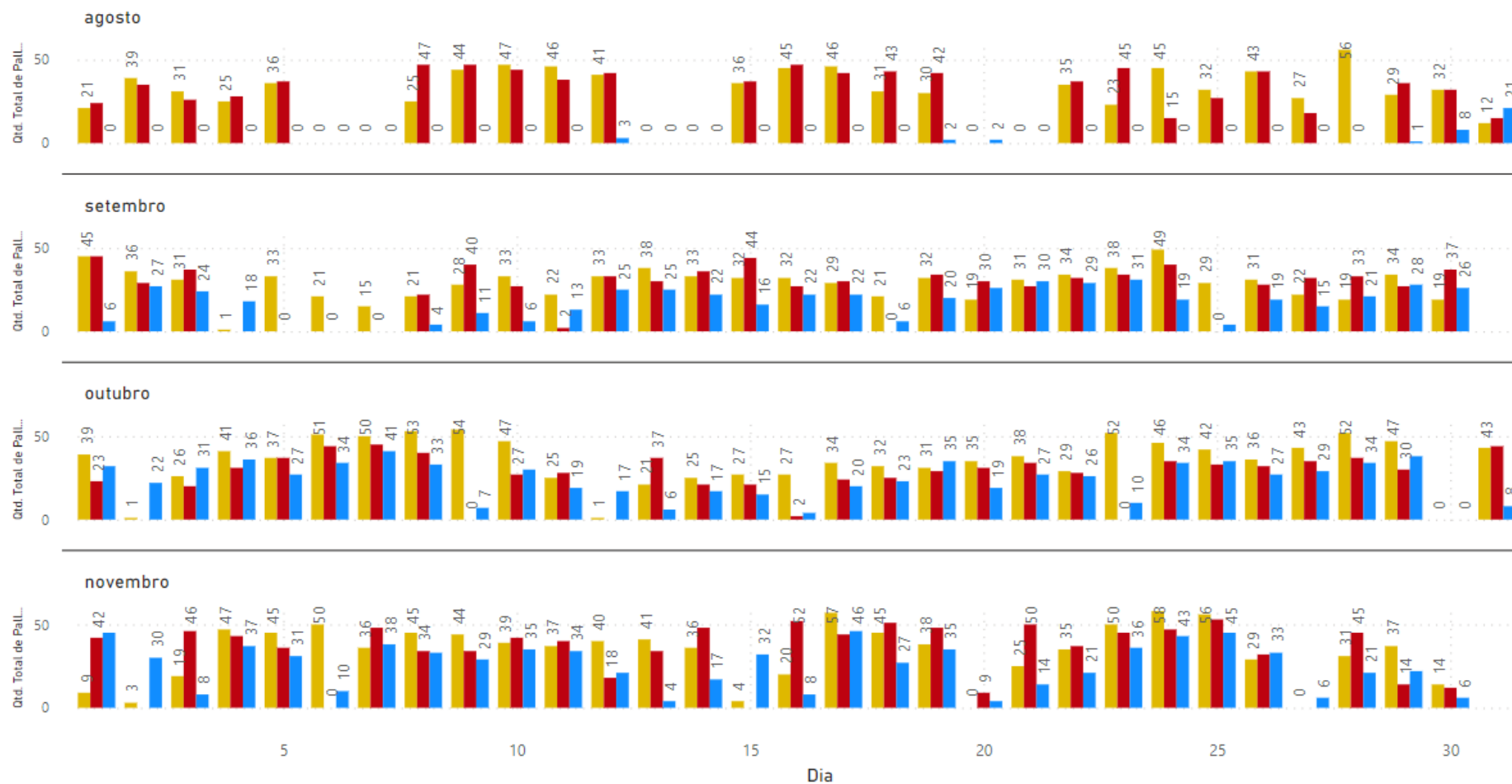


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Gráfico 10 - Gráficos de produção de PA por dia e por turno

## Produção PA por turno

Turno ● 1 ● 2 ● 3



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

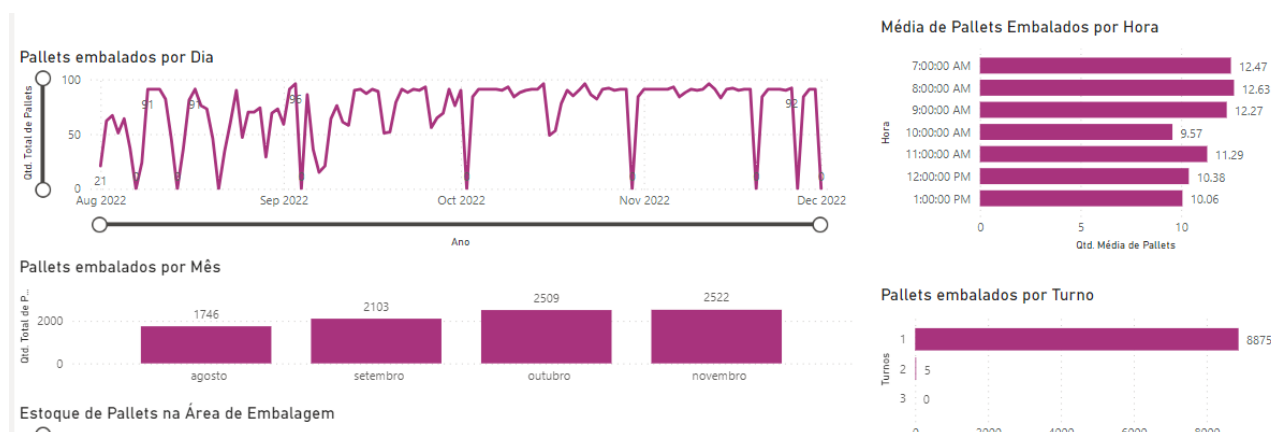
#### 4.2.5. Análise do processo de Embalagem

A seguir serão apresentados os dados de saída do modelo computacional no processo de embalagem e estoque dos porta-paletes. O objetivo é compreender qual é a capacidade de embalagem, os dinamismos dos estoques intermediários e qual é a quantidade de turnos ideal para atender a demanda.

##### 4.2.5.1. 1º Turno:

Ao analisar os gráficos de saída do modelo computacional contidas no Gráfico 11, pode-se determinar que a produção média do setor de embalagem em 1 turno é de 12 paletes/hora (89 paletes/dia), podendo chegar a capacidade máxima de 96 paletes/dia (14 paletes/hora) com base nos dados de produção do mês de novembro, que registrou a produção mais elevada.

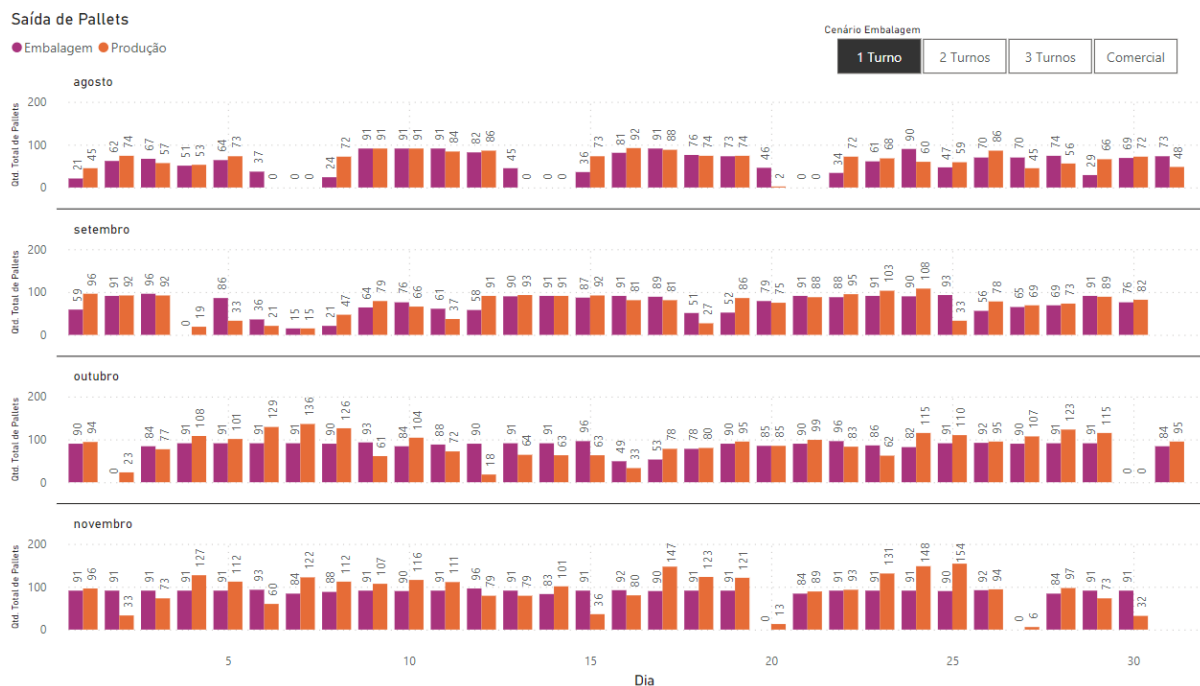
Gráfico 11 - Gráficos de Paletes embalados em 1 turno



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Se compararmos as saídas da produção e da embalagem, no Gráfico 12, é possível constatar que em agosto a operação de embalagem em um único turno atende à produção, considerando que neste mês quase não houve produção no terceiro turno. Já a partir de setembro torna-se evidente que um único turno de embalagem não é suficiente para atender à demanda da produção.

Gráfico 12 - Gráfico comparativo da taxa de saída da Embalagem e Produção de paletes para 1 turno



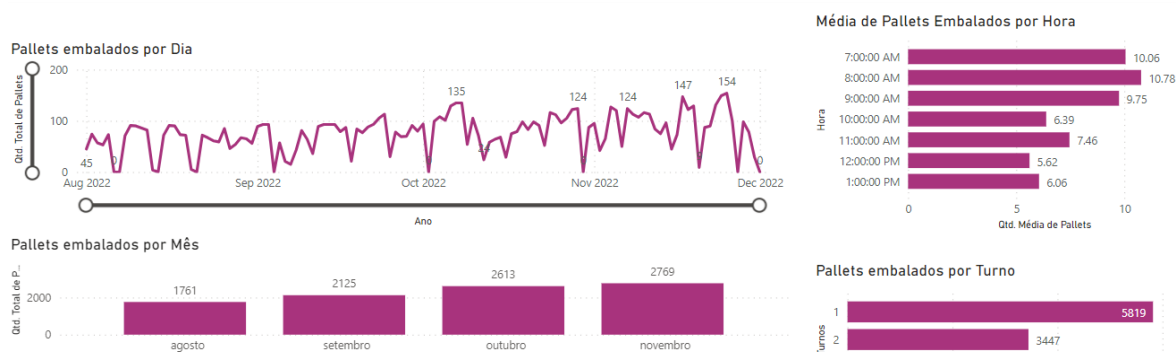
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

#### 4.2.5.2. 2º Turno:

Ao analisar os gráficos de saída do modelo computacional do Gráfico 13, pode verificar que o setor embala em média 98 paletes/dia, o que equivale a 8 paletes/hora – informação obtida a partir do mês de novembro, que registrou a produção mais elevada.

Contudo, pode atingir uma máxima de 154 paletes/dia, equivalente a 14 paletes/hora.

Gráfico 13 - Gráficos de Paletes embalados em 2 turnos

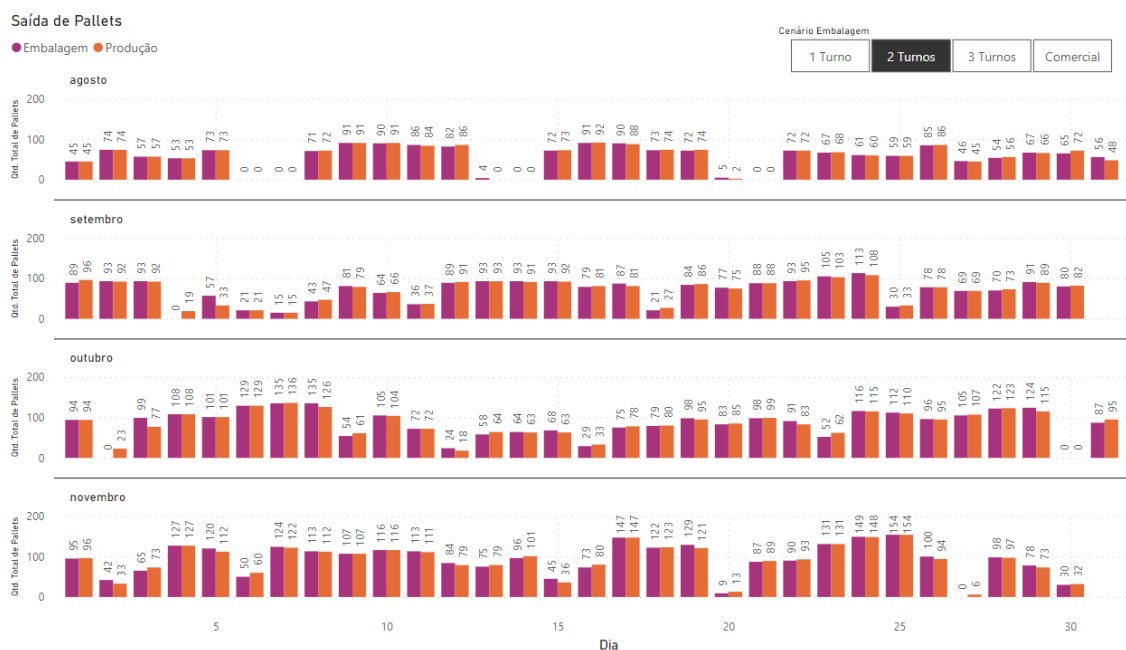


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

No Gráfico 14 é feita a comparação entre a quantidade de paletes produzidos e embalados por dia e categorizado por mês. Destaca-se que dois turnos do setor de embalagem

atende a demanda da produção. Adicionalmente, os dados revelam que o segundo turno do setor de embalagem apresenta significativa ociosidade operacional. Esta conclusão fundamenta-se no volume total processado: enquanto o primeiro turno embalou 5.819 paletes, o segundo turno registrou produção substancialmente inferior, com apenas 3.447 unidades processadas. Tal disparidade quantitativa evidencia subutilização da capacidade da embalagem no período vespertino e dispensa as análises dos gráficos do cenário com 3 turnos de embalagem.

Gráfico 14 - Gráfico comparativo da taxa de saída da Embalagem e Produção de paletes para 2 turnos



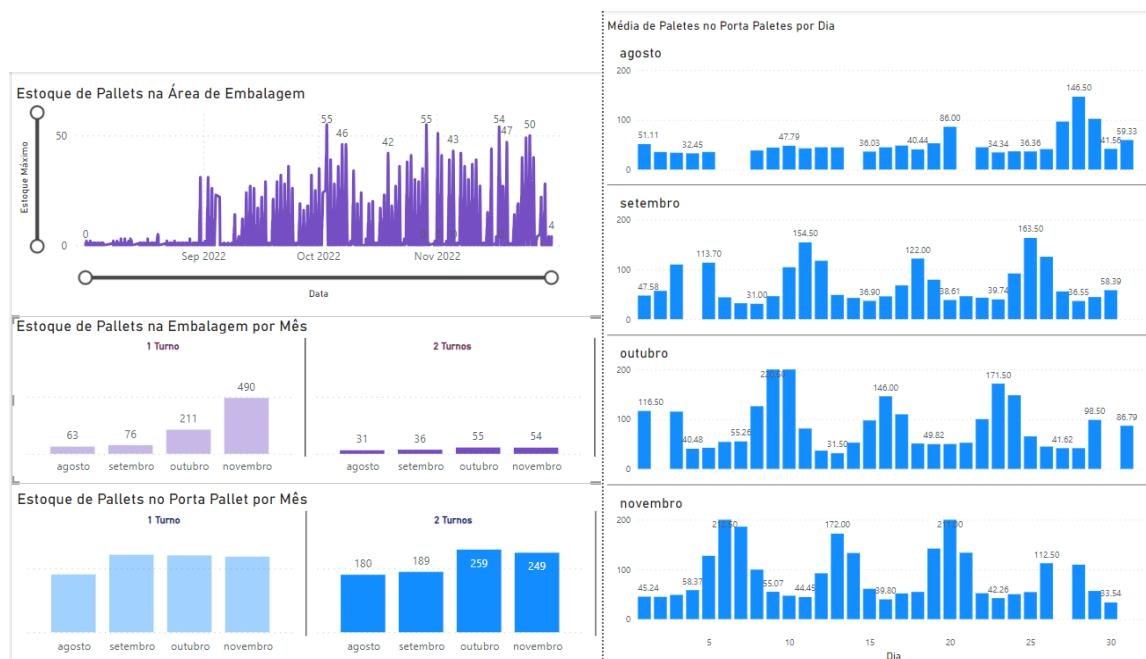
Contudo, ao partir para a análise dos gráficos de estoque (Gráfico 15), constata-se mesmo que a implementação de dois turnos na embalagem resulta em um estoque inferior comparado ao cenário de operação em turno único, o estoque entre a produção e embalagem ainda supera a capacidade de armazenamento da área, fixada em 16 espaços. Em picos, o sistema chega a exigir a acomodação de até 55 paletes de produto acabado. Esse desequilíbrio decorre do acúmulo de produção gerado pelo terceiro turno no qual a embalagem está inativa.

Ao aprofundar as análises no estoque do porta-paleta é possível concluir que na média, o porta-paleta com 144 slots atende a maioria dos dias. Entretanto, observa-se uma exceção significativa durante os finais de semana, quando ocorre um acúmulo considerável de estoque.

Este fenômeno decorre diretamente da operação reduzida do setor de expedição, que

funciona exclusivamente em turno comercial e permanece inoperante nos sábados e domingos.

Gráfico 15 - Gráficos comparativos da média por dia de paletes estocados antes da embalagem para 2 turnos

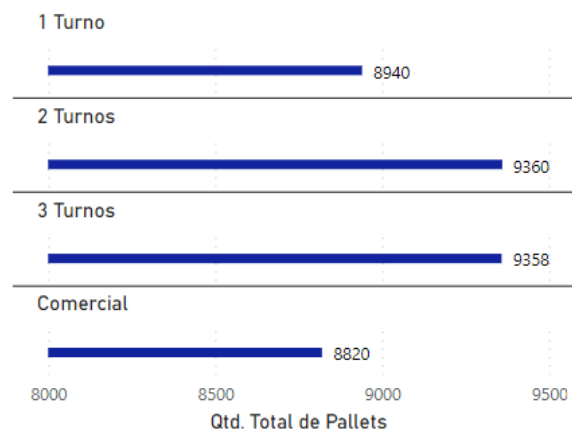


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A alteração do parâmetro relativo aos turnos de trabalho no setor de embalagem exerce influência significativa no fluxo de paletes destinados ao embarque, conforme demonstrado na Figura 48. Observa-se que a operação na embalagem em um turno resulta em um volume de saída de paletes no embarque inferior ao verificado nos cenários com dois e três turnos, evidenciando a relação direta entre a capacidade da embalagem e da expedição.

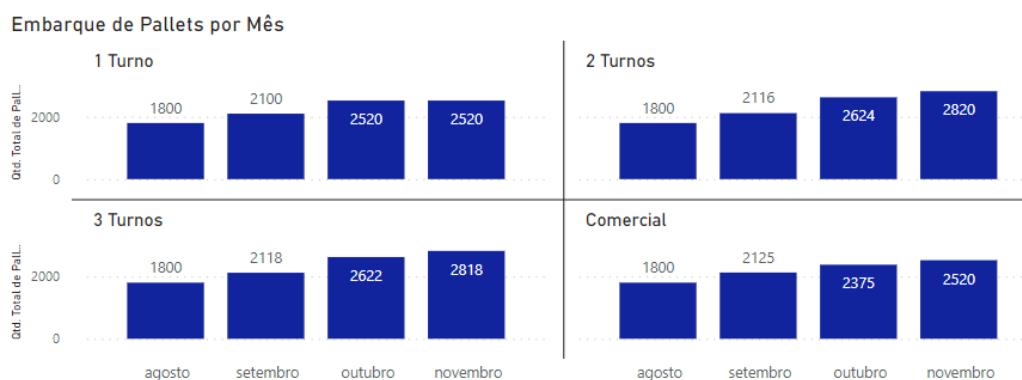
Ao analisar o impacto mensal, observa-se no Gráfico 16 que nos meses agosto e setembro, a saída de paletes é muito próxima entre os cenários. No entanto, a partir do mês de outubro, quando se inicia uma produção mais elevada, os cenários de 1 turno não possuem resultados satisfatórios. E o cenário com 2 turnos é o que apresenta a maior saída.

Gráfico 16 - Total de embarque de paletes nos 4 meses



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Gráfico 17 - Embarque de paletes por turno e por mês



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Ao analisar todas as informações evidenciadas acima é possível concluir que a capacidade média do processo de embalagem é de 12 paletes/hora com máxima de 14 paletes/hora. E capacidade média de embarque é 22 paletes/hora com máxima de 36 paletes/hora.

Tabela 7 - Quantidades de paletes embaladas nos três cenários de turnos

| Qtd de Turnos | Média/ dia | Média/ hora       | Máx./dia    | Máx./hora         |
|---------------|------------|-------------------|-------------|-------------------|
| 1 turno       | 89 paletes | <b>12 paletes</b> | 96 paletes  | <b>14 paletes</b> |
| 2 turnos      | 98 paletes | 8 paletes         | 154 paletes | 14 paletes        |
| 3 turnos      | 98 paletes | 6 paletes         | 152 paletes | 10 paletes        |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 8 - Quantidade de paletes embarcados nos três cenários de turnos

| <b>Qtd de Turnos</b> | <b>Média/ dia</b> | <b>Média/ hora</b> | <b>Máx./dia</b> | <b>Máx./hora</b>  |
|----------------------|-------------------|--------------------|-----------------|-------------------|
| 1 turno              | 72 paletes        | 21 paletes         | 120 paletes     | 35 paletes        |
| 2 turnos             | 73 paletes        | 21 paletes         | 236 paletes     | 34 paletes        |
| 3 turnos             | 76 paletes        | <b>22 paletes</b>  | 237 paletes     | <b>36 paletes</b> |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O número de turnos adequados para o setor de embalagem para o cenário de unitização são 2 (dois) turnos. Com isso, a taxa máxima de paletes aguardando a serem embalados foi de 55 paletes o que gera a necessidade de uma área maior. Esta informação foi relevante para na construção do novo layout a ser detalhado no Cenário 3 deste projeto.

Já o estoque de paletes no porta-paletes, teve uma média de 78 paletes/dia durante a semana e 131 paletes/dia nos finais de semana. Com máxima de 294 paletes em um dia no mês de outubro. Esses dados foram relevantes para o estudo pois a primeira sugestão é o aumento futuro da capacidade do porta-paleta hoje limitada em 144 *slots*.

#### 4.3. CENÁRIO 2 – SOLUÇÃO TECNOLÓGICA

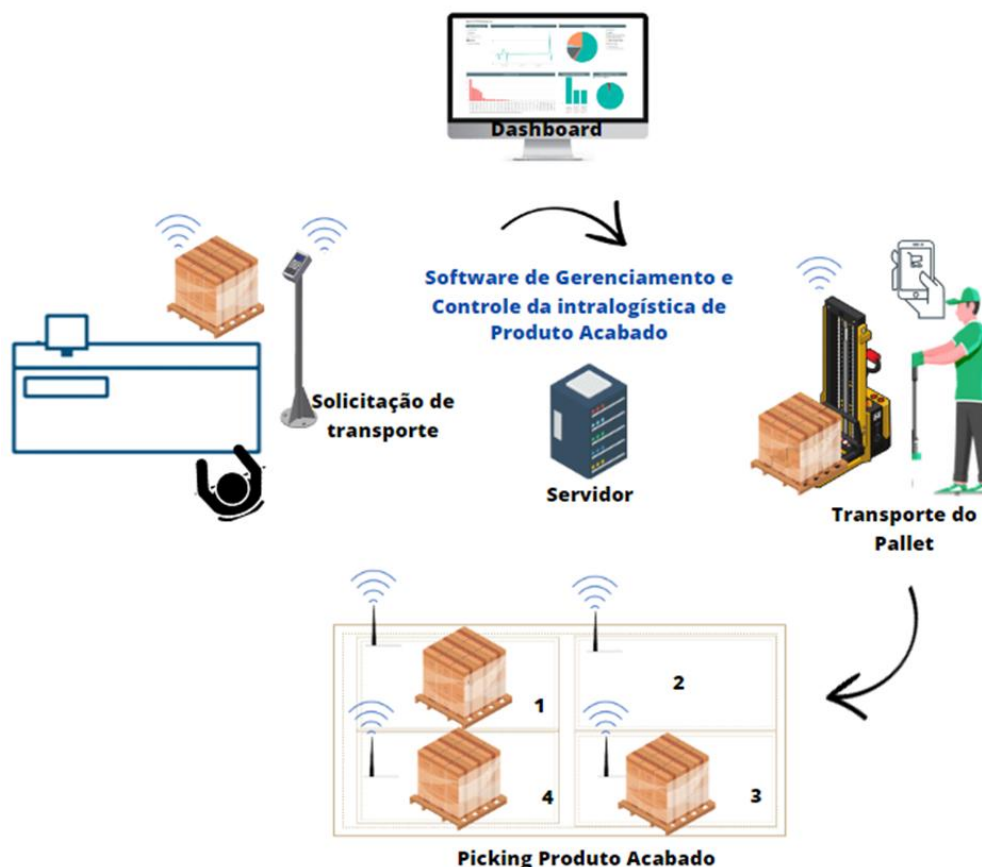
##### 4.3.1. Solução Tecnológica

O cenário 2 é responsável por avaliar o impacto da implementação de um conjunto de tecnologias da Indústria 4.0 denominado “Solução Tecnológica”, visando mitigar os pontos negativos verificados no cenário atual e de unitização.

Esta solução é composta por uma transpaleteira elétrica adaptada, por um sistema de hardware e software para sinalização e identificação de paletes por meio da tecnologia de RFID, por uma área de armazenamento temporária inteligente com recursos de rastreabilidade de mercadorias e por um software de gerenciamento e controle do transporte interno, permitindo o armazenamento de dados do processo de logística e possibilitando análises, por meio de relatórios, para uma tomada de decisão mais assertiva.

O sistema será capaz de exibir informações, em tempo real, de produtos acabados empilhados em paletes, de gerar rastreabilidade (registros) destes produtos, incluindo as fases de fabricação, transporte e de armazenamento endereçável dinâmico. O esboço da arquitetura é visto na Figura 53 e uma breve descrição de cada elemento da arquitetura é em seguida apresentada.

Figura 53 - Arquitetura inicial da solução



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

#### 4.3.1.1. Transpaleteira elétrica

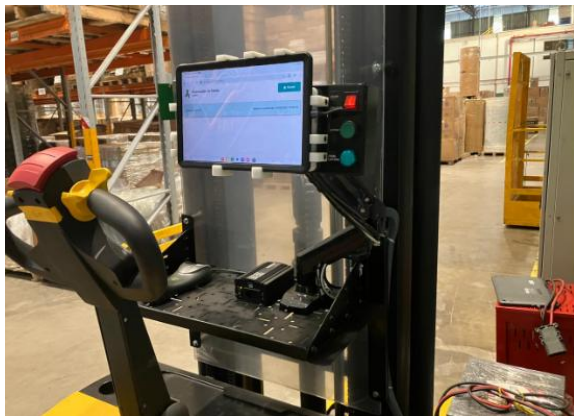
A fim de reduzir o desgaste físico do alimentador, foi adicionado ao processo uma transpaleteira elétrica adaptada para a movimentação inteligente de paletes. O equipamento será operado pelo alimentador de produção e contará com tecnologias embarcadas como leitor de código de barras, de leitor de Tags RFID, de sensores e sistema de alarmes, tablet com acesso ao software de gerenciamento controle da intralogístico. Sua alimentação se dará por baterias recarregáveis com capacidade de 324 Ah.

Tal solução permitirá a coleta de informação sobre a taxa de ocupação do transporte interno e sobre os tempos de movimentação dos paletes entre as máquinas e a área de armazenamento. Outro benefício é a redução do desgaste físico do operador ao transportar os paletes, que podem pesar até 1,1 toneladas quando utilizado o transpaleteira convencional.

Ademais, o estudo de modelagem e simulação além de mensurar os possíveis benefícios citados no parágrafo anterior, permitirá estimar o nível de utilização da bateria da

transpaleteira, calculando seu consumo durante o processo fabril, visando otimizar as trocas de bateria.

Figura 54 – Leitor de código de barras e tablet com o sistema instalados na transpaleteira



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 55 – Leitor RFID posicionado na parte frontal do transpaleteira.

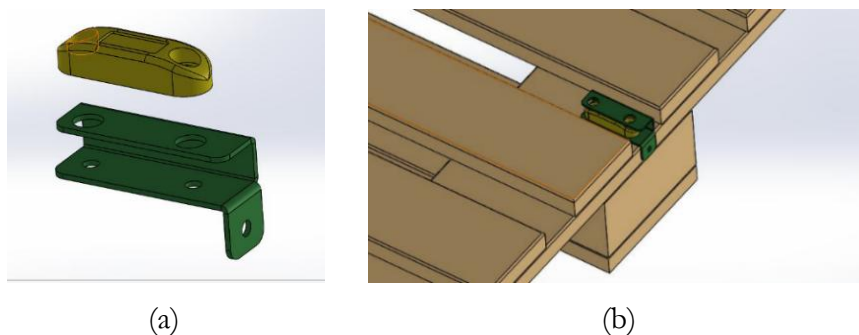


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

#### 4.3.1.2. Sinalização e identificação de paletes

O palete será identificado a partir de uma Tag RFID única, colocada pelo operador da máquina em uma área especificada no palete (Ver Figura 56). Assim que o empilhamento das caixas no palete finalizar, o operador acionará uma botoeira no dispositivo instalado no ponto de coleta, que enviará a sinalização ao Software de gerenciamento (Ver Figura 57).

Figura 56 - (a) Ilustração da TAG e do suporte da TAG. (b) Fixação da TAG no palete



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 57 - Gabinete do dispositivo de solicitação de coleta (a) protótipo (b) instalado no posto



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

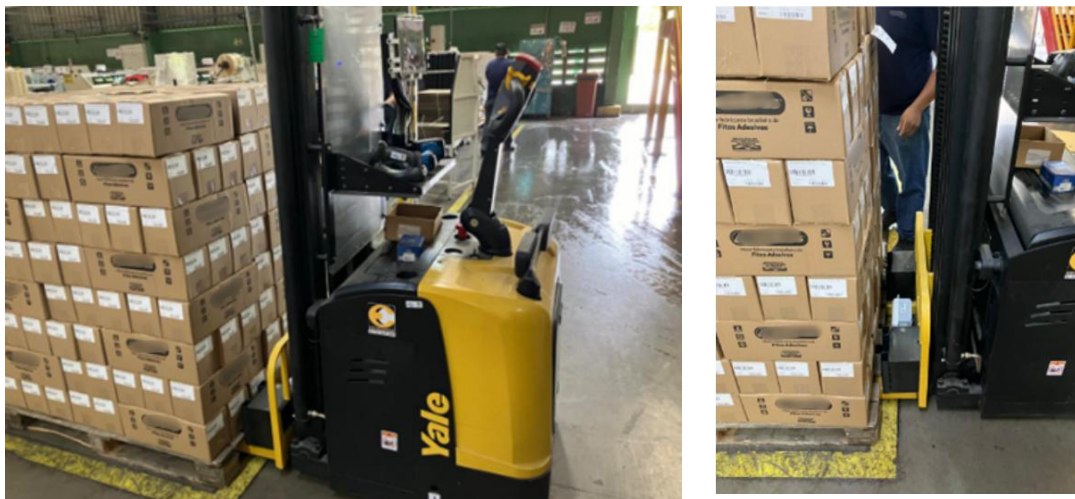
A solicitação de coleta (chamado) será exibido em monitores instalados estrategicamente na fábrica e na tela do tablet da transpaleteira (Ver Figura 58). Quando o alimentador chegar na máquina para retirar o paleta, ele irá ler o código de barras da caixa de embalagem, para que haja a identificação do produto e associação ao código RFID do paleta, que é lido automaticamente por um leitor RFID presente na transpaleteira (Ver Figura 59).

Figura 58 - Dashboard de Requisições de Coleta

| Dashboard de Coleta |                            | Atualizado em 16:12 |
|---------------------|----------------------------|---------------------|
| Posto de coleta: 12 | Hora da solicitação: 09:32 |                     |
| Posto de coleta: 3  | Hora da solicitação: 06:14 |                     |
| Posto de coleta: 9  | Hora da solicitação: 09:32 |                     |
| Posto de coleta: 11 | Hora da solicitação: 06:14 |                     |
| Posto de coleta: 15 | Hora da solicitação: 09:32 |                     |
| Posto de coleta: 3  | Hora da solicitação: 06:14 |                     |
| Posto de coleta: 9  | Hora da solicitação: 09:32 |                     |
| Posto de coleta: 11 | Hora da solicitação: 06:14 |                     |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 59 - Transpaleteira realizando a leitura do RFID do palete



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O sistema de sinalização e identificação de paletes visa diminuir o tempo de deslocamento do alimentador, além de permitir a determinação do ritmo de produção das máquinas, uma vez que esta informação é gerada e exibida em tempo real.

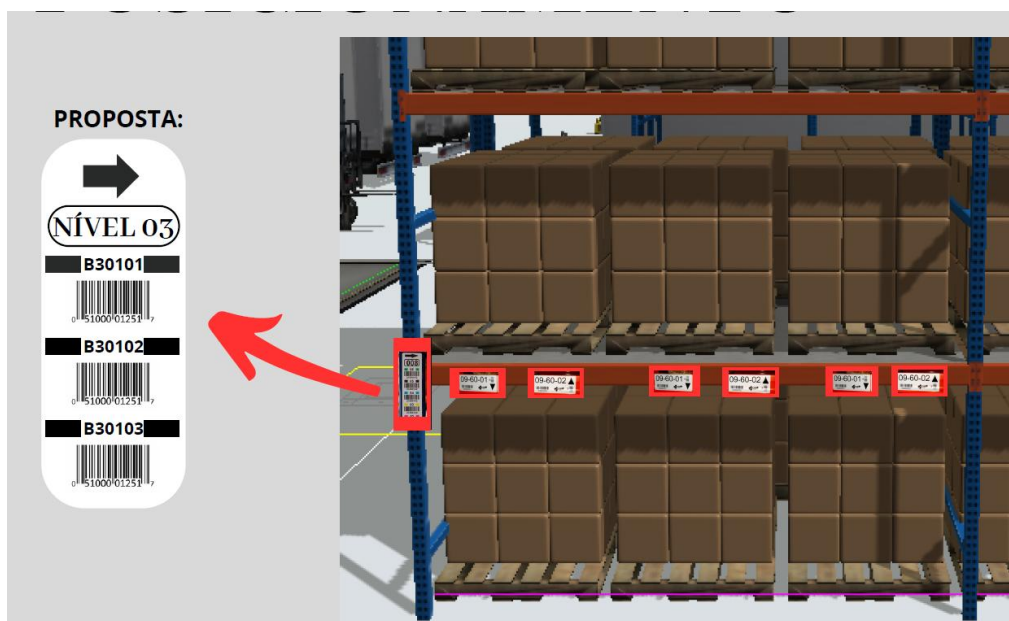
#### 4.3.1.3. Porta-paleta inteligente

Para aumentar a eficiência do armazenamento e do embarque de produtos, o porta-paleta será equipado com um sistema de endereçamento inteligente. Esse sistema irá organizar os paletes em subáreas, identificadas por códigos de barras.

Quando um alimentador, utilizando a transpaleteira elétrica, coloca um paleta em um endereço vazio, ele lê o código de barras do endereço. Essa informação é então enviada automaticamente ao *software* de gerenciamento que fará a associação do código do produto com o código do paleta e com o endereço na área de armazenamento.

A área também contará com um receptor RFID que capta todas as Tags dos paletes, simultaneamente, e mantém esta informação atualizada no *software*. Deste modo, é possível saber em tempo real os produtos armazenados, bem como a sua quantidade e a localização, permitindo que o gerente de produção seja capaz de visualizar e listar os produtos e suas respectivas quantidades para planejar o embarque de forma mais assertiva.

Figura 60 – Etiquetas de endereçamento com o código de barras nos porta-paletes

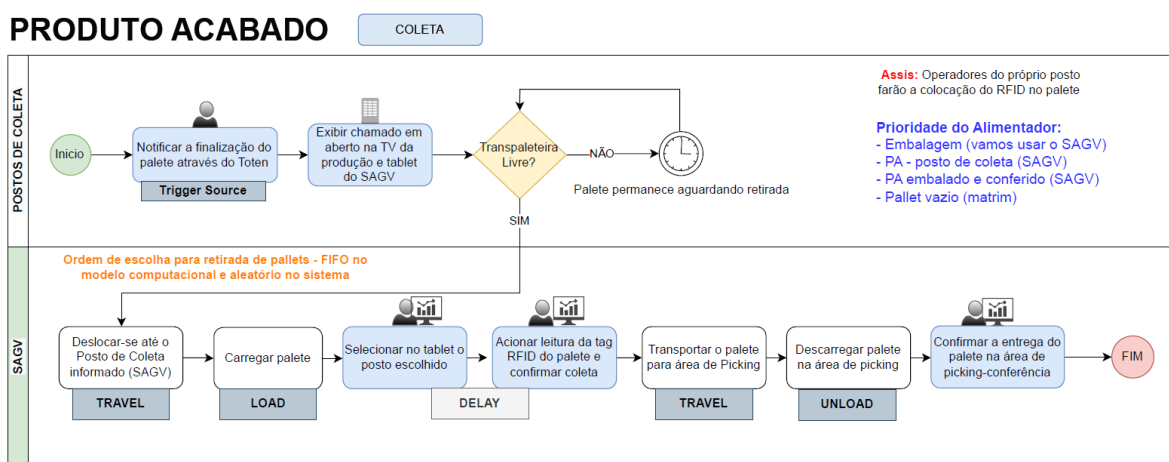


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

#### 4.3.2. Modelo Computacional – Cenário 2

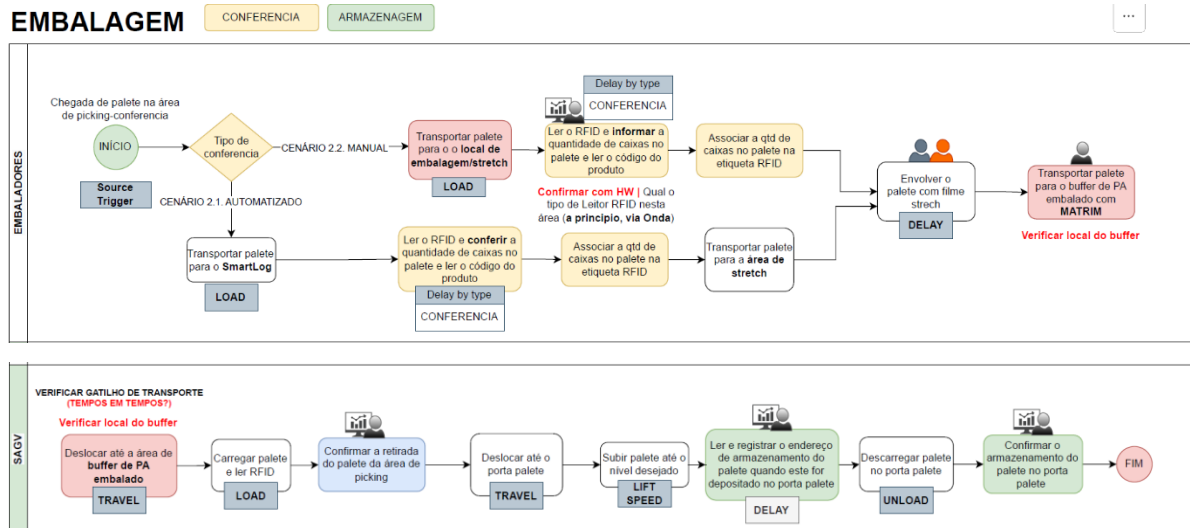
O primeiro passo para construção do modelo computacional foi a elaboração do fluxograma contendo as atividades do novo processo de logística interna cujo objetivo é representar o cenário futuro da empresa com a introdução da solução tecnológica e assim obter uma compreensão clara e abrangente das diversas entidades, relações e processos envolvidos (Ver Figura 61 a 61).

Figura 61 – Modelo conceitual do transporte de produto acabado



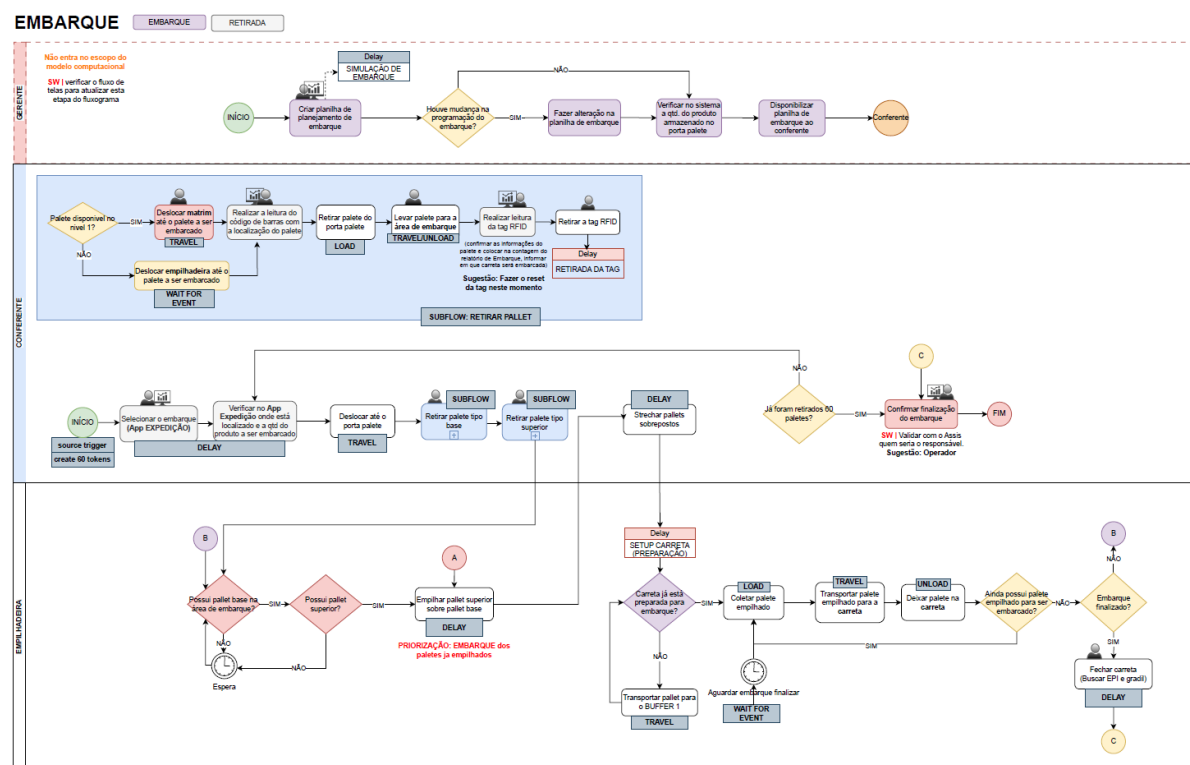
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 62 – Modelo conceitual do processo de embalagem



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 63 - Modelo conceitual do processo de embarque

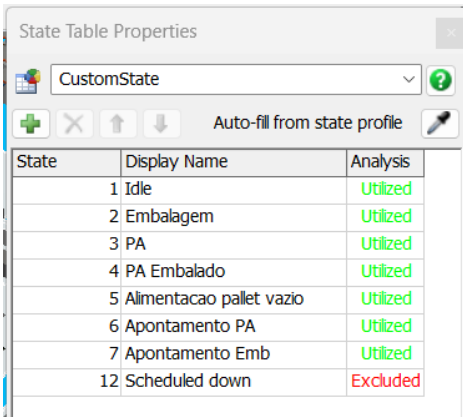


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Posteriormente o modelo conceitual foi transformado no modelo computacional que contou com adoção de diversas ferramentas do *software* Flexsim® como parâmetros, *time tables*, *state table*, *statistics collector*, *experimenter* e outros. A seguir serão descritas com maior detalhe como cada ferramenta foi utilizada.

- Criação de *Time Tables*: Para tornar o modelo flexível ao ponto de criar cenários modificando a quantidade de turnos de operação do posto de embalagem de paletes, foi utilizado os *Parameters* para selecionar as opções de *Time Tables*, que agenda em tabelas os tempos de inatividade dos operadores para cada uma das opções de turnos de trabalho. Posteriormente a ferramenta *experimenter* foi utilizada para automatizar a execução do modelo com diferentes entradas (turnos de produção) e a coleta dos resultados destes cenários.
- A criação de uma *State Table* customizada foi responsável por diferenciar e classificar as várias subatividades do operador Alimentador. Somente com esta ferramenta é possível extrair os dados de forma estratificada para gerar os gráficos com os resultados do modelo. A *State Table* customizada contou com a divisão de atividades em: embalagem, produto acabado (PA), PA embalado, alimentação de paleta vazio, apontamento de PA, apontamento de embalagem e *Scheduled Down*.
- Configuração dos cenários no *Experimenter* para análise de cenários: O modelo foi criado com diversos parâmetros para análise dos possíveis cenários e definição do melhor entre eles. Dessa maneira, foi configurado 6 possíveis cenários no *Experimenter*, contendo as possíveis configurações de turnos trabalhados na embalagem (1, 2 e 3 turnos) e possíveis quantidade de mão de obra também no posto de embalagem (2 a 4 operadores).

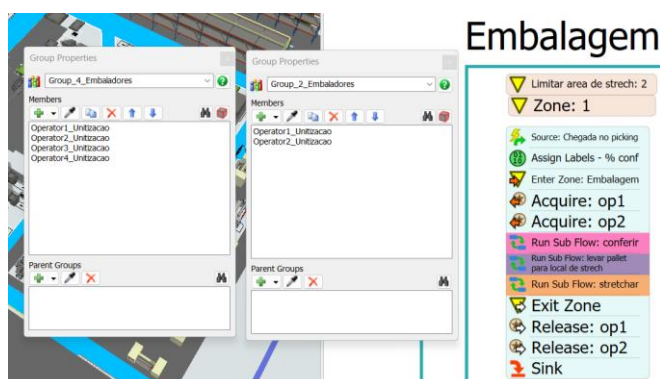
Figura 64 - State Table customizada desenvolvida no modelo



| State | Display Name             | Analysis |
|-------|--------------------------|----------|
| 1     | Idle                     | Utilized |
| 2     | Embalagem                | Utilized |
| 3     | PA                       | Utilized |
| 4     | PA Embalado              | Utilized |
| 5     | Alimentacao pallet vazio | Utilized |
| 6     | Apontamento PA           | Utilized |
| 7     | Apontamento Emb          | Utilized |
| 12    | Scheduled down           | Excluded |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 65 - Criação dos grupos de operadores e lógica na Embalagem para análise de possíveis cenários

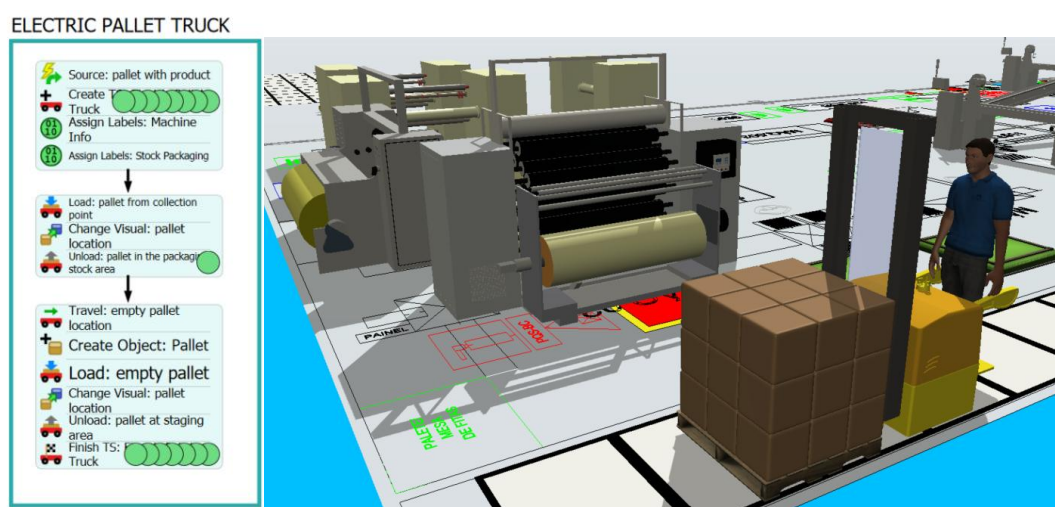


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Outras modificações do modelo foram realizadas para incorporar as mudanças que a solução tecnológica provocou no processo produtivo cujos impactos serão analisados nesta pesquisa.

- Mudança no modo de trabalho do alimentador: o modo de operação do alimentador foi modificado para iniciar suas atividades seguindo as chamadas da máquina, em vez de seguir uma rota predefinida para buscar produtos acabados (PA); Também foi adicionado o modelo 3D da transpaleteira que será usada para movimentar produtos acabados (PA), com a modificação do modelo 3D da transpaleteira;

Figura 66 - Lógica da transpaleteira elétrica



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

- Lógica de verificação de paletes para o porta-paleta: Foi incluída uma lógica para que o alimentador verifique se há paletes para transportar até o porta-paleta, sempre que este deixar um paleta na área de embalagem;
- Modo de conferência e posicionamento de paletes: alteração nos parâmetros entre o modo "conferência automática" e "conferência manual". No modo automático, o operador leva o paleta para a máquina SmartLog, enquanto no modo manual, o operador o posiciona em uma fila na área de embarque;
- *Labels* para consumo de bateria da transpaleteira: Foram adicionadas *labels* no modelo 3D que exibem os dados de consumo de bateria da transpaleteira. Essas *labels* estão conectadas ao *Process Flow* para monitorar o processo de carga e descarga da bateria, incluindo o controle do momento e que recarga deve ser iniciada e sua duração de uso;

- Segmentação do uso da bateria: O uso da bateria da transpaleteira foi segmentado de acordo com as diferentes atividades realizadas pelo alimentador tendo em vista que o consumo difere de acordo com o peso transportado: transporte de PA, transporte de PA embalado, transporte de MP e transporte de palete vazio. Isso também permite analisar a taxa de utilização do equipamento e como isso afeta o consumo de energia;
- Prioridades de atendimento para o Alimentador: Foram adicionadas prioridades para os chamados feitos ao Alimentador com transpaleteira. A movimentação de matéria-prima (MP) tem a mais alta prioridade, seguida por PA, PA embalado e paletes vazios;
- Local de recarga da bateria: Foi incorporado um local específico no modelo 3D para a recarga da bateria da transpaleteira.

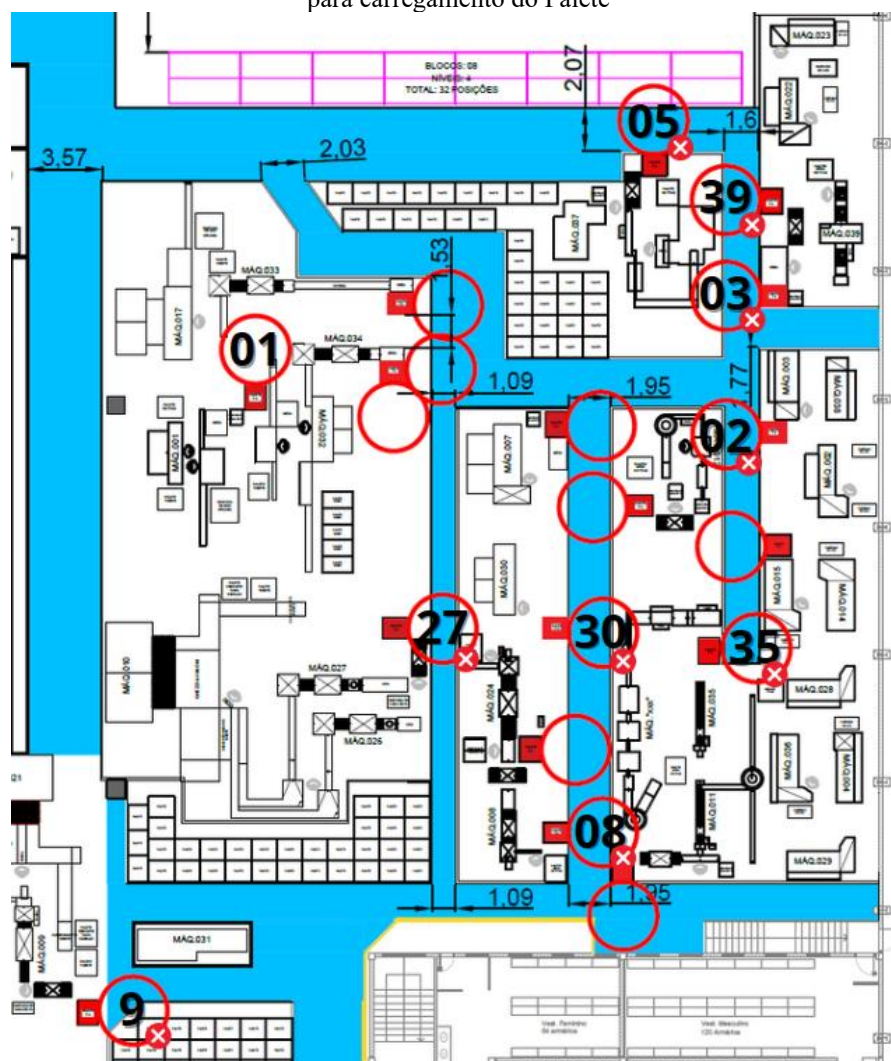
Uma das respostas desejadas a ser extraída da simulação computacional, é estimar a duração da bateria quando o SAGV estiver atuando na produção. Para isso, fez-se necessário o levantamento dos dados de consumo da bateria no manual da transpaleteira e posteriormente solicitou-se informações complementares ao fornecedor para melhor compreender seu consumo em diferentes cenários de utilização. Por fim, os dados foram formatados para a linguagem do Flexsim® e inseridos no modelo.

Após a simulação, obteve-se um intervalo médio de 9 horas entre as trocas de bateria, esta informação é relevante para a tomada de decisão no que tange a determinação da quantidade de baterias exatas necessárias para suportar o processo nos três turnos.

A análise do modelo evidenciou ainda que o layout de determinadas máquinas não atende aos requisitos espaciais para a operação da transpaleteira, dado que este equipamento requer um raio de giro de 1,6 m e apresenta comprimento de 2,6 m, limitando sua mobilidade nos corredores dessas máquinas. Tais informações foram valiosas para os testes em campo pois antecipou a descoberta de um problema. Além de contribuir para a definição do novo layout, ao evidenciar a necessidade de corredores largos e áreas extras para alocação destes paletes.

Na Figura 67, os círculos em vermelho se referem ao espaço necessário para o giro do SAGV acessar e coletar os paletes no posto de coleta. Os círculos numerados representam as máquinas que possuem restrição de acesso que, antecipadamente, foi um ponto de alerta nos testes na fábrica.

Figura 67 - Planta baixa do chão de fábrica evidenciando os postos de coleta e o raio de giro da transpaleteira para carregamento do Paleta



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

#### 4.3.3. Análise de impacto do cenário 2

Com o intuito de demonstrar o efeito do emprego da solução tecnológica no setor de expedição, fez-se a comparação do cenário atual versus o cenário da solução tecnológica para avaliar as alterações provenientes da inserção do maquinário. Pode-se avaliar no Gráfico 18 que as saídas do modelo não apresentam alteração comparado aos do cenário 1 (cenário com carga unitizada) tendo em vista que a produção das máquinas permaneceu as mesmas e as melhorias com uso da transpaleteira elétrica não influenciam no processo de embalagem e expedição pois o alimentador não é considerado o gargalo do processo. E as melhorias na expedição após a unitização de carga torna o processo mais dinâmico.

Gráfico 18 -Gráficos com resultados do cenário 2



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os principais benefícios observados concentram-se nas atividades desempenhadas pelo operador responsável pelo abastecimento, cujas tarefas passaram a exigir menor esforço físico em função da introdução da transpaleteira elétrica no processo de transporte de paletes com produtos acabados. Essa mudança operacional contribui para a redução da sobrecarga física imposta ao trabalhador. De acordo com Sauter et al. (2021), o manuseio de cargas pesadas está diretamente relacionado ao aumento da tensão musculoesquelética, fator que compromete tanto a saúde ocupacional quanto o desempenho nas atividades laborais.

Os impactos de implementação de inovações tecnológicas e organizacionais para otimizar os processos logísticos internos, reduzir esforços operacionais e aumentar a eficiência são listadas resumidamente no Quadro 5.

Quadro 5 - Impactos gerados pela solução tecnológica no processo logístico

| <b>Problemas</b>                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>Impactos da solução tecnológica nos processos logísticos internos</b>                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Falta de informação sobre os tempos de movimentação dos paletes entre as máquinas, área de embalagem e estoque;                                                                                                                                                                 | Por meio da identificação dos paletes com as etiquetas RFID, o sistema coleta os horários de chegada dos chamados, horário de atendimento, chegada e saída da área de embalagem, estoque e expedição.                                                                      |
| Ocorre o retardo do atendimento do alimentador (por esquecimento ou por priorizar outra movimentação) após ter sido notificado para transportar o paleta com Produto Acabado;                                                                                                   | O SAGV conta com um tablet que mostrará ao alimentador os chamados em aberto, além disso, também foi instalada uma televisão na fábrica para mostrar esses chamados na dashboard. O que leva o alimentado a priorizar as demandas com base em dados gerados em tempo real. |
| Ocorre o desgaste físico do alimentador de produção por transportar cargas (paletes), com peso de até 1100 kg, utilizando um transpaleteira convencional, o que implica em variação de ritmo do transporte e problemas de saúde e segurança ocupacional;                        | A solução tecnológica conta com uma transpaleteira elétrica com um conjunto de baterias cuja autonomia de funcionamento 9 horas. Com isso, reduz o desgaste físico do operador, garantindo uma operação segura durante o turno.                                            |
| Falta de informação sobre a taxa de ocupação do transporte interno, para fins de planejamento do número de alimentadores de produção, do número de transpaleteiras para ser usado em redefinição da distribuição das máquinas e/ou necessidade de alteração das rotas internas; | O software armazena informações da rastreabilidade do paleta podendo serem utilizadas para uma um planejamento mais assertivos baseados em dados acurados.                                                                                                                 |
| Dificuldade de determinação do ritmo de produção das máquinas, uma vez que esta informação não chega em tempo real e/ou é desvirtuada por problemas ocasionados por falha de comunicação entre o operador da máquina e o alimentador de produção;                               | O sistema utilizará os dados de chamado para retirada de paleta dos postos para determinar o ritmo de produção das máquinas. Contudo, deve considerar os intervalos de parada da máquina.                                                                                  |

Quadro 6 (Continuação) - Impactos gerados pela solução tecnológica no processo logístico

| <b>Problemas</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>Impactos da solução tecnológica nos processos logísticos internos</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Pode haver demora na comunicação entre o operador da máquina e o alimentador de produção, que pode ocasionar a saída temporária do operador do seu posto de trabalho para comunicar a finalização do palete e, conseqüentemente, reduzir o tempo de produção e demora na movimentação do produto acabado;</p> | <p>O sistema de sinalização e identificação de paletes contará com aparato adicionado a cada máquina do processo produtivo, mais especificamente na saída de produto acabado e embalado, para indicar ao sistema a necessidade de coleta de paleta montado.</p> <p>Para a identificação do paleta para fins de rastreabilidade, foi utilizada uma TAG RFID, pelo operador da máquina, ao fim do processo de empilhamento do paleta para rastreabilidade.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <p>Falta de informação em tempo real dos paletes em estoque e informação sobre o tempo de armazenamento;</p>                                                                                                                                                                                                     | <p>Esta área conta com um receptor RFID que capta todos os Tags de todos os paletes, simultaneamente, e mantém esta informação atualizada no Software.</p> <p>Deste modo, é possível saber em tempo real os produtos armazenados, a sua quantidade e a localização.</p> <p>A informação de quantidade de paletes e dos produtos nele contidos estão disponíveis online no sistema (dashboard), sendo atualizado em tempo real. Assim, o gestor da produção não necessita se deslocar até a área de estoque para fazer inventário e assim ordenar um novo embarque.</p> <p>O processo de retirada dos paletes do armazenamento e envio para o embarque é todo rastreado pela TAG RFID e sistema desenvolvido.</p> <p>Com isso, o gerente acompanha em tempo real o embarque, podendo inclusive, fazer modificações no planejamento do embarque antes mesmo do seu fim.</p> |

Quadro 6 (Continuação) - Impactos gerados pela solução tecnológica no processo logístico

| Problemas                                                                                                                                                                                                                                                                             | Impactos da solução tecnológica nos processos logísticos internos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Atualmente não há uma padronização do espaço utilizado nem endereçamento individual para as fitas que estão na embalagem, ficando ao critério do alimentador de paletes;                                                                                                              | A nova área de armazenamento conta com endereçamento dinâmico e inteligente e organizada na forma de subáreas com endereçamento próprio e identificadas por códigos de barras. Uma vez que o alimentador coloca o paleta em um endereço vazio, ele lê o código de barras deste endereço, que é automaticamente enviado ao Software de Gerenciamento. Deste modo, o Software faz a associação do código do produto com o código do paleta e com o endereço na área de armazenamento.                                |
| Embarque feito com carga batida, nesse formato as mercadorias são arrumadas, individualmente, uma sobre a outra e em suas próprias embalagens (caixas). E há a utilização de muito mão de obra, que custa e expõe os trabalhadores a serviços pesados, repetitivos e não ergonômicos. | Para esse processo de movimentação de cargas foi definido a utilização de paletes com padrão PBR. Nos paletes são agrupadas embalagens de produtos iguais que, depois de dispostas, são envolvidas em filme <i>stretch</i> (plástico fino e altamente flexível). Com isso, o tempo de embarque reduziu e seu impacto foi simulado e levado em consideração no estudo para a proposta do novo layout e definição dos parâmetros operacionais como quantidade de turnos necessários no novo processo de conferência. |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

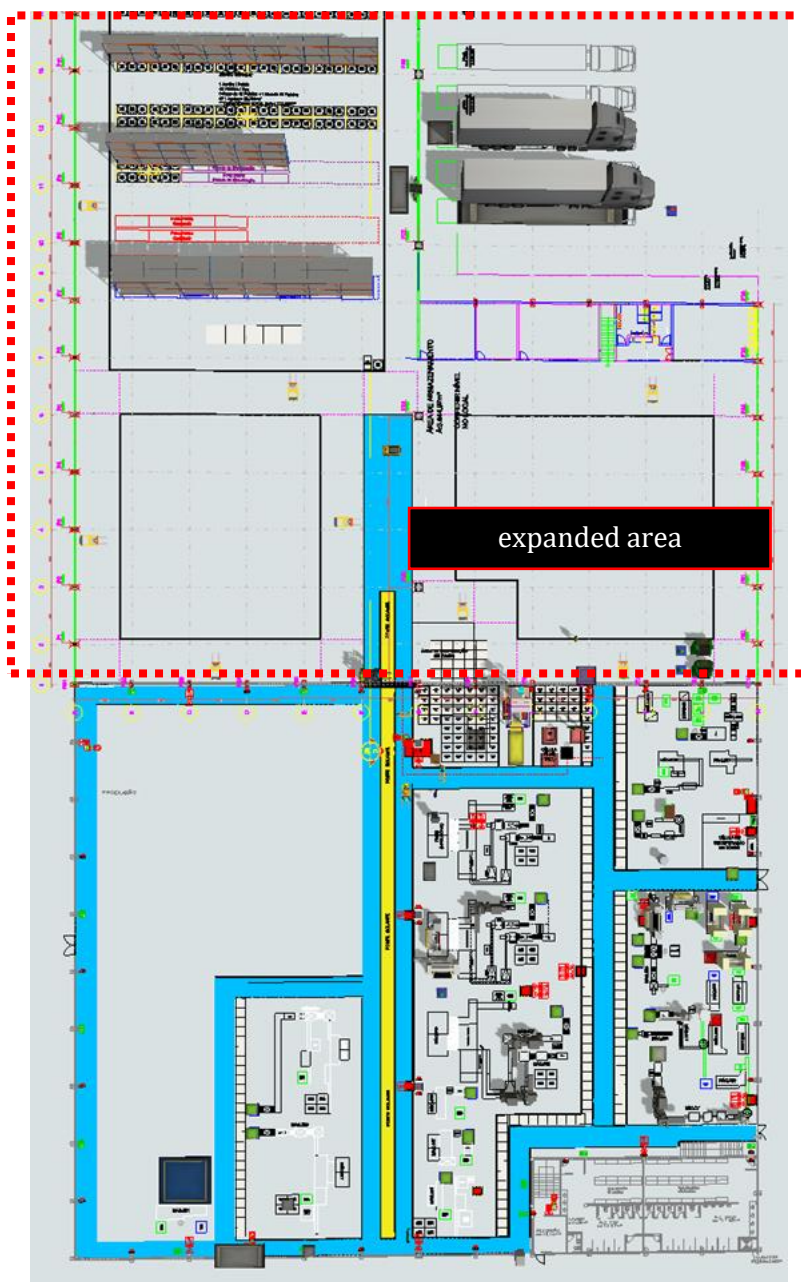
#### 4.4. CENÁRIO 3 – PROPOSTA DE LAYOUT

A empresa analisada neste estudo foi incorporada a um grupo multinacional canadense considerada líder de soluções em rótulos, segurança e embalagens especiais. Essa transação implicou em aumento na previsão de demanda da fábrica para os anos seguintes, exigindo, portanto, a expansão da atual área de chão de fábrica.

No layout atual, os paletes racks ficam localizados no mesmo galpão do processo produtivo, sem nenhuma restrição de acesso e com capacidade de armazenamento inferior à demanda futura projetada (Ver Figura 25). Com isso, projetou-se um novo galpão com 5.904 metros quadrados para armazenamento da matéria prima (jumbo), embalagem e produto

acabado (fita adesiva), expandindo a área total da fábrica e, consequentemente, a expansão da área produtiva (Ver Figura 68).

Figura 68 - Visão Geral do novo Layout proposto



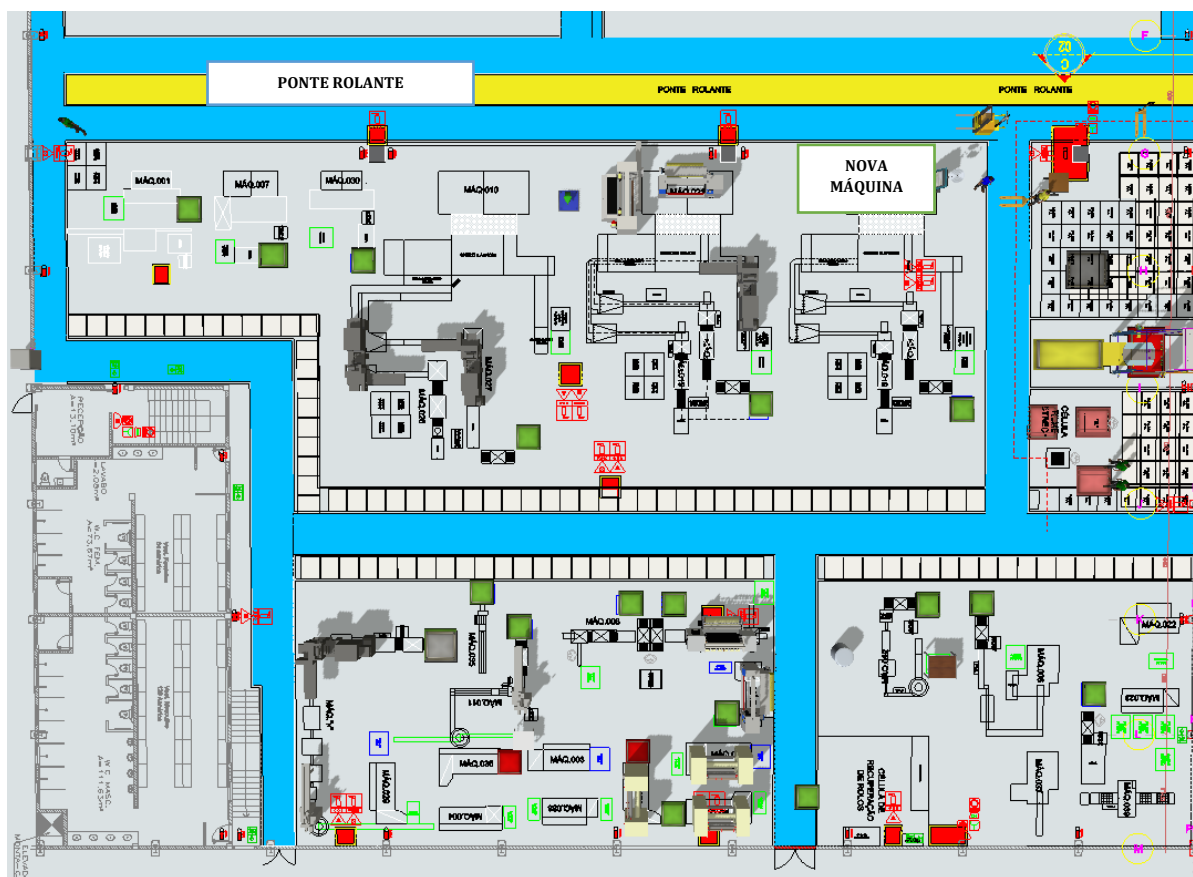
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

No cenário futuro proposto, além da ampliação do galpão destinado à armazenagem de matéria-prima, embalagens e produtos acabados e docas para embarque o que gera a separação entre as áreas de produção e estoque, serão incorporadas as tecnologias descritas no cenário 2.

A proposição do novo layout do processo produtivo levou em consideração restrições e requisitos da direção da empresa. A principal limitação referia-se às instalações elétricas e pneumáticas existentes, que restringiam alterações significativas na realocação das máquinas para formar as células de produção.

Dentre as modificações implementadas, destacam-se a criação de corredores para alocação de paletes finalizados próximos aos postos de coleta; alargamento dos corredores para permitir o trânsito livre do novo equipamento (transpaleteira elétrica) durante a execução das rotas na fábrica; a instalação de um corredor com ponte rolante para facilitar a troca de jumbo nas máquinas italianas; a inclusão de uma nova máquina para aumentar a produtividade, juntamente com o incremento da capacidade das demais células.

Figura 69 – Novo layout do processo produtivo



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

#### 4.4.1. Modelo Computacional – Cenário 3

Além das modificações do layout citadas acima, ocorreu a substituição dos dados de entrada do modelo computacional relativos à capacidade do sistema produtivo estabelecidas

para a produção, inputs estes responsáveis pela criação dos paletes nas máquinas (Ver Tabela 9). Demais dados de entrada permaneceram os mesmos do cenário 2, exceto a de operação de embarque que não foi considerada neste cenário, tendo em vista, que os parâmetros fabris para esta operação no novo *layout* ainda não foram definidos.

Tabela 9 - Dados da produção

| Nº Máq.      | Produção | Turnos de trabalho | Total por dia | Total no mês |
|--------------|----------|--------------------|---------------|--------------|
| Solapa       | 1        | 1, 2 e 3           | 3             | 81           |
| Italiana     | 10       | 1, 2 e 3           | 30            | 810          |
| 001          | 1        | 1, 2 e 3           | 3             | 81           |
| 005          | 3        | 1, 2 e 3           | 9             | 243          |
| 007          | 2        | 1, 2 e 3           | 6             | 162          |
| 008          | 14       | 1, 2 e 3           | 42            | 1.134        |
| 009          | 14       | 1, 2 e 3           | 42            | 1.134        |
| 011          | 5        | 1 e 2              | 10            | 270          |
| 012          | 5        | 1, 2 e 3           | 15            | 405          |
| 024          | 14       | 1, 2 e 3           | 42            | 1.134        |
| 026          | 14       | 1, 2 e 3           | 42            | 1.134        |
| 030          | 1        | 1, 2 e 3           | 3             | 81           |
| 033          | 6        | 1, 2 e 3           | 18            | 486          |
| 034          | 3        | 1, 2 e 3           | 9             | 243          |
| 035          | 5        | 1 e 2              | 10            | 270          |
| 039          | 3        | 1 e 2              | 6             | 162          |
| <b>Total</b> |          |                    | <b>290</b>    | <b>7.830</b> |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

No contexto da melhoria do processo produtivo e sua influência na tomada de decisão, a abordagem adotada neste modelo destaca-se pela flexibilidade ao considerar elementos fundamentais que podem ser ajustados após a alteração do *layout* da fábrica, tais como turnos de trabalho, quantidade de mão de obra no posto de embalagem e o número de transpaleteiras elétricas disponíveis para manuseio da produção. Diante da complexidade dessas variáveis e das diversas configurações possíveis, optou-se pela utilização do OptQuest, um mecanismo de otimização em simulação desenvolvido pela empresa Optek e integrado ao software Flexsim®.

A integração das duas ferramentas busca identificar a combinação mais eficiente de parâmetros operacionais, como quantidade ideal de operadores e equipamentos de transporte além do número de turnos de produção de forma a otimizar o fluxo de movimentação de produtos acabados dentro da fábrica. A otimização criará automaticamente cenários, e em seguida, testará em busca de um cenário que melhor atenda aos objetivos, sem a necessidade de alteração manual dos parâmetros ou desenvolver um novo modelo que considere os objetivos e restrições do problema proposto. Vale destacar que os cenários de melhorias já contaram com o novo layout proposto para a fábrica.

Para resolver o problema de otimização do estudo, traduziu-se o objetivo da pesquisa em funções-objetivo:

- MAXIMIZAR Saída de Paleta Embalados;
- MINIMIZAR Ociosidade dos recursos (Transpaleteira e Operadores na Embalagem);
- MINIMIZAR Estoque de Pré-Embalagem;
- MINIMIZAR Distância percorrida (Transpaleteira e Operadores da Embalagem).

E as restrições, condições que impõe limites ou requisitos adicionais ao problema de otimização, foram levadas em consideração. As restrições para o estudo estão relacionadas com a ociosidade dos recursos:

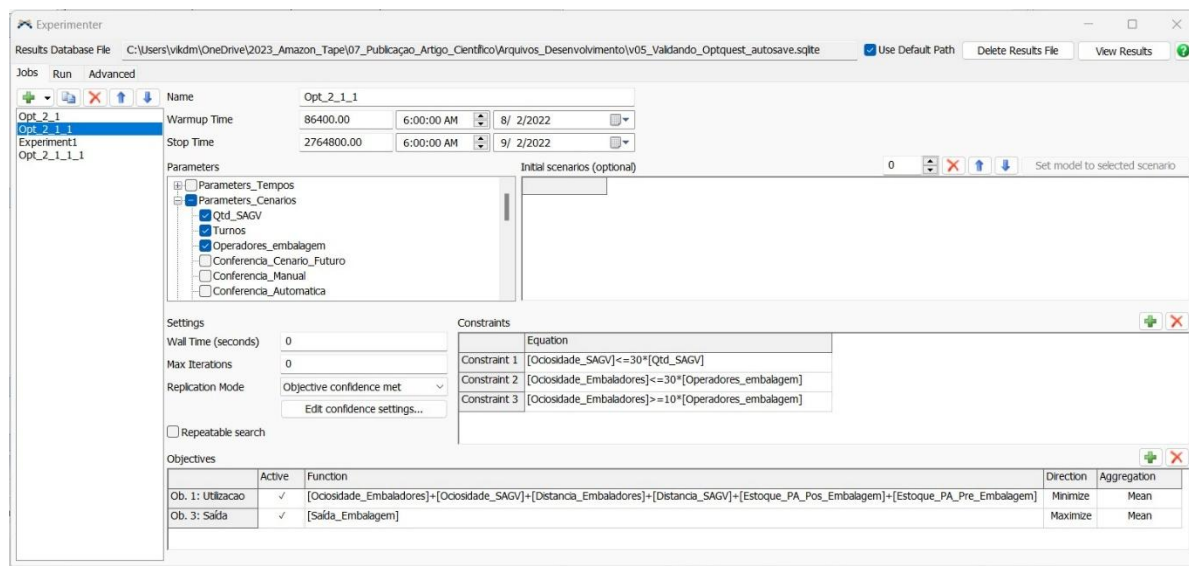
- Ociosidade da(s) transpaleteira(s) elétrica(s)  $\leq 30\%$ ;
- Ociosidade do(s) operador(es) da embalagem  $\leq 30\%$ ;
- Ociosidade dos operadores da embalagem  $\geq 10\%$

As variáveis do modelo são:

- Turnos da embalagem: 2 ou 3 turnos;
- Operadores da embalagem: 2, 4, 6 ou 8 operadores;
- Transpaleteiras elétricas: 1 a 5 transpaleteiras.

As variáveis apresentadas acima foram implementadas como parâmetros no modelo computacional, e suas variações são utilizadas como entrada no processo de otimização, resultando em um total de 40 cenários possíveis.

Figura 70 - Configuração do software OPTQuest



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Utilizou-se o modo de replicação “confiança do objetivo atendida” do OptQuest, onde as replicações continuam até que um nível de confiança definido seja alcançado para todos os objetivos. O nível de confiança definido para o modelo foi de 95%, com taxa de erro de 5% e o mínimo de 5 replicações.

O período incorporado no OptQuest foi o mesmo da simulação: um mês, com um tempo de aquecimento (warmup time) de um dia.

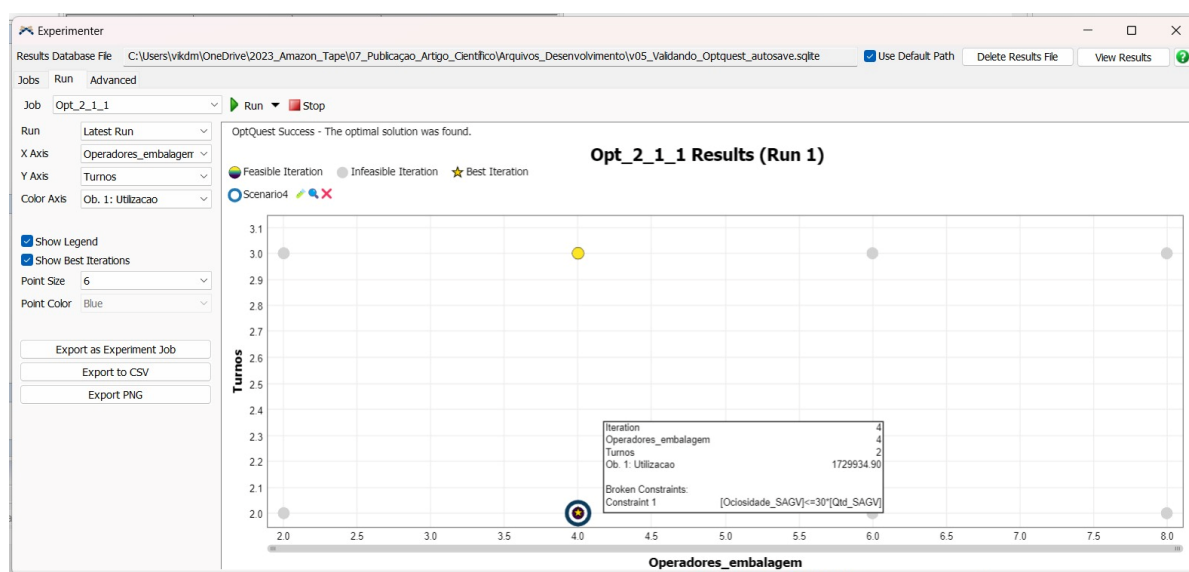
A avaliação geral dos cenários obtidos contemplou os seguintes indicadores:

- Estoque de paletes na pré-embalagem: paletes retirados dos postos de coleta e que ainda não foram embalados;
- Quantidade de paletes nas máquinas: paletes que não foram alocados nos corredores e estão em espera nas máquinas;
- Porcentagem de utilização dos operadores na embalagem: quanto tempo os operadores estão ocupados embalando paletes;
- Porcentagem de utilização da transpaleteira elétrica: quanto tempo a transpaleteira elétrica está ocupada transportando paletes; e
- Total de saída de paletes embalados: quantidade de paletes que foram embalados.

#### 4.4.2. Resultados da Simulação – Cenário 3

Neste tópico, os resultados obtidos pela aplicação da otimização no modelo computacional serão apresentados. A otimização foi realizada com o objetivo principal de maximizar a saída de paletes embalados, considerando as restrições de capacidade dos recursos disponíveis. Dos 40 cenários possíveis, apenas 1 cenário classificou-se como solução ótima, ou seja, atendeu às funções objetivos e restrições estabelecidas (Ver na Figura 71 e Tabela 10).

Figura 71 – Resultado dos cenários ótimos do *software* OPTQuest



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 10 - Dados de saída do cenário ótimo da otimização

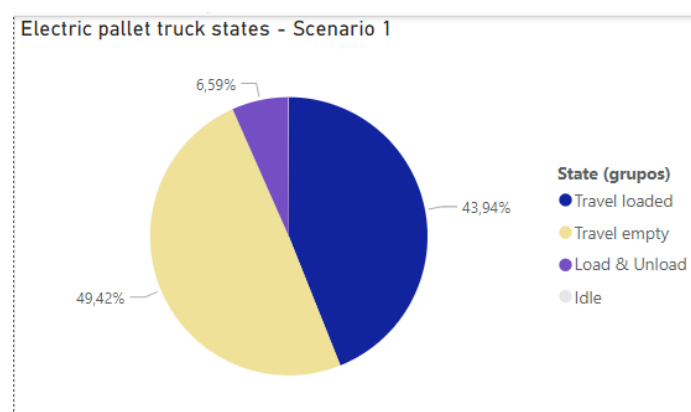
| Métricas                                      | Cenário Ótimo |
|-----------------------------------------------|---------------|
| Turnos                                        | 2             |
| Quantidade operadores                         | 4             |
| Quantidade transpaleteira elétrica            | 1             |
| Saída Embalagem                               | 7713          |
| Estoque Pré-Embalagem (máx)                   | 96            |
| Quantidade de paleta nas máquinas (máx)       | 86            |
| Ociosidade Operadores (%)                     | 16,59         |
| Ociosidade Transpaleteira(s) Elétrica(as) (%) | 0             |
| Distância / Transpaleteira (km)               | 1.780,93      |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O cenário ótimo possui a configuração de 2 turnos com 4 operadores na embalagem e 1 transpaleteira elétrica. Apresentou uma produção de 7.713 paletes embalados, ou seja, 98,5% dos paletes produzidos. No entanto, uma análise mais profunda revela gargalos que limitam a eficiência e a produtividade geral. A fila de paletes na saída das máquinas aguardando ser transportados para a embalagem apresenta 86 paletes, superior a capacidade física do local disponibilizado no novo layout.

Além disso, a transpaleteira está em uso constante (0% de ociosidade), indicando alta demanda pelo equipamento e sobrecarga do operador. No entanto, conforme demonstrado no Gráfico 19, a maior parte do tempo (49,42%) é dedicada à atividade de "*Travel empty*", que corresponde ao deslocamento sem carga, tanto para buscar paletes para embalagem quanto para buscar paletes vazios.

Gráfico 19 – Taxa de utilização da tranpaleteira no cenário ótimo



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

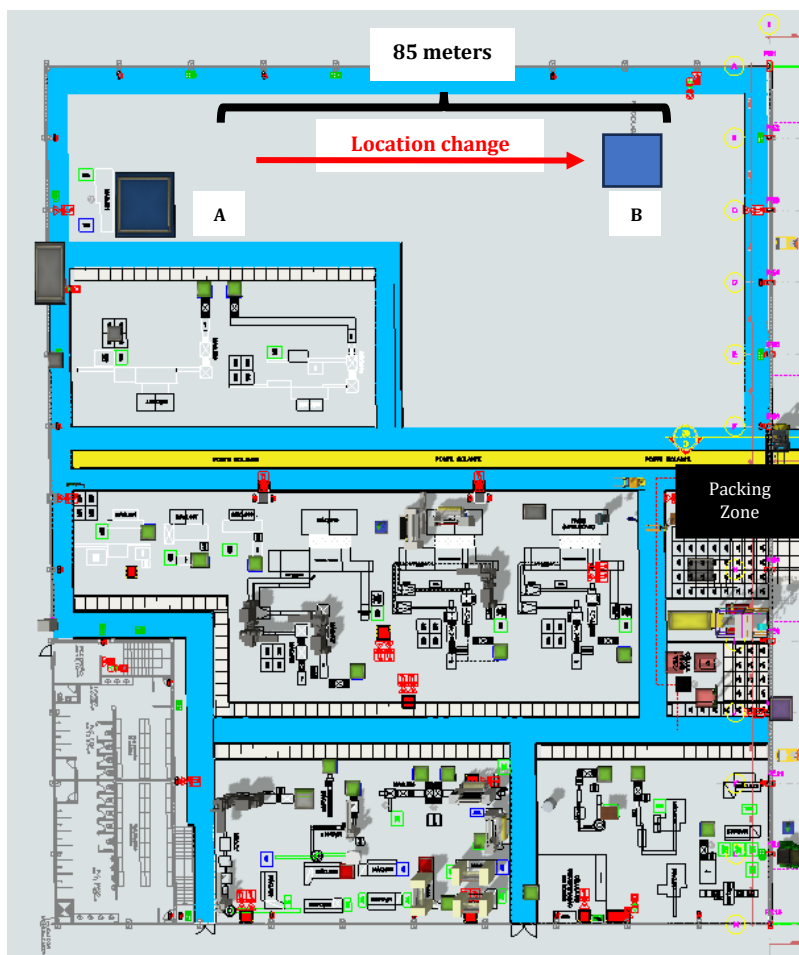
Ao verificar o comportamento do modelo 3D, identificou-se que a elevada porcentagem do *Travel Empty* está associada ao transporte dos paletes vazios evidenciando que o desperdício de transporte impacta negativamente na produtividade da fábrica. Esse padrão operacional evidencia a existência de desperdícios no processo logístico interno, os quais impactam negativamente a produtividade da fábrica.

A análise inicial identificou que a distância entre o local de armazenamento de paletes vazios e o posto de embalagem representava um gargalo, impactando negativamente na eficiência do processo. Para mitigar o problema, foi proposta a realocação do estoque de paletes vazios para um novo local, buscando reduzir a distância percorrida, e consequentemente, otimizar o tempo e o esforço despendidos no transporte de materiais.

É importante destacar que as duas opções de posicionamento consideradas (Figura 72) foram determinadas pela fábrica, não cabendo aos pesquisadores a proposição de alternativas.

Espera-se com essa alteração reduzir o deslocamento da transpaleta, possibilitando um aumento nas entregas de paletes no posto de embalagem.

Figura 72 - Alteração no local do paleta vazio



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Incluindo esta modificação no modelo, uma nova iteração foi realizada, incorporando a localização do estoque de paletes vazios como variável na otimização do processo. Essa nova perspectiva possibilitou a avaliação de 80 cenários distintos, expandindo significativamente o escopo da análise e permitindo uma compreensão mais abrangente das implicações de diferentes configurações.

Novamente, apenas um cenário foi considerado ideal (ID B), demonstrando a robustez da solução e a relevância da variável de localização do estoque para a obtenção do resultado ótimo. O cenário ótimo anterior (ID A), com a localização distante do packing zone,

anteriormente considerado ideal foi reclassificado como "factível (*feasible*)", enquanto os demais cenários não atenderam às restrições pré-estabelecidas. A Tabela 11 o resume a análise e os dados obtidos.

Tabela 11 – Comparativo dos resultados entre os dois cenários IDA e IDB

| Métricas                     | Scenario ID A | Scenario ID B | Diferença |
|------------------------------|---------------|---------------|-----------|
| Optimal                      | No            | Yes           | -         |
| Location                     | A             | B             | -         |
| Turnos                       | 2             | 2             | -         |
| QTD Operadores               | 4             | 4             | -         |
| QTD Transpaleteira           | 1             | 1             | -         |
| Saída Emb                    | 7.713         | 7.830         | 113       |
| Estoque Pré-Emb              | 96            | 90            | 6         |
| Máx Estoque Máq              | 86            | 16            | 70        |
| Ociosidade - Transp. (%)     | 0             | 12,16         | 12,16     |
| Ociosidade – Operadores (%)  | 16,6          | 14,99         | 1,61      |
| Km percorridos mês (Transp.) | 1.781         | 1.540         | 241       |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Percebe-se que a alteração na localização dos paletes vazios (ID B) teve um impacto significativo na eficiência, gerando 100% de saída de paletes segundo a demanda projetada de 7.830 paletes e uma ocupação menor da transpaleteira resultando ociosidade de 12,16%.

Em relação a porcentagem da atividade “*Travel Empty*” da transpaleteira elétrica, houve uma redução de 13,6%, passando de 49,42% do cenário ID A para 35,82% no cenário ID B (Gráfico 20).

Gráfico 20 - Taxa de ocupação do operador da transpaleteira elétrica nos cenários IDA e IDB

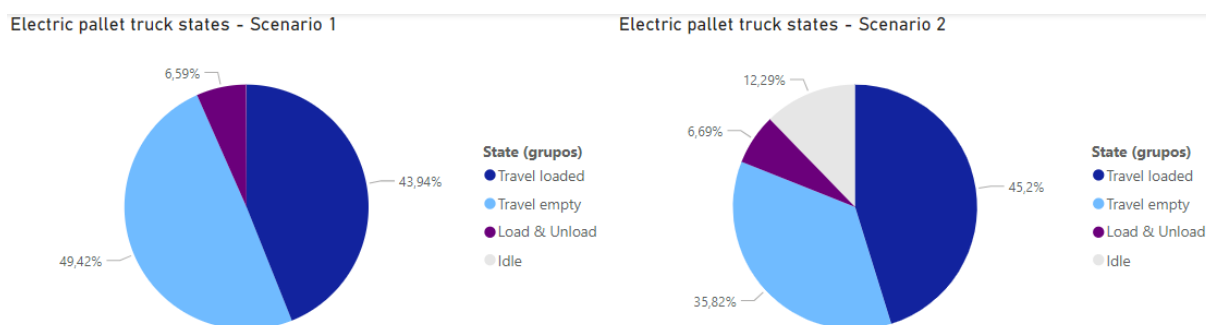
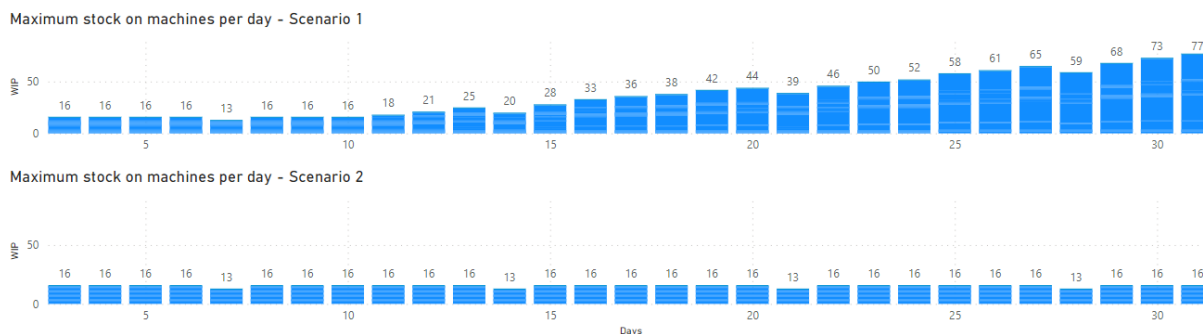




Gráfico 22 – Estoque máximo nas máquinas por dia nos cenários IDA e IDB



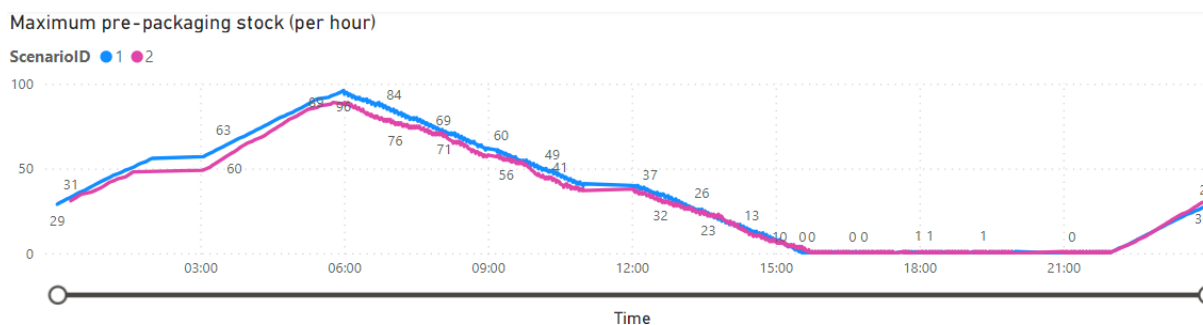
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

No cenário 1, observa-se um aumento gradual da quantidade acumulada, enquanto no cenário 2, as máquinas permanecem sem estoque durante o mês, pois ficou 1 paleta em cada uma das 16 máquinas aguardando espaço no corredor.

#### 4.4.2.2. Análise do estoque de paletes na embalagem

O Gráfico 23 ilustra a evolução do estoque de paletes na área de embalagem ao longo do dia com maior acúmulo no dia 08 da simulação. Observa-se que o estoque do 3º turno da produção é gradualmente consumido nos dois turnos subsequentes do setor de embalagem, chegando a zero as 15h do dia seguinte. Evidenciando o fato da necessidade de somente dois turnos de operação para o posto de embalagem.

Gráfico 23 - Máximo do estoque da pré-embalagem por hora no dia 08



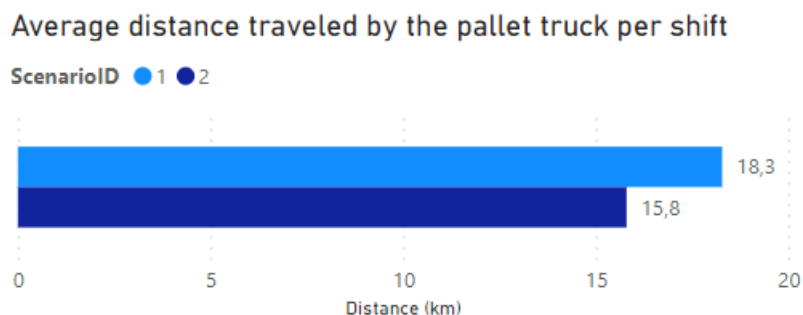
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O pico de 98 unidades apresentado no 3º turno (22h às 6h) excede significativamente a capacidade da área de armazenamento atual, que é de apenas 20 paletes. Essa discrepância exige a expansão da área de armazenamento para acomodar o estoque do 3º turno até que seja processado pela embalagem.

#### 4.4.2.3. Análise da distância percorrida

O Gráfico 24 mostra os resultados da distância percorrida pela transpaleteira após a nova rodada de otimização.

Gráfico 24 - Distância média percorrida por turno pelo Alimentador com a transpaleteira elétrica



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A reposicionamento dos paletes vazios no *layout*, representado pelo Scenario 2, resultou em uma redução de aproximadamente de 2,5 quilômetros por turno na distância percorrida pela transpaleteira, em comparação com a sua localização anterior (Scenario 1). Isso significa uma redução média de 13,67%, o que impacta positivamente na vida útil do equipamento, ao diminuir seu desgaste e necessidade de manutenções.

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos a partir da simulação computacional evidenciaram, de forma consistente, os impactos das decisões relacionadas à unitização de cargas, à reorganização do layout fabril e à adoção de tecnologias associadas à Indústria 4.0 no desempenho da logística interna da empresa estudada. Esses achados estão em consonância com a literatura revisada, a qual destaca que alterações no sistema de unitização e no arranjo físico influenciam diretamente os fluxos de materiais, a ocupação dos estoques e a eficiência operacional dos sistemas intralogísticos.

A análise dos cenários simulados demonstrou que a unitização da carga resultou em um aumento de 40,63% na quantidade de paletes a serem manuseados, conforme apresentado na Tabela 12, implicando a necessidade de análises mais criteriosas sobre os níveis de estoque e a capacidade de armazenamento. Esse comportamento é coerente com estudos que apontam que a unitização, embora contribua para a padronização e o controle logístico, pode elevar

temporariamente a demanda por espaço e recursos de armazenagem, exigindo planejamento adequado para evitar gargalos operacionais. Embora a média de ocupação dos porta-paletes tenha se mantido abaixo da capacidade instalada da fábrica, os valores máximos observados indicaram potenciais restrições, reforçando a importância de estratégias de layout e dimensionamento alinhadas à variabilidade operacional, conforme discutido na literatura.

Tabela 12 - Dados de saída do cenário ótimo da otimização

| <b>Cenário</b>          | <b>Total de Paletes produzidos</b> | <b>Indicadores do setor de embalagem</b>                                                  | <b>Qtd. de paletes armazenados (estoque)</b>     |
|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Atual                   | 6.593 paletes                      | 16 paletes/dia<br>(armazenamento)                                                         | 144 paletes/dia (máx.)                           |
| 1 (Unitização da carga) | 9.272 paletes                      | 12 paletes / hora (média)<br>14 paletes /hora (máx.)<br>55 paletes/dia<br>(armazenamento) | 78 paletes/dia (média)<br>294 paletes/dia (máx.) |
| 2 (Solução Tecnológica) | 9.272 paletes                      | 12 paletes / hora (média)<br>14 paletes /hora (máx.)<br>55 paletes/dia<br>(armazenamento) | 78 paletes/dia (média)<br>294 paletes/dia (máx.) |

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O cenário que combinou a unitização de cargas com a adoção de uma solução tecnológica apresentou métricas quantitativas semelhantes às do cenário com unitização isolada. Entretanto, revelou avanços significativos sob os aspectos operacionais e ergonômicos. Esses resultados reforçam discussões presentes na literatura sobre Indústria 4.0, segundo as quais a digitalização e a automação não se limitam a ganhos de produtividade, mas também favorecem a rastreabilidade, a confiabilidade das informações e a melhoria das condições de trabalho. Na etapa de produção, a introdução da transpaleteira elétrica reduziu substancialmente o esforço físico exigido dos operadores, o que está alinhado à literatura que associa a automação do transporte interno à mitigação de riscos ergonômicos e à redução de problemas musculoesqueléticos decorrentes do manuseio manual de cargas.

Adicionalmente, a implementação de tecnologias como a identificação por radiofrequência (RFID) e dispositivos de comunicação para chamados automatizados promoveu maior visibilidade e controle sobre o fluxo de materiais, reduzindo deslocamentos desnecessários e aumentando a eficiência operacional, criando um sistema intralogístico mais responsivos e integrados. No setor de armazenamento, a utilização de porta-paletes inteligentes com informações atualizadas em tempo real possibilitou uma gestão mais precisa dos estoques, minimizando falhas operacionais e apoiando a tomada de decisão. No que se refere à expedição, os processos automatizados de planejamento e conferência por meio da leitura de tags RFID contribuíram para a redução de erros manuais e para a otimização do tempo de carregamento, refletindo diretamente na diminuição de atrasos.

A utilização integrada do software FlexSim® com o OptQuest® mostrou-se relevante ao permitir a simulação do cenário com a nova proposta de layout e a identificação prévia da combinação mais adequada entre número de operadores, equipamentos de transporte e turnos de produção. A integração entre simulação e otimização apresentou-se como uma abordagem eficaz para o apoio à tomada de decisão em ambientes industriais complexos, uma vez que possibilita avaliar múltiplas alternativas respeitando restrições operacionais. O OptQuest® apresentou soluções que atenderam aos objetivos e restrições estabelecidos na pesquisa, enquanto o FlexSim® forneceu dados detalhados do cenário ótimo — caracterizado pela operação em dois turnos, quatro operadores na embalagem e uma transpaleteira elétrica — viabilizando uma análise aprofundada dos processos logísticos internos.

A análise desse cenário gerou novos insights de melhoria no layout, especialmente relacionados à alocação de paletes vazios em diferentes posições da planta industrial. A inclusão dessa nova variável e a realização de uma nova rodada de simulação evidenciaram resultados ainda mais otimizados, demonstrando a flexibilidade da abordagem adotada.

Diante dos objetivos estabelecidos, conclui-se que o estudo permitiu compreender, de forma estruturada, os impactos da reorganização do layout e da aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 no desempenho da logística interna, com foco no transporte e no armazenamento de paletes de produto acabado. A simulação computacional mostrou-se aderente à análise de cenários complexos, possibilitando a comparação de alternativas antes de sua implementação física e subsidiando a tomada de decisão nos níveis operacional, tático e estratégico.

Por fim, o trabalho contribui tanto do ponto de vista prático quanto científico ao apresentar uma abordagem aplicada e replicável para a integração entre simulação e otimização em ambientes industriais. Recomenda-se, como trabalhos futuros, a validação das

propostas em ambiente real, a fim de confirmar os ganhos observados na simulação e incorporar variáveis operacionais que não puderam ser plenamente representadas no modelo, ampliando ainda mais o entendimento sobre logística interna no contexto da Indústria 4.0.

## **6. IMPACTOS ACADÊMICOS, ECONÔMICOS E SOCIAIS**

### **7.1 IMPACTOS ACADÊMICOS**

Esta pesquisa propôs aplicar um modelo de simulação computacional usando o software Flexsim®, voltado à análise e otimização de processos da logística interna. Para isso aplicou-se métodos quantitativos e ferramentas de modelagem para responder a uma necessidade prática real de uma indústria de fitas adesivas, gerando conhecimento aplicável para futuras pesquisas e desenvolvimentos na área de simulação de sistemas. O conhecimento gerado pode ser replicado ou adaptado por outros pesquisadores para análises nestas áreas.

### **7.2 IMPACTOS ECONÔMICOS**

A pesquisa gerou impactos econômicos ao contribuir para o desenvolvimento de um sistema produtivo e intralogístico mais eficiente, promovendo o aumento da competitividade da fábrica analisada. Ao subsidiar a tomada de decisões estratégicas — como a alocação de turnos nos setores de embalagem e a utilização mais eficiente dos recursos operacionais —, o estudo demonstrou o potencial da aplicação de tecnologias associadas à Indústria 4.0 e de um novo layout para a redução de custos e obtenção de ganhos financeiros. Esses ganhos decorrem do aumento da capacidade de expedição de produtos acabados, beneficiando diretamente a empresa foco do estudo e apresentando potencial de replicação em outras organizações com estruturas produtivas semelhantes. Importa destacar que todas as análises foram realizadas em ambiente virtual, por meio de simulação computacional, o que evitou a necessidade de interrupções no processo produtivo ou investimentos antecipados em alterações físicas para validação de cenários.

### **7.3 IMPACTOS SOCIAIS**

O estudo apresentou impacto social ao contribuir para a melhoria das condições de trabalho dos operadores, por meio da proposição e validação de soluções tecnológicas capazes de reduzir a sobrecarga física e operacional dos operadores. Adicionalmente, as melhorias

propostas no layout e a adoção de tecnologias associadas à Indústria 4.0 favorecem o aumento da eficiência produtiva, impulsionam o crescimento da empresa o que fortalece a manutenção de empregos. Esses fatores, em conjunto, contribuem significativamente para o desenvolvimento socioeconômico regional, especialmente no contexto do Polo Industrial de Manaus.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, Cleyde Evangelista et al. Indústria 4.0: Como as empresas estão utilizando a simulação para se preparar para o futuro. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 12, n. 12, p. 49, 2017. [https://doi.org/DOI 10.17921/1890-1793.2017v12n12p49-53](https://doi.org/DOI%2010.17921/1890-1793.2017v12n12p49-53).
- AFONSO, T.; ALVES, A. C.; CARNEIRO, P.; VIEIRA, A. (2021). Simulation pulled by the need to reduce wastes and human effort in an intralogistics project. **International Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 12, n. 4, p. 274–285, 2021. DOI: <https://doi.org/10.24867/IJIEEM-2021-4-294>
- ALBEY, Erinç; BILGE, Ümit. A hierarchical approach to FMS planning and control with simulation-based capacity anticipation. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 11, p. 3319-3342, 2011.
- ALCÁCER, Vítor; CRUZ-MACHADO, Virgílio. Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. **In Engineering Science and Technology, an International Journal**, 2019, v. 22, n. 3, p. 899–919, 2019. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006>.
- ALPALA, Luis Omar; ALEMANY, Maria del Mar Eva.; PELUFFO-ORDOÑEZ, Diego Hermán;
- BOLAÑOS, Fabio; ROSERO, Aura María; TORRES, Juan Carlos. Methodology for the design and simulation of industrial facilities and production systems based on a modular approach in an “industry 4. **DYNA**, v. 85, n. 207, p. 243–252, 2018. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.68545>.
- BARRETO, Luis; AMARAL, Antonio; PEREIRA, Teresa. Industry 4.0 implications in logistics: an overview. **Procedia Manufacturing**, v. 13, n. 1, p. 1245–1252, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.045>.
- BATEMAN, Robert E; BOWDEN, Royce O.; GOGG, Thomas J.; HARRELL, Charles R.; MOTT, Jack R. A.; MONTEVECHI, José Arnaldo Barra. **Simulação de sistemas: aprimorando processos de logística, serviços e manufatura**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. ISBN 978-85-352-7162-1.
- BAYKASOĞLU, Adil; GÖÇKEN, Mustafa. A simulation based approach to analyse the effects of job release on the performance of a multi-stage job-shop with processing flexibility. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 2, p. 585-610, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540903479778>.
- BENOTSMANE, Rabab; KOVÁCS, György; DUDÁS, László. Economic, social impacts and operation of smart factories in Industry 4.0 focusing on simulation and artificial intelligence of collaborating robots. **Social Sciences**, v. 8, n. 5, p. 143, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/socsci8050143>.
- BERTRAND, J. Will M.; FRANSOO, Jan C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International journal of operations &**

**production management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1108/01443570210414338>

ALUÍZIO, Eduardo. **Fita adesiva: A fixação do Futuro**. 2018. Disponível em: <https://www.globaltape.com.br/fita-adesiva-a-fixacao-do-futuro/>. Acessado em: 08 fev. 2022.  
BRITO, Marlene Ferreira et al. Ergonomic analysis in lean manufacturing and industry 4.0—A systematic review. **Lean Engineering for Global Development**, p. 95-127, 2019. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-13515-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13515-7_4).

CAGGIANO, Alessandra; TETI, Roberto. Digital factory technologies for robotic automation and enhanced manufacturing cell design, **Cogent Eng.**, v. 5, n. 1, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1426676>.

CARVALHO ALVES, A. et al. A symbiotic relationship between Lean Production and Ergonomics: insights from Industrial Engineering final year projects. **International Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 10, n. 4, p. 243–256, 2019. DOI: <https://doi.org/10.24867/IJIE-2019-4-244>.

CARVALHO, Helena; CRUZ-MACHADO, V. Integrating lean, agile, resilience and green paradigms in supply chain management (Larg-SCM). **Supply chain management**, 2011.

CORRÊA, Henrique L.; CORRÊA, Carlos A. **Administração de produção e operações: o essencial**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 2017.

DE FELICE, Fabio; PETRILLO, Antonella; ZOMPARELLI, Federico. Prospective design of smart manufacturing: An Italian pilot case study. **Manufacturing Letters**, v. 15, p. 81–85, 1 jan. 2018. DOI: [10.1016/j.mfglet.2017.12.002](https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2017.12.002).

DE PAULA FERREIRA, W.; ARMELLINI, F.; DE SANTA-EULALIA, L. A. Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 149, p. 106868, 2020.

DE PAULA FERREIRA, William; ARMELLINI, F., DE SANTA-EULALIA, L. A. A framework for identifying and analysing industry 4.0 scenarios. **Journal of Manufacturing Systems**, 2022, 65: 192-207. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106868>.

EL BAZ, Jamal et al. A framework of sustainability drivers and externalities for Industry 4.0 technologies using the Best-Worst Method. **Journal of Cleaner Production**, v. 344, p. 130909, 2022. DOI: [http://10.1016/j.jclepro.2022.130909](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130909).

FERNANDES, Nuno Octávio; DO CARMO-SILVA, Sílvio. A production and materials flow control mechanism for quick response manufacturing. **International Journal of Production Economics**, v. 104, n. 1, p. 74-84, 2006.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. – São Paulo: Atlas, 2022. ISBN 85-224-3169-8.

GILCHRIST, Alasdair. **Industry 4.0: the industrial internet of things**. Berkeley, CA: Apress, 2016.

GLISTAU, E.; COELLO MACHADO, N. I. Logistics Concepts and Logistics 4.0. **Advanced Logistic Systems - Theory and Practice**, v. 12, n. 1, p. 37–46, 2019. DOI: <https://doi.org/10.32971/als.2019.003>.

GOVINDAN, Kannan; ARAMPATZIS, Georgios. A framework to measure readiness and barriers for the implementation of Industry 4.0: A case approach. **Electronic Commerce Research and Applications**, v. 59, p. 101249, 2023.

HOFMANN, Erik; RÜSCH, Marco. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. **Computers in Industry**, v. 89, p. 23–34, 2017.

HOMPEL, M.; KERNER, S. Logistik 4.0: die Vision vom Internet der autonomen Dinge. **Informatik-Spektrum**, v. 38, n. 3, p.176-182, 2015.

HUERTA-TORRUCO, Victor Alejandro; HERNÁNDEZ-URIBE, Óscar; CÁRDENAS-ROBLEDO, Leonor Adriana; RODRÍGUEZ-OLIVARES, Noé Amir. Effectiveness of virtual reality in discrete event simulation models for manufacturing systems. **Computers and Industrial Engineering**, v. 168, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108079>.

INGEMANSSON, Arne; YLIPÄÄ, Torbjörn; BOLMSJÖ, Gunnar S. Reducing bottle-necks in a manufacturing system with automatic data collection and discrete-event simulation. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2005, 16.6: 615-628.

JAMALNIA e FEILI. A simulation testing and analysis of aggregate production planning strategies. **Production Planning & Control**, v. 24, n. 6, p. 423-448, 2013.

KARANJKAR, Neha; JOGLEKAR, Ashish; MOHANTY, Sampad; PRABHU, Venkatesh; RAGHUNATH, D.; SUNDARESAN, Rajesh. Digital twin for energy optimization in an SMT-PCB assembly line. **IEEE International conference on Internet of Things and intelligence system (IOTAIS)**. p. 85-89, 2018.

KOŠTÁL, Peter; KISS, Imre; KERAK, Petar. The intelligent fixture at flexible manufacturing. **Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering**, v. 9 n. 1, p. 197, 2011.

LAGORIO, A.; ZENEZINI, G.; MANGANO, G.; PINTO, R.. A systematic literature review of innovative technologies adopted in logistics management. **International Journal of Logistics Research and Applications**, v. 25, n. 7, p. 1043–1066, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/13675567.2020.1850661>.

LOZANO, Rodrigo, CEULEMANS, Kim, SEATTER, Carol. Teaching organisational change management for sustainability: designing and delivering a course at the University of Leeds to better prepare future sustainability change agents. **Journal of Cleaner Production**, v. 106, p. 205–215, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.031>.

MACAULAY, J.; BUCKALEW, L.; CHUNG, G. Internet of things in logistics - A collaborative report by DHL and Cisco on implications and use cases for the logistics industry. **DHL Trend Research** 2015. Disponível em: <<https://www.dhl.com/discover/content/dam/dhl/downloads/interim/full/dhl-trend-report-internet-of-things.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2023.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Metodologia Científica**. 8. ed. Barueri [SP] : Atlas, 2022. E-book. ISBN 9786559770670. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786559770670/>. Acesso em: 09 jul. 2023.

MARTÍNEZ, J.; NORIEGA, C. Feasibility in the implementation of 4.0 technologies in the intralogistic activities of Logistic Operators of the Department of Atlántico, a look towards the organizational efficiency. **EAI Endorsed Transactions on Energy Web**, v. 7, n. 27, p. 163983, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.163983>

MATIAS-PEREIRA, José. **Manual de Metodologia da Pesquisa Científica**. 4. ed. - [3. Rempr.]. São Paulo: Atlas, 2019. E-book. ISBN 9788597008821. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597008821/>. Acesso em: 09 jul. 2023.

MELLO, Carlos Henrique Pereira; TURRIONI, João Batista; XAVIER, Amanda Fernandes; CAMPOS, Danielle Fernandes. Pesquisa-ação na engenharia de produção: proposta de estruturação para sua condução. **Production**, 22(1), p. 1–13, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0103-65132011005000056>.

METODOLOGIA adapta empresas do Polo Industrial de Manaus à Indústria 4.0. **Revista Cenarium da Amazônia para o Mundo**. 2020. Disponível em: <https://revistacenarium.com.br/metodologia-adapta-empresas-do-polo-industrial-de-manaus-a-industria-4-0/>. Acesso em: 08 fev. 2022.

MOURTZIS, Dimitris. Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends. *International Journal of Production Research*, 58.7: 1927-1949, 2020.

MOURTZIS, Dimitris; DOUKAS, Michael; BERNIDAKI, Dimitra. Simulation in manufacturing: Review and challenges. **Procedia Cirp**, v. 25, p. 213-229, 2014.

NEGAHBAN, A., SMITH, J. S. Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. **Journal of Manufacturing Systems**. v. 33, n. 2, p. 241–261, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.12.007>

NEUMANN, Clóvis; SCALICE, Régis Kovacs. **Projeto de fábrica e layout**. Rio de Janeiro: Campus, 2021.

OLEŚKÓW-SZŁAPKA, Joanna *et al.* Logistics 4.0 maturity levels assessed based on GDM (grey decision model) and artificial intelligence in logistics 4.0-trends and future perspective. **Procedia Manufacturing**, v. 39, p. 1734-1742, 2019.

PAWLEWSKI, Paweł. Interactive Layout in the Redesign of Intralogistics Systems. **Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance**, p. 462–473, 2019. DOI: 10.1007/978-3-319-97490-3\_45.

PAWLEWSKI, Paweł; KOSACKA-OLEJNIK, Monika; WERNER-LEWANDOWSKA, Karolina. Digital twin lean intralogistics: Research implications. **Applied Sciences**, v. 11, n. 4, p. 1495, 2021.

PINHEIRO DE LIMA, Orlem *et al.* Una nueva definición de la logística interna y forma de evaluar la misma. **Ingeniare. Revista chilena de ingeniería**, v. 25, n. 2, p. 264-276, 2017.

PRODANOV, C. C.; Freitas, E. C.. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RODIČ, Blaž. Industry 4.0 and the new simulation modelling paradigm. *Organizacija*, 2017, 50.3: 193-207.

RODRIGUES, Gislene Salim; FERREIRA, João Carlos Espíndola; ROCHA, Carlos Rodrigues. A novel method for analysis and optimization of electric energy consumption in manufacturing processes. *Procedia Manufacturing*, 2018, 17: 1073-1081.

RÜßMANN, Michael; LORENS, Markus; GERBERT, Philipp; WALDNER, Manuela; JUSTUS, Jan; ENGEL, Pascal; HARNISCH, Michael. **Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries**. Boston consulting group, v. 9, n. 1, p. 54-89, 2015.

RÜTTIMANN, Bruno G.; STÖCKLI, Martin T. Lean and Industry 4.0 - twins, partners, or contenders? A due clarification regarding the supposed clash of two production systems. **Journal of Service Science and Management**, v. 9, n. 6, p. 485-500, 2016.

SANTOS, Carlos Henrique dos et al. Use of simulation in the industry 4.0 context: Creation of a Digital Twin to optimise decision making on non-automated process. **Journal of Simulation**. v. 16, n.3, p. 284-297, 2022.

SAUTER, M.; BARTHELME, J.; MÜLLER, C.; et al. Manual handling of heavy loads and low back pain among different occupational groups: results of the 2018 BIBB/BAuA employment survey. **BMC Musculoskeletal Disorders**, [S.l.], v. 22, n. 1, p. 1–12, 2021. Disponível em: <https://bmcmusculoskeletdisord.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12891-021-04819-z>. Acesso em: 08 setembro 2024.

SCHEIDEGGER, Anna Paula Galvão, et al. An introductory guide for hybrid simulation modelers on the primary simulation methods in industrial engineering identified through a systematic review of the literature. **Computers & Industrial Engineering**, v. 124, p. 474-492, 2018.

SCHLUSE, Michael, et al. Experimentable digital twins—Streamlining simulation-based systems engineering for industry 4.0. **IEEE Transactions on industrial informatics**, v. 14, n.4, p. 1722-1731, 2018.

SCHMIDTKE, Niels; GLISTAU, Elke; BEHRENDT, Fabian. Magdeburg logistics model—the smart logistics zone as a concept for enabling logistics 4.0 technologies. **Advanced Logistic Systems-Theory and Practice**, v. 13, n. 1, p. 7-16, 2019.

SILVA, Michele Lins Aracaty e; LUCAS, Mauro Maurício Barbosa; OLIVEIRA, Marcílio Lima de. Teorias do desenvolvimento regional: o modelo Zona Franca de Manaus e a 4a revolução industrial. **Informe GEPEC**, [S.I.], v. 25, n. 2, p. 107–124, 2021. DOI: 10.48075/igepec.v25i2.26512. Disponível em: <http://e-revista.unioeste.br/index.php/gepec/article/view/26512>. Acesso em: 08 fev. 2022.

SHARIATZADEH, Navid; SIVARD, Gunilla; CHEN, Danfang. Software evaluation criteria for rapid factory layout planning, design and simulation. **Procedia CIRP**, v. 3, p. 299-304, 2012.

SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair; JOHNSTON, Roberto. **Operations Management**. 7 ed. United Kingdom: Pearson Education, 2013.

STOCK, Tim; SELIGER, Günther. Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. **Procedia CIRP**, 2016, v. 40, p. 536-541, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>

SUNG, Tae Kyung. Industry 4.0: A Korea perspective. **Technological Forecasting and Social Change**, v.132, p. 40–45, 2018.

TANG, Christopher S.; VEELANTURF, Lucas P., The Strategic Role of Logistics in the Industry 4.0 Era. **Forthcoming in: Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2019. SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3400566>

TOMPKINS, James A. et al. **Planejamento de instalações**. 4 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2013.

URIARTE, Ainhoa Goienetxea; NG, Amos HC; MORIS, Matías Urenda. Supporting the lean journey with simulation and optimization in the context of Industry 4.0. **Procedia Manufacturing**, v. 25, p. 586-593, 2018.

VIEIRA, A. A. C., Dias, L. M. S., Santos, M. Y., Pereira, G. A. B., & Oliveira, J. A. (2018). Setting an industry 4.0 research and development agenda for simulation – A literature review. **In International Journal of Simulation Modelling**. v. 17, n. 3, p. 377–390. DOI: [https://doi.org/10.2507/IJSIMM17\(3\)429](https://doi.org/10.2507/IJSIMM17(3)429)

VITERI-VITERI, Diego; RODRÍGUEZ-LUNA, Andréé; AVILÉS-SACOTO, Sonia; MOSQUERA-RECALDE, Galo. Using Simulation for Facility Layout Problems: A Case Study of an Ecuadorian Handcraft Chocolate Company. **Trends in Industrial Engineering Applications to Manufacturing Process**. [s.l.] Springer International Publishing, 2021. p. 389–434. DOI 10.1007/978-3-030-71579-3\_17.

WANG, Shiyong, et al. Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook. **International journal of distributed sensor networks**, v. 12, n.1, p. 3159805, 2016.

WINKELHAUS, Sven; GROSSE, Eric H. Logistics 4.0: a systematic review towards a new logistics system. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 1, p. 18-43, 2020.

WINKLER, Hannes; ZINSMEISTER, Lena. Trends in digitalization of intralogistics and the critical success factors of its implementation. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 16, n. 3, p. 537-549, 2019

XU, Jie, et al. Simulation optimization in the era of Industrial 4.0 and the Industrial Internet. **Journal of Simulation**, v.10, n. 4, p. 310-320, 2016.

YAVAS, Volkan; OZKAN-OZEN, Yesim Deniz. Logistics centers in the new industrial era: A proposed framework for logistics center 4.0. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 135, p. 101864, 2020.

YÜCESAN, Enver; FOWLER, J.W. Simulation analysis of manufacturing and logistics systems. **Encyclopedia of production and manufacturing management**, edited by P. Swamidass. p. 687-97, 2000.

ZRNIĆ, Nenad et al. A Survey of Research on Industry 4.0 in Intralogistics. **Proceedings of X International Conference “Heavy Machinery-HM 2021”**. Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo, 2021.

ZÚÑIGA, Enrique Ruiz; MORIS, Matias Urenda; SYBERFELDT, Anna. Integrating simulation-based optimization, lean, and the concepts of industry 4.0. In: **2017 Winter Simulation Conference**, p. 3828-3839, 2017.