

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA

Henrique Bresolin de Carli

**Simulação aplicada no projeto de automatização de um almoxarifado com AGVs em
uma fábrica de motores elétricos**

Florianópolis

2020

Henrique Bresolin de Carli

**Simulação aplicada no projeto de automatização de um almoxarifado com AGVs em
uma fábrica de motores elétricos**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica com habilitação Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Enzo Morosini Frazzon

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

CARLI, HENRIQUE BRESOLIN DE

Simulação aplicada no projeto de automatização de um
almoxarifado com AGVs em uma fábrica de motores elétricos
/ HENRIQUE BRESOLIN DE CARLI ; orientador, ENZO MOROSINI
FRAZZON, 2020.

80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia de Produção Mecânica, Florianópolis,
2020.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção Mecânica. 2. Logística avançada.
3. Veículos autoguiados. 4. Simulação. 5. Indústria 4.0. I.
FRAZZON, ENZO MOROSINI. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia de Produção Mecânica. III.
Título.

Henrique Bresolin de Carli

**Simulação aplicada no projeto de automatização de um almoxarifado com AGVs em
uma fábrica de motores elétricos**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Mecânica” com Habilitação em Produção e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia de Produção Mecânica

Florianópolis, 08 de dezembro de 2020.

Prof. Guilherme Ernani Vieira, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Enzo Morosini Frazzon, Dr.-Ing.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Carlos Manuel Taboada Rodriguez, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Satie Ledoux Takeda Berger, Ma. Enga.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha família, meu orgulho.

AGRADECIMENTOS

Deixo registrada a minha gratidão àqueles que, não somente nesta fase de conclusão de curso, senão no decorrer destes anos de graduação, foram fonte de incentivo, suporte e inspiração em minha formação acadêmica e profissional.

Ao meu orientador, Prof. Enzo, que prontamente se engajou na orientação deste trabalho, demonstrando grande domínio de conteúdo e interesse pelo avanço tecnológico, muito obrigado.

Aos caros colegas de trabalho, que tanto me ensinaram durante os últimos anos, registro também imensa gratidão. São merecedores de todo sucesso.

Agradeço aos amigos e familiares os quais, diante de minha frequente ausência, apoiaram e respeitaram as minhas prioridades. Avós, irmão, sobrinho, tios, cunhados, sogros: vocês têm meu carinho e apreço!

Quero honrar a família que me acolheu, me adotou como filho e irmão, me deu um lar em seus corações e, por tantas vezes, em sua casa: Paulo (pai), Velma (mãe), Gabriel, Filipe e Tiago Azevedo, agradeço e reitero a minha admiração por cada um de vocês. É muito bom ser de casa!

À minha esposa, companheira e mulher da minha vida, Thaís Z. A. Bresolin, que tornou a minha graduação infinitamente mais alegre, meu grande “muito obrigado”. Essa jornada na engenharia (e na vida) não teria o mesmo significado sem sua companhia!

Agradeço a minha mãe, Rosani Bresolin, de quem muito me orgulho, pelos seus ensinamentos práticos de bom caráter, compaixão, coragem, persistência, carisma e amabilidade, os quais excedem, em valor, qualquer teoria que se possa aprender em uma instituição de ensino – você é minha heroína!

Por último, e mais importante: toda gratidão é devida a Deus – o meu Pai – Aquele que me trouxe até aqui e que, em meio a tantas adversidades, me susteve. Reconheço que sem sua bondade, personificada em Jesus Cristo, nada disso seria possível. Aliás, de fato, sem ele absolutamente nada seria.

“Truth is ever to be found in simplicity [...]”

Sir Isaac Newton

RESUMO

Um bom desempenho logístico é capaz de agregar valor a toda a cadeia de suprimentos de uma empresa, podendo garanti-la vantagens competitivas em relação aos seus concorrentes. Com um mercado cada vez mais exigente, torna-se também necessária, para as empresas, a adaptação às tecnologias capazes de suprir a demanda de um alto nível de atendimento em seus processos. A automatização de almoxarifados tem se destacado, neste âmbito, sendo uma das possíveis estratégias adaptativas adotadas. No contexto da Indústria 4.0, os sistemas de automação que possibilitam o atendimento às necessidades de demanda e a redução de custos, operando de forma integrada e com maior autonomia em relação aos modelos tradicionais, têm sido objeto de estudos, principalmente em face dos grandes investimentos projetados nos próximos anos. Diante disso, uma fábrica de motores elétricos criou um projeto de junção de seus almoxarifados de rotores e estatores em um único almoxarifado, o qual, deveria ser automatizado. Constatou-se, pela equipe de trabalho responsável pelo projeto, que a melhor alternativa, dentre as tecnologias disponibilizadas atualmente, seria a operação em um sistema com veículos autoguiados (AGVs). Devido à novidade deste tipo de tecnologia na fábrica, durante as etapas de detalhamento de projeto, sugeriu-se que valores mais assertivos para algumas variáveis fossem buscados. Assim, este trabalho tem como objetivo geral a análise de diferentes alternativas para o dimensionamento do almoxarifado automatizado de rotores e estatores. Para isso, é feita a caracterização das tecnologias envolvidas e do sistema atual, bem como do projeto da automatização do almoxarifado. Avaliam-se diferentes alternativas para operação do sistema, utilizando-se de sua modelagem computacional e da simulação com movimentações históricas (portanto, reais). São feitas análises sobre os diferentes resultados atingidos na simulação de cada cenário, para que se estime um número de veículos que, atendendo as necessidades de demanda, seja mais adequado aos interesses econômicos da empresa. Dos resultados atingidos, é feita uma análise dos parâmetros de operação do almoxarifado projetado, a qual auxilia a tomada de decisão sobre o dimensionamento. Por fim, são apresentadas análises gerais, considerações a respeito das lições aprendidas no desenvolvimento do projeto e conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Logística avançada. Veículos autoguiados. Simulação. Indústria 4.0.

ABSTRACT

A good logistics performance is capable of adding value to the entire supply chain of a company, which may result in advantages in comparison to its competitors. With an increasingly demanding market, it is also necessary for companies to adapt to technologies that can meet the need for a high level of service in their processes. The automation of warehouses has stood out in this context, being one of the possible adaptive strategies adopted. In the context of Industry 4.0, automation systems that make it possible to meet the demand and reduce costs, operating in an integrated manner and with greater autonomy in relation to traditional models, have been the object of studies, especially taking into consideration the large investments projected in the coming years. In light of this, an electric motor factory created a project to join its rotor and stator warehouses into a single warehouse, which should be automated. It was found, by the work team responsible for the project, that the best alternative, among the technologies currently available, would be the operation in a system with automated guided vehicles (AGVs). Due to the novelty of this type of technology at the factory, during the project detailing stages, it was suggested that more assertive values for some variables were sought. Thus, this work has aims to analyze different alternatives for the dimensioning of the automated warehouse of rotors and stators. This is done through the characterization of the current system and the technologies involved, as well as the automation project of the warehouse. Different alternatives are evaluated for the operation of the system, using its computational modeling and simulation with historical (therefore, real) data. Analysis are made on the different results achieved in the simulation of each scenario, so that a number of vehicles is estimated to meet the demand and the company's economic interests. From the results achieved, an analysis of the operating parameters of the projected warehouse is made, which assists in the decision-making for dimensioning. Lastly, a general analysis and considerations about the lessons learned in the development of the project are presented, as well as conclusions and recommendations for future work.

Keywords: Advanced logistics. Automated guided vehicles. Simulation. Industry 4.0.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferentes tipos de AGVs	22
Figura 2 - Diagrama de blocos de estruturas do AGV	23
Figura 3 - Exemplo de AGV tipo empilhadeira com possibilidade de operação manual ...	27
Figura 4 - Diferentes níveis de abstração na simulação.....	29
Figura 5 - Abordagens de trabalhos de simulação aplicados em projetos de almoxarifados	30
Figura 6 - Tipos de pesquisa em modelagem quantitativa.....	33
Figura 7 - Modelo sugerido por Mitroff	34
Figura 8 - Passos seguidos na execução do trabalho	35
Figura 9 - Representação do fluxo de materiais na produção de rotores e estatores; dados levantados pela equipe de trabalho ante histórico de movimentações no ano de 2019	39
Figura 10 - Processo de pesagem de uma grade de rotores; à direita, principais dimensões da grade de tipo I (mm)	40
Figura 11 - Armazenagem da grade de tipo II e, à direita, suas dimensões (mm).....	40
Figura 12 - Pálete com estatores; à direita, dimensões do pálete (mm).....	41
Figura 13 - Estrutura dos porta-páletes.....	42
Figura 14 - Processo de pesagem de grade, com destaque aos apontamentos.....	43
Figura 15 - Movimentações no cenário proposto	45
Figura 16 - Área disponível para construção do novo almoxarifado.....	46
Figura 17 - <i>Layout</i> proposto.....	47
Figura 18 - Esboço do método de guiamento a <i>laser</i>	48
Figura 19 - Tramitação de dados para grades de produtos acabados.....	49
Figura 20 - Tramitação de dados dentro do almoxarifado automatizado, para recebimento e armazenagem de produtos acabados	50
Figura 21 - Tramitação de dados na solicitação de material nos centros consumidores	51
Figura 22 - Fluxo de informações na coleta de materiais para centros consumidores	52
Figura 23- Fluxo de informações de adensamento	53
Figura 24- Áreas de armazenagem para itens, de acordo com a classificação ABC	55
Figura 25- Representação do almoxarifado, conforme visualizado no <i>software</i>	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais tipos de sistema de navegação dos AGVs e suas características.....	24
Quadro 2 - Perdas e ineficiências do cenário atual	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Percentual do faturamento total para diferentes áreas da automação de almoxarifados; projeção até o ano de 2025.	21
Gráfico 2 - Variação de velocidade ao longo do tempo, na movimentação dos rotores de tipo A.....	56
Gráfico 3 - Distribuição de frequência de tempos de espera no Cenário 1	59
Gráfico 4 - Distribuição de frequência de tempos de espera no Cenário 2	59
Gráfico 5 - Distribuição de frequência de tempos de espera no Cenário 3	60
Gráfico 6 - Distribuição de frequência de tempos de espera no Cenário 4	60
Gráfico 7 - Distribuição de frequência de tamanhos de fila na saída para o Cenário 1	62
Gráfico 8 - Distribuição de frequência de tamanhos de fila na saída para o Cenário 2.....	62
Gráfico 9 - Distribuição de frequência de tamanhos de fila na saída para o Cenário 3.....	63
Gráfico 10 - Distribuição de frequência de tamanhos de fila na saída para o Cenário 4.....	63
Gráfico 11 - Distribuição de frequência do tamanho de fila na entrada; Cenário 1	64
Gráfico 12 - Distribuição de frequência do tamanho de fila na entrada; Cenário 2	65
Gráfico 13 - Distribuição de frequência do tamanho de fila na entrada; Cenário 3	65
Gráfico 14 - Distribuição de frequência do tamanho de fila na entrada; Cenário 4	66
Gráfico 15 - Distribuição de frequência dos níveis de carga de bateria; Cenário 1	67
Gráfico 16 - Distribuição de frequência dos níveis de carga de bateria; Cenário 2	67
Gráfico 17 - Distribuição de frequência dos níveis de carga de bateria; Cenário 3	68
Gráfico 18 - Distribuição de frequência dos níveis de carga de bateria; Cenário 4	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGV	<i>Automated Guided Vehicle</i>
AIDC	<i>Automatic Identification and Data Collection</i>
AMR	<i>Autonomous Mobile Robot</i>
CCD	<i>Charge-coupled device</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FIFO	<i>First-in-first-out</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IHM	Interface Homem-Máquina
IoT	<i>Internet of Things</i>
<i>Laser</i>	<i>Light amplification by stimulated emission of radiation</i>
MRO	<i>Maintenance, Repair, and Overhaul</i>
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
OP	Ordem de Produção
Qtd	Quantidade
RFID	<i>Radiofrequency Identification</i>
ROI	<i>Return Over Investment</i>
SKU	<i>Stock Keeping Unit</i>
TCO	<i>Total Cost of Ownership</i>
TEEP	<i>Total Effectiveness Equipment Performance</i>
TI	Tecnologia da Informação
WMS	<i>Warehouse Management System</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	16
1.2 OBJETIVO GERAL.....	17
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 AUTOMAÇÃO DE ALMOXARIFADOS	19
2.2 VEÍCULOS AUTOGUIADOS	22
2.2.1 AGV do tipo empilhadeira.....	26
2.3 SIMULAÇÃO APLICADA NA MOVIMENTAÇÃO DE MATERIAIS	27
3 MÉTODO	32
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO	32
3.2 ETAPAS	34
3.3 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	35
4 CARACTERÍSTICAS DO PROJETO E MODELAGEM.....	37
4.1 A EMPRESA E A EQUIPE DE TRABALHO	37
4.2 CENÁRIO ATUAL	37
4.2.1 Movimentações.....	37
4.2.2 Recipientes.....	39
4.2.3 Estrutura dos almoxarifados	41
4.2.4 Controle e Registros	42
4.2.5 Perdas e ineficiências.....	44
4.3 CENÁRIO PROPOSTO	45
4.3.1 Área disponível.....	46
4.3.2 <i>Layout</i> Proposto	46
4.4 CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS.....	48

	16
4.5 CONECTIVIDADE.....	49
4.5.1 Prensas rápidas – Almoxarifado	49
4.5.2 Recebimento no Almoxarifado	50
4.5.3 Almoxarifado – Centros de consumo de lâminas	51
4.5.4 Coleta no Almoxarifado	51
4.5.5 Retorno de lâminas	52
4.6 CENÁRIOS DE ESTUDO	53
4.6.1 Cenários 1 a 4 - operação com políticas de alocação e priorização, e diferentes números de AGV.....	54
4.7 RESULTADOS E ANÁLISES.....	57
4.7.1 Resultados para o tempo de espera	58
4.7.2 Resultados para o tamanho da fila de pedidos de entrega	61
4.7.3 Resultados para a quantidade de grades aguardando entrada	64
4.7.4 Resultados para a carga geral das baterias.....	66
4.7.5 Análises gerais	69
5 CONCLUSÃO.....	71
REFERÊNCIAS	73
ANEXO I – Layout do almoxarifado de lâminas de rotores atual.....	79
ANEXO II - Layout do almoxarifado de lâminas de estatores atual.....	80

1 INTRODUÇÃO

A quarta revolução industrial tem impactado significativamente os processos e sistemas de manufatura. Ao passo que a automação vem tomando cada vez espaço no contexto industrial – somando-se às tecnologias, interconectividade e dinamismo típicos da Indústria 4.0 – investimentos em produtividade e flexibilidade se fazem cada vez mais importantes para as empresas. Neste cenário, a automação otimizada de sistemas é uma das grandes demandas adaptativas para as empresas (MEHAMI; MAULUDIN; ZHONG, 2018).

No tocante aos sistemas de armazenagem, especificamente, a automatização de almoxarifados tem sido destacada em publicações recentes. As tecnologias atuais são capazes de conciliar o aumento da complexidade das funções do armazém, mesmo sob restrições de espaço e nível de qualidade desejado, sendo ainda capazes de minimizar os custos de funcionamento do sistema (VAN GEEST; TEKINERDOGAN; CATAL, 2020).

Segundo Baker e Halim (2007), embora os equipamentos de almoxarifados automatizados sejam muitas vezes considerados inflexíveis, o seu uso continua a aumentar – mesmo diante de mercados voláteis. Do estudo publicado pelos autores, observa-se que os principais motivos estão relacionados ao crescimento de demanda e ao desejo de se obter melhores desempenhos em custo e em níveis de serviço. É necessário, apontam, que se entenda bem qual é o papel estratégico da automatização de almoxarifado e os riscos a ela concernentes.

Já para Custodio e Machado (2020), é fundamental, para garantir a flexibilização desses sistemas, que se tenha uma boa combinação de equipamentos automatizados, tecnologias de coleta de dados e soluções de gerenciamento.

Diante disso, em um projeto real de automatização de almoxarifado, em uma fábrica de motores elétricos, projetou-se, além de garantir a autonomia do novo sistema, combinar dois almoxarifados já operantes anteriormente – um de lâminas de estatores e um de lâminas de rotores, previamente funcionando em prédios distintos. Assim, fez-se necessário criar um *layout* para operação. Após analisar os equipamentos de movimentação disponíveis no mercado, concluiu-se que a alternativa mais adequada, nesta situação, seria utilizar-se de veículos autoguiados (AGVs).

Entretanto, durante a etapa de dimensionamento do novo almoxarifado, fez-se necessário definir a quantidade de veículos para operar todas as movimentações, atendendo a demanda total de ambos os almoxarifados no novo *layout* sugerido. Levando-se em conta o dispêndio financeiro demandado na aquisição dos equipamentos, apontou-se, pela equipe

técnica responsável pelo projeto (composta inclusive pelo autor deste trabalho), a necessidade de métodos mais apurados na definição desta quantidade.

Sendo a simulação uma das melhores ferramentas disponíveis atualmente para realizar testes de cenários, tanto no tocante à entrada de materiais nos almoxarifados quanto a sua armazenagem e saída (BUČKOVÁ; KRAJČOVIČ; JERMAN, 2017), buscou-se então fazer a modelagem do sistema proposto utilizando dados históricos de demanda.

As principais decisões tomadas nesta modelagem estão relatadas neste trabalho, bem como os resultados atingidos nas simulações em diferentes cenários, para diferentes variáveis, no que diz respeito ao desempenho dos veículos autoguiados e ao nível de atendimento do sistema de armazenagem proposto.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Sendo a automatização de movimentações com veículos autoguiados uma tecnologia nova a se implantar nesta fábrica, foi imprescindível que os estudos desenvolvidos em fase de projeto fossem bem fundamentados, tornando o processo de tomada de decisão mais confiável e assertivo.

Além disso, devido ao grande interesse manifesto por parte da empresa em familiarizar-se com as tecnologias 4.0, especialmente na área de logística, e expandir o uso de AGVs para outros centros de trabalho, fábricas e parques fabris, todo o *know-how* adquirido durante a realização deste projeto-piloto, sendo documentado, poderá fomentar e facilitar estudos internos para implementações futuras.

No tocante à atualidade do tema, embora a utilização de modelos mais tradicionais de AGVs tenha se iniciado em meados do século passado, observa-se que o advento de sistemas autônomos, que oferecem maior liberdade de movimento e facilidade de integração, garantem a este tipo de equipamento alta aplicabilidade e crescente aderência nos dias atuais (FEDORKO; HONUS; SALAI, 2017).

Portanto, a justificativa deste trabalho é prática no sentido de garantir a autonomia dos veículos autoguiados (AGVs) no novo almoxarifado de lâminas, tendo enfoque econômico, pois busca reduzir ao máximo possível o número de AGVs a serem adquiridos pela empresa na implantação almejada pelo projeto.

Ademais, uma vez que todos os dados expostos nesta obra são reais, podendo eventualmente embasar trabalhos futuros, dentro e fora da empresa, o trabalho se justifica também teoricamente.

1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral analisar, utilizando simulação, alternativas para o dimensionamento de um almoxarifado automatizado de lâminas de rotores e estatores em uma fábrica de motores elétricos.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, foram traçados como objetivos específicos deste trabalho:

- a. caracterizar a automação de almoxarifados, os veículos autoguiados (AGVs) e a simulação aplicada na movimentação de materiais;
- b. caracterizar a operação, conforme ocorre atualmente na empresa;
- c. projetar o almoxarifado unificado, que operará de forma automatizada, incluindo alternativas de dimensionamento dos equipamentos de movimentação e;
- d. avaliar o dimensionamento dos equipamentos no almoxarifado automatizado projetado.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos.

O presente capítulo trata da contextualização do trabalho, dos seus objetivos gerais e específicos, de sua justificativa e estrutura.

O segundo capítulo traz um levantamento bibliográfico referente a assuntos pertinentes ao tema do trabalho: a automação de almoxarifados no contexto da Indústria 4.0, o funcionamento básico dos veículos autoguiados e princípios básicos da simulação computacional aplicada à armazenagem de materiais.

O terceiro capítulo apresenta o método adotado no desenvolvimento deste trabalho e suas etapas.

O quarto capítulo elenca as principais características dos almoxarifados, segundo operavam antes da implementação do sistema automatizado, e do projeto do almoxarifado automatizado unificado, desenvolvido na fábrica de motores. São sugeridas propostas de diferentes cenários e também expostas as aproximações e hipóteses utilizadas durante a aplicação de simulação, bem como os resultados atingidos. Por fim, são feitas análises de variáveis do processo, apresentadas como auxílio na tomada de decisão, e uma análise geral das lições aprendidas durante o desenvolvimento do trabalho.

O quinto capítulo apresenta a conclusão deste trabalho, sugerindo considerações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda, a partir de dados encontrados na literatura, as características gerais da automação em almoxarifados e os principais tipos de sistemas de aplicação. Dentre estes, tratando-se especificamente dos veículos autoguiados, são explicitados também alguns dados de relevância, como suas principais vantagens e particularidades de operação. Apresentam-se também peculiaridades dos veículos AGV do tipo empilhadeira. Por fim, o capítulo acrescenta uma revisão geral sobre a simulação aplicada na movimentação de materiais.

2.1 AUTOMAÇÃO DE ALMOXARIFADOS

Um bom desempenho logístico é capaz de agregar valor a toda a cadeia de suprimentos de uma empresa, sendo este um dos fatores-chave para que esta venha a obter vantagens competitivas em relação aos seus concorrentes. Entretanto, para que seja possível melhorar os resultados atingidos em seus processos, é importante que esta possa contar com ferramentas que tornem suas rotinas mais eficientes. Neste sentido, um dos recursos disponíveis é a automação.

Conceitualmente, a automação, segundo Santos (2014), diferencia-se da mecanização, uma vez que esta trata-se do emprego de equipamentos na substituição do esforço humano em algumas tarefas, enquanto que aquela diz respeito à instalação de equipamentos que são controlados de forma automática.

Embora a história da automação na logística tenha se iniciado ainda na época dos primeiros motores a vapor, quando se trata do potencial de automação, fatores como a escassez de mão-de-obra, a crescente demanda advinda do comércio eletrônico e os atuais avanços tecnológicos, mantém a indústria de transportes e movimentações de materiais em terceira posição na classificação de diferentes setores produtivos (DEKHNE et al.).

Complementarmente, segundo Baker e Halim (2007), os principais motivos que levam as empresas a buscar a aplicação de automação em suas movimentações são a adequação ao crescimento da demanda (no sentido de aumentar o tempo de operação de seus almoxarifados), a minimização de custos operacionais e o aumento no nível de atendimento. No tocante aos custos com mão-de-obra nos almoxarifados, especificamente, estes podem constituir até 65% do orçamento total de operação (HARRINGTON, 2008). Podem ainda ser mencionados como

benefícios da automação na logística interna a possibilidade de redução da fadiga dos operadores e dos erros de processo.

Segundo Caudell (2018), a automação de almoxarifados pode ser digital – abrangendo a coleta e tratamento de dados e informações – e/ou física, a qual pode utilizar-se de vários tipos de soluções mecânicas, como robôs ou sistemas robóticos. No cenário da Indústria 4.0, os almoxarifados integram soluções heterogêneas, como processos de negócios, agentes robóticos e máquinas, além da participação humana (KATTEPUR; MUKHERJEE; BALAMURALIDHAR, 2018). Alguns exemplos de componentes comumente encontrados em um almoxarifado automatizado, neste contexto, são: robôs (executando as tarefas de *picking* e *packing*); *tags* RFID (auxiliando na organização e controle do estoque), inteligência artificial (atuando, por exemplo, na escolha da melhor rota para efetuar a busca de materiais), e IoT integrando máquinas e sistemas, como o WMS (LOWE, 2019).

A despeito de oferecer inúmeras vantagens (algumas das quais ainda serão abordadas a seguir), tecnologias deste tipo podem ter vários fatores limitantes, quando se trata de sua implantação. A título de exemplo, inicialmente, para o projeto abordado neste trabalho, outros tipos de equipamentos de automatização para o almoxarifado foram cogitados, além dos AGVs, como a instalação de transelevadores. Entretanto, esta solução ficou inviabilizada diante do alto custo, tanto de aquisição do equipamento quanto de adaptações civis nas estruturas do prédio, uma vez que – para alocar todas as vagas necessárias, mantendo-se alguma vantagem em relação ao sistema com AGVs – o pé direito do mesmo teria que ser aumentado e o piso, reforçado.

Além do custo, é importante avaliar, quando se planeja automatizar um almoxarifado, fatores como o tempo de adaptação de pessoal e a confiabilidade do processo e dos *softwares* e *hardwares* que compõem o sistema de automação pretendido (ALLEN, 2020). O sistema automatizado precisa estar completamente alinhado à realidade para evitar, por exemplo, que este faça a busca por uma peça que, tendo sido registrada no computador, de fato, não esteja fisicamente no almoxarifado.

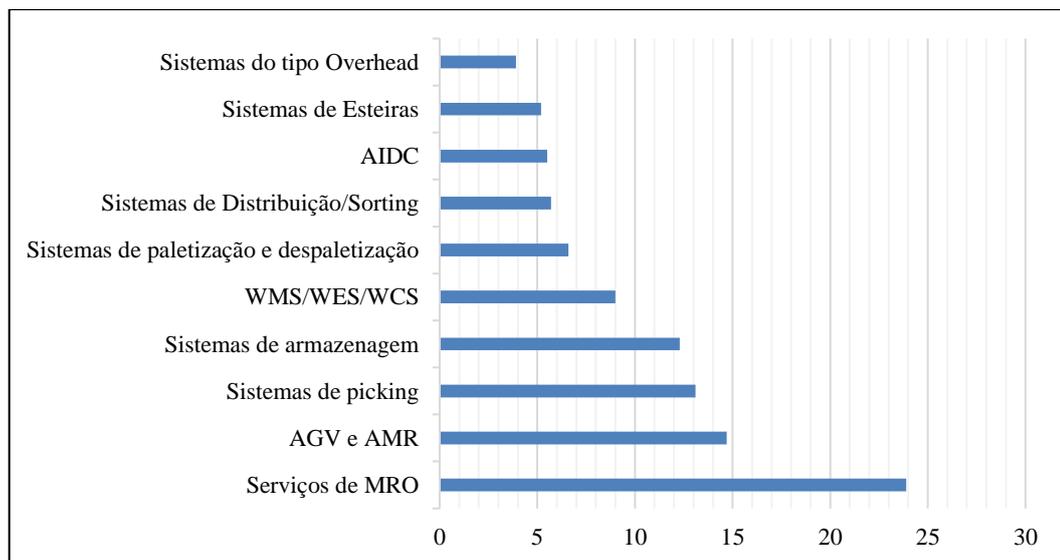
Não obstante as possíveis dificuldades de implementação, os sistemas de automação são cada vez mais comuns em centros de distribuição e almoxarifados. Até mesmo crises econômicas, como a advinda com a pandemia do coronavírus da síndrome respiratória aguda grave 2 (SARS-CoV-2, ou COVID-19), no presente ano, podem representar cenários favoráveis para a instalação de sistemas de automação. De acordo com McCrea (2020), a automação em almoxarifados e centros de distribuição, que já ganhava força em 2019, continuou a crescer,

especialmente diante das novas políticas de distanciamento social, trabalho remoto e outros desafios enfrentados pelas empresas durante a pandemia. Segundo pesquisa apresentada pela autora, o percentual de entrevistados em 2020 cujas empresas adotam automação nos processos de *picking and packing*, comparado com os dados de 2019, aumentou de 43% para 46%.

Conforme apresentado por McCrea (2020), os sistemas e soluções de automação são avaliados, pelos tomadores de decisão nas empresas, segundo alguns critérios. São eles, em ordem decrescente de relevância: a durabilidade do sistema; seu tempo em atividade sem descontinuidade; seu tempo de resposta (para efetuar a movimentação) e; seu TCO, ROI e custo de manutenção. Também são considerados o preço de aquisição, a disponibilidade de peças, o risco de obsolescência e a integração/compatibilidade com equipamentos já instalados.

A projeção de faturamento para sistemas de automação em almoxarifados, até o ano de 2025, está fracionada, de acordo com as diferentes tecnologias, conforme exposto no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Percentual do faturamento total para diferentes áreas da automação de almoxarifados; projeção até o ano de 2025.



Fonte: Adaptado de LOGISTICSIQ (2019, apud Goods, 2019).

Dentre as principais tecnologias exploradas, estão os veículos autoguiados, cujas características serão abordadas no próximo tópico.

2.2 VEÍCULOS AUTOGUIADOS

Os veículos autoguiados (AGVs) têm como princípio a autonomia na realização de movimentações de materiais, transportando-os, posicionando-os e armazenando-os sem o auxílio de um operador. Podem operar em rotas mais ou menos fixas, dentro e fora de instalações.

Os tipos de veículos autoguiados atualmente encontrados no mercado são diversos. Alguns exemplos são apresentados (vide Figura 1) por Augustsson (2016). As principais funcionalidades e/ou características são, para cada tipo:

- a. AGV tipo Empilhadeira: levantar e movimentar páletes;
- b. AGV de Montagem: efetuar pequenas movimentações de objetos, em baixa velocidade, durante operações de montagem;
- c. AGV de Transferência de Carga: carregar objetos, em movimento indexado ou contínuo, durante operações de montagem, seguindo rota pré-definida;
- d. AGV do tipo Guincho: traciona um ou mais veículos (formando uma espécie de trem), podendo operar com cargas pesadas, em longas distâncias;
- e. AGV de Cargas Pequenas: são veículos flexíveis e ágeis, utilizados para movimentar (em longas distâncias) itens pequenos, como caixas, sacolas e bandejas.

Figura 1 - Diferentes tipos de AGVs



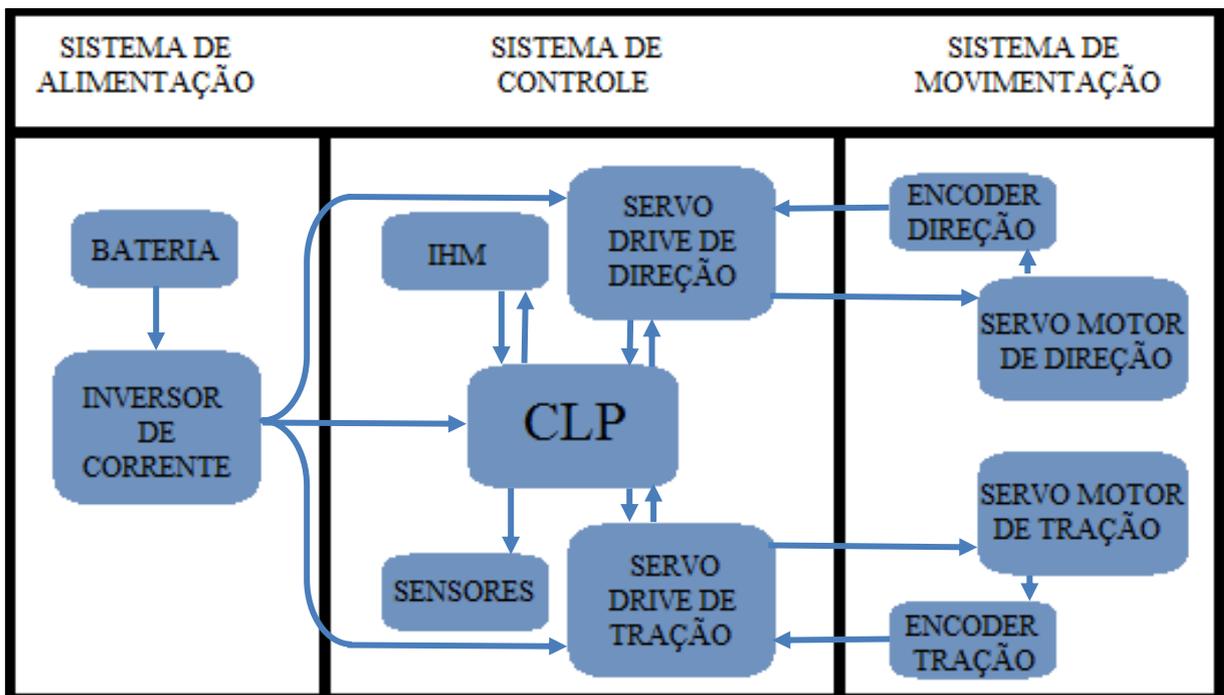
Fonte: Adaptado de AUGUSTSSON (2016).

Entre os anos de 1950 e 1990, os veículos autoguiados, dotados de sensores de toque que identificavam possíveis colisões, eram aplicados na movimentação de materiais seguindo rotas únicas (BECHTSIS et al., 2017). Atualmente, porém, com o advento da Indústria 4.0, faz-se crescente a aplicação de sistemas múltiplos, onde vários AGVs devem cooperar em *layouts* distintos. Além disso, para a realização de tarefas complexas, os veículos também devem

interagir com humanos, sendo capazes de diminuir os impactos ambientais e os custos com consumo de energia. Assim, as movimentações feitas com este tipo de veículo agregam valor à sua cadeia de suprimentos.

Segundo Oliveira (2011), as estruturas de um veículo autoguiado, e seus aspectos de funcionamento, podem ser representadas de acordo com o diagrama de blocos apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Diagrama de blocos de estruturas do AGV



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2011).

A respeito do sistema de navegação dos AGVs, especificamente, o Quadro 1 apresenta os principais tipos de controle e suas principais características, segundo apresentado por Long e Zhang (2012).

Quadro 1 - Principais tipos de sistema de navegação dos AGVs e suas características

MODO DE NAVEGAÇÃO	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Guiamento por coordenadas cartesianas	Utiliza-se um bloco de posicionamento para dividir a área da rota do AGV em uma série de pequenas áreas de coordenadas. Obtém-se então a orientação pela contagem de pequenas áreas.	Fácil alteração de rota, alta confiabilidade e não são necessárias alterações no ambiente.	Baixa exatidão e necessidade de medições complexas.
Guiamento eletromagnético	O AGV é guiado pela identificação da frequência eletromagnética presente em um fio de metal, que neste caso fica enterrado.	Não causa poluição ou danos, o princípio é simples e confiável, e não há interferência de som e luz.	É complexo e difícil de alterar o trajeto.
Guiamento óptico	Utiliza a taxa estável de reflexo de uma fita para determinar o caminho.	Alta flexibilidade e baixo custo.	Características do ambiente são altamente exigentes, confiabilidade baixa.
Guiamento a laser	Recebe o feixe de <i>laser</i> refletido do caminho de viagem do AGV para determinar sua posição e orientação; utiliza computação geométrica triangular.	Alta exatidão de posicionamento e flexibilidade de rota; atende em vários cenários.	Alto custo e especificidades na instalação do <i>scanner</i> .
Guiamento Inercial	Determina sua própria posição e orientação por meio do cálculo do sinal de polarização do giroscópio e da aquisição de sinal de posicionamento do terreno.	Alta exatidão de posicionamento e flexibilidade.	Alto custo de manufatura; o giroscópio é sensível à vibração.
Guiamento por reconhecimento de imagens	O AGV se localiza pelo reconhecimento de imagens do ambiente.	Utilizado em alguns países pelas forças armadas, está em estudos.	Alto custo.
Guiamento por GPS	Localização via satélite.	Comporta operações em ambientes externos, inclusive em rotas longas.	O ambiente influencia no controle da operação.
Guiamento por fita	Guiamento por sinal de indução magnética, feito por uma fita (não enterrada).	Alta flexibilidade e facilidade em se alterar ou aumentar a rota.	Está suscetível à interferência com materiais metálicos.
Guiamento ultrassônico	Localiza-se utilizando a reflexão de sinais ultrassônicos a partir de objetos.	Não há necessidade de instalar refletores.	O ambiente de reflexão é complexo.
Guiamento por visão	Estima a localização pela comparação da imagem produzida por uma câmera CCD e de um mapa em computador.	Flexível; não é necessário fazer um pré-ajuste da rota.	Alto custo e de difícil aplicação; tecnologia imatura.

Fonte: Adaptado de LONG; ZHANG (2012).

No contexto da Indústria 4.0, é introduzido ainda o conceito de *Smart AGV Systems* (THEUNISSEN et al., 2018). Em aplicações deste tipo, os veículos são dotados de conexão *wireless* à rede de dados, bem como de dispositivo de leitura de código, que pode ser do tipo RFID, por exemplo. Assim, os veículos podem se comunicar com outros equipamentos (IoT), assegurando maior agilidade e flexibilidade ao processo, uma vez que os dados tramitam em tempo real.

Existem inúmeras vantagens na aplicação da automatização com AGVs, como:

- a. o funcionamento contínuo (até 24 horas diárias, todos os dias);
- b. a segurança dos equipamentos, das estruturas, dos produtos movimentados e das pessoas envolvidas;
- c. possível redução dos custos operacionais, destacando-se o custo de mão-de-obra;
- d. operação em condições adversas, onde não seria possível a operação manual.

Quanto à sua implantação, uma das grandes dificuldades está em se estimar o número de veículos necessários (LE-AHN; DE KOSTER, 2005). De fato, quando se procura efetuar a substituição de veículos operados manualmente por AGVs, por exemplo, é possível que as limitações presentes nesta tecnologia não possibilitem a troca de “um para um”.

Além disso, segundo Lynch (2019), dentre os principais desafios para a aquisição e operação com os AGVs, também estão:

- a. as adaptações de *layout*, no caso de serem necessárias modificações nos corredores a serem percorridos pelos veículos;
- b. as dificuldades de gerenciamento de frota, uma vez que pode fazer-se necessário instalar dispositivos nas estruturas dos porta páletes para que os AGVs identifiquem a factibilidade de se “entrar” na vaga;
- c. as limitações em velocidade e movimentações, considerando raio de giro, graus de liberdade, habilidade de locomover-se para trás (ré) etc.;
- d. os custos de implantação e manutenção, incluindo modificações estruturais e informacionais, pois os AGVs devem ter acesso a dados que suportem sua tomada de decisão.

Sob o ponto de vista operacional, o roteamento dos veículos autoguiados pode apresentar conflitos. No entanto, estes podem ser contornados (a) pela adoção de caminhos segmentados, ou configurações do tipo *tandem queue*, (b) pela identificação de colisões iminentes, através de sensoriamento, seguida de recálculo de rota, ou ainda (c) pela definição

prévia de zonas de controle e planejamento antecipado, utilizando tempos determinísticos (REVELIOTIS, 2000).

2.2.1 AGV do tipo empilhadeira

Embora existam tipos diferentes de AGV disponíveis no mercado, segundo Ullrich (2015), citado por Borgemo e Jabrane (2018), a aplicabilidade de cada um está relacionada com o tipo de carga que é movimentada no almoxarifado. Para o transporte de páletes, por exemplo, são mais recomendados os tipos empilhadeira e *Piggyback*, sendo a empilhadeira mais adequada para situações onde há armazenagem em mais de um nível acima do solo.

Analogamente às empilhadeiras manuais, os AGVs do tipo empilhadeira podem ser customizados, de acordo com os requisitos físicos do projeto de automatização. Dessarte, além de executar as operações simples de retirada em rota fixa, têm capacidade de realizar tarefas mais complexas, como o taxiamento. Assim, estes equipamentos possibilitam maior integração entre os vários componentes do sistema (BORGEMO; JABRANE, 2018).

As manobras realizadas pelo AGV do tipo empilhadeira incluem a coleta de material ao nível do solo e em diferentes alturas, bem como a movimentação e a armazenagem de diversos tipos de recipientes (ULLRICH, 2015, apud BORGEMO; JABRANE, 2018).

Uma característica do AGV do tipo empilhadeira é a limitação que este equipamento apresenta na capacidade de carga, se comparado às empilhadeiras manuais. Comumente, os veículos comerciais com maior capacidade alcançam valores, em alturas de até 6 metros, de até 2500 quilogramas (JBT, 2020). Para movimentações mais elevadas, em contato com alguns fornecedores deste tipo de equipamento, poucos garantem a operação segura do equipamento em cargas de igual magnitude.

Os veículos deste tipo podem ter adaptação para operação manual (BORGEMO; JABRANE, 2018), conforme Figura 3. Assim, no caso de parada do equipamento ou em operação fora da área mapeada em sua programação, é possível efetuar seu deslocamento, evitando perdas por parada.

Figura 3 - Exemplo de AGV tipo empilhadeira com possibilidade de operação manual



Fonte: JUNGHEINRICH (2020).

2.3 SIMULAÇÃO APLICADA NA MOVIMENTAÇÃO DE MATERIAIS

Segundo Prado (2003), a simulação pode ser definida como uma técnica capaz de reproduzir o funcionamento de um sistema real no computador. No cenário virtual, torna-se possível criar, modificar e analisar o sistema sem o custo e o risco da atuação direta no cenário real.

Dentre as vantagens da utilização da simulação computacional, Kelton et al. (2000), citados por Shibuya et al. (2012), destacam:

- a. a possibilidade de analisar sistemas complexos que não conseguem ser descritos perfeitamente por modelos matemáticos;
- b. maior controle das condições experimentais do que seria possível no cenário real, uma vez que a simulação permite que sejam determinados os valores desejados para cada parâmetro;

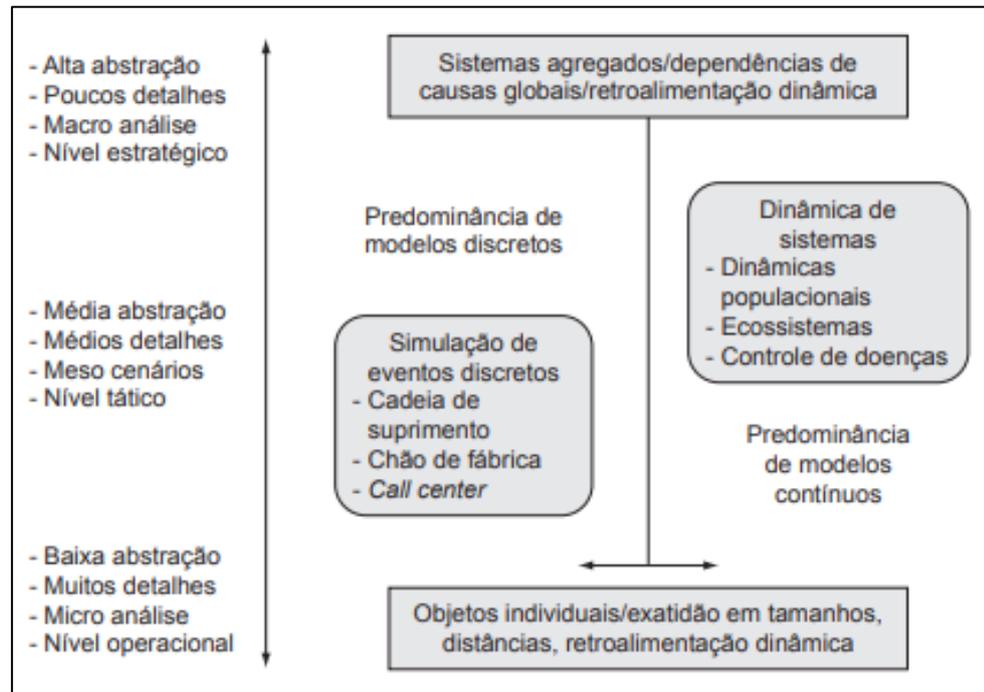
- c. a possibilidade de replicação precisa dos experimentos, permitindo a testagem de alternativas diferentes para o sistema;
- d. a viabilidade de simular longos períodos em tempo reduzido;
- e. a economia vinculada à não aquisição de equipamentos desnecessários para testes no cenário real.

De acordo com Chwif e Medina (2010), o estudo da simulação é composto por três etapas principais. São elas: concepção do modelo, implementação do modelo e análise dos resultados. A concepção do modelo é etapa na qual se busca o entendimento claro do sistema a ser simulado e seus objetivos, definição do escopo, hipóteses e nível de detalhamento, como também a coleta inicial dos dados de entrada. Na implementação do modelo, o modelo conceitual é convertido em um modelo computacional, por meio da utilização de uma linguagem de simulação. Por fim, na análise dos resultados, os experimentos são realizados e os resultados gerados são avaliados e documentados. Se o resultado não for satisfatório, o modelo pode ser modificado e o ciclo é reiniciado.

Para Miyagi (2006), o uso da simulação é indicado quando se deseja estudar as interações das variáveis presentes em um sistema ou subsistema. Pode auxiliar, inclusive, na experimentação prévia de novos projetos ou procedimentos, possibilitando a identificação das variáveis mais relevantes.

Para Sakurada e Miyake (2009), a simulação está sujeita a diferentes níveis de abstração. Enquanto que as simulações de eventos discretos tratam de sistemas com médio a alto nível de detalhamento (baixa abstração), a Dinâmica de Sistemas, utilizada em níveis estratégicos, os indivíduos não precisam ser altamente diferenciados e, portanto, pode haver um nível de abstração maior (vide Figura 4).

Figura 4 - Diferentes níveis de abstração na simulação



Fonte: SAKURADA; MIYAKE (2009).

Diante das características apresentadas, a simulação computacional é indicada para sistemas e/ou operações logísticas, quando os resultados das possíveis ações são pouco previsíveis e difíceis de serem identificados de maneira analítica (CARVALHO L., 2007).

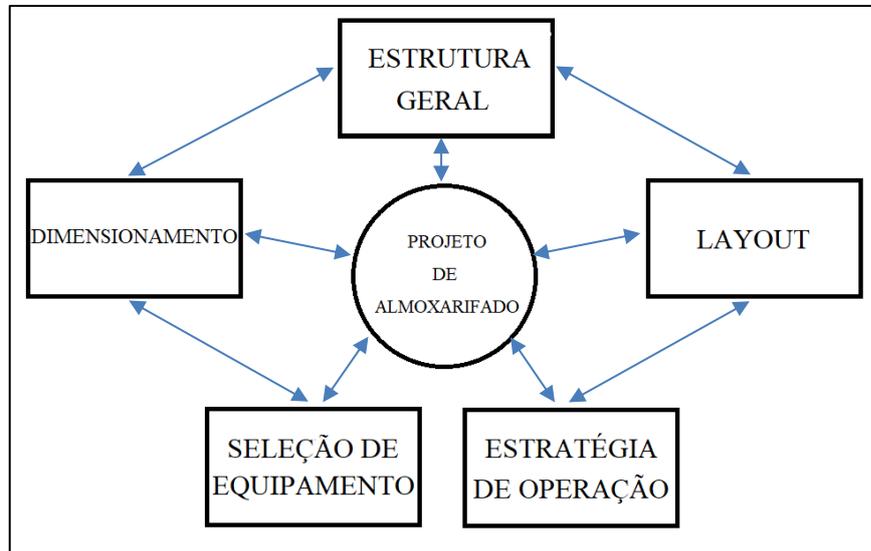
Segundo sugerido por Gu (2005), os trabalhos aplicados em projetos de almoxarifados podem ser realizados por meio de técnicas analíticas e/ou de simulação, e têm diferentes abordagens (vide Figura 5). Assim, pode-se observar que a simulação pode ser aplicada tanto na estimativa de quantidades de recursos, quanto em sua disposição e lógica de operação.

Quando aplicada na movimentação de materiais em um almoxarifado, por exemplo, que opera com empilhadeiras, tratando este sistema à luz da Teoria das Filas, a simulação é capaz de fornecer resultados que auxiliam na tomada de decisão de quantos operadores (motoristas) são capazes de otimizar o processo na planta, em diferentes cenários de demanda (ALNAHHAL; AHRENS, 2018).

Ainda a respeito da Teoria das Filas, Miyagi (2006), aponta as principais características presentes em um sistema de filas como: os elementos que serão atendidos pelo serviço; a natureza das chegadas; a natureza dos serviços em si; a capacidade do sistema e; a disciplina da fila. Traduzindo para os sistemas logísticos, podemos relacionar esses elementos, respectivamente, às vagas, entradas e saídas físicas do armazém; a natureza das movimentações;

os tempos de atendimento e capacidades dos veículos e; o comportamento das filas de espera desde as solicitações até a realização das movimentações.

Figura 5 - Abordagens de trabalhos de simulação aplicados em projetos de almoxarifados



Fonte: Adaptado de GU (2005).

Macro e Salmi (2002) apresentam um modelo desenvolvido para quantificar a capacidade de armazenagem em um armazém. O modelo proposto é universal, passível de aplicação em qualquer modelo de almoxarifado. Embora os autores sugiram que melhorias possam ser feitas no modelo, no sentido de agilizar os cálculos (no caso de trabalhos com almoxarifados maiores ou com mais dados), o seu modelo pode ser usado para analisar: a capacidade de armazenagem, os níveis de atendimento diante de cenários de variação de demanda; as limitações de recursos que possam vir a ocorrer e; o desempenho das políticas de priorização de movimentações e armazenagem. Os autores fazem a validação do método pela sua aplicação em um cenário de médio volume, com baixa quantidade de SKUs e em um cenário de médio volume com grande quantidade de SKUs.

Outros trabalhos, como o de Gagliardi, Renaud e Ruiz (2012) e o de Hwang and Cho (2006) utilizam a simulação como ferramenta de análise de performance do sistema de armazenagem, aplicando em diferentes regras de alocação de materiais. Carvalho J. (2002) apresenta um modelo de priorização que pode ser aplicado no estabelecimento destas regras de alocação.

Observa-se, assim, que a simulação pode ser uma ferramenta auxiliar na tomada de decisão para sistemas de armazenagem, em diferentes níveis de complexidade e aspectos distintos, inclusive para implementações futuras (RIOS et al., 2013).

3 MÉTODO

O presente capítulo apresenta a metodologia seguida no desenvolvimento deste trabalho, considerando sua contextualização e objetivos. Inicialmente, é feita a caracterização do estudo, para que sejam, então, determinadas as etapas a serem seguidas, e, por fim, as limitações da pesquisa.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO

Conforme já explicitado, o presente trabalho tem por objetivo realizar a análise de diferentes cenários, a fim de dimensionar um almoxarifado que opera com AGVs. Todas as movimentações neste sistema serão feitas de forma automatizada. Trata-se de um estudo conjunto, destinado a uma aplicação prática. A proposta é, fazendo-se uso da representação computacional do armazém automatizado, prescrever uma tomada de decisão assertiva. Portanto, do ponto de vista de seus objetivos, pode ser classificado como modelagem quantitativa. Uma vez que é proposto também o uso de simulação, deve-se escolher o método mais adequado para sua aplicação.

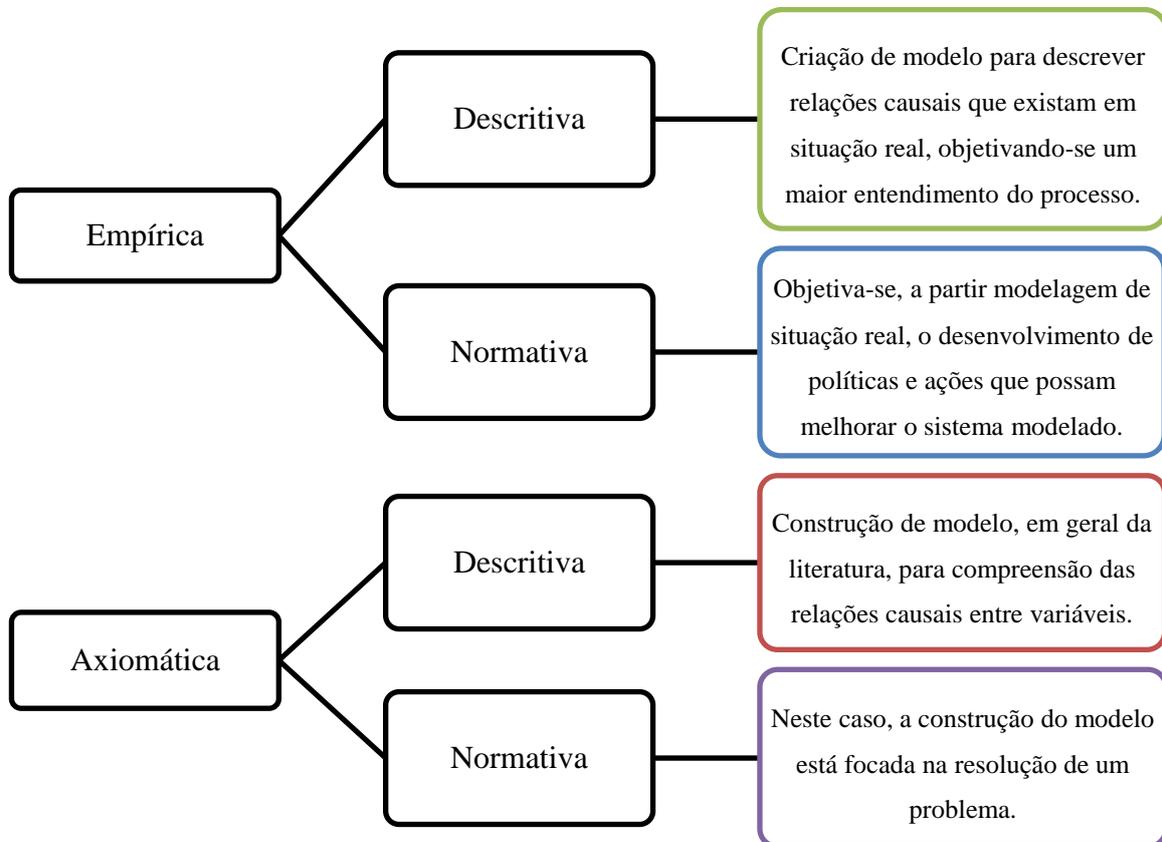
A modelagem, segundo Berto e Nakano (2000), citados por Miguel (2007), diz respeito à caracterização do funcionamento do todo ou de parte de um sistema produtivo utilizando-se de variáveis matemáticas.

Para Bertrand e Fransoo (2002), a modelagem quantitativa é baseada em conjuntos de variáveis que se alteram sobre um certo domínio. Existem, segundo os autores, duas classes para este tipo de estudo: as pesquisas axiomáticas e as pesquisas empíricas. Enquanto que naquelas o foco está em se obter soluções dentro de um modelo definido – produzindo conhecimento sobre as variáveis do próprio modelo –, nesta, o pesquisador está interessado em alinhar o modelo a um fenômeno real.

Estes mesmos autores classificam as pesquisas axiomáticas e empíricas em descritivas e normativas, segundo resumido na Figura 6.

Ademais, Bertrand e Fransoo (2002) também sugerem o modelo de Mitroff et al. (1974), que é baseado em abordagens utilizadas nos primeiros trabalhos da área de pesquisa operacional, e contém as fases de conceitualização ou elaboração conceitual, modelagem, solução do modelo e implementação (não sendo esta última, necessariamente, aplicável em pesquisas empíricas-descritivas). Uma representação deste modelo pode ser visualizada na Figura 7.

Figura 6 - Tipos de pesquisa em modelagem quantitativa

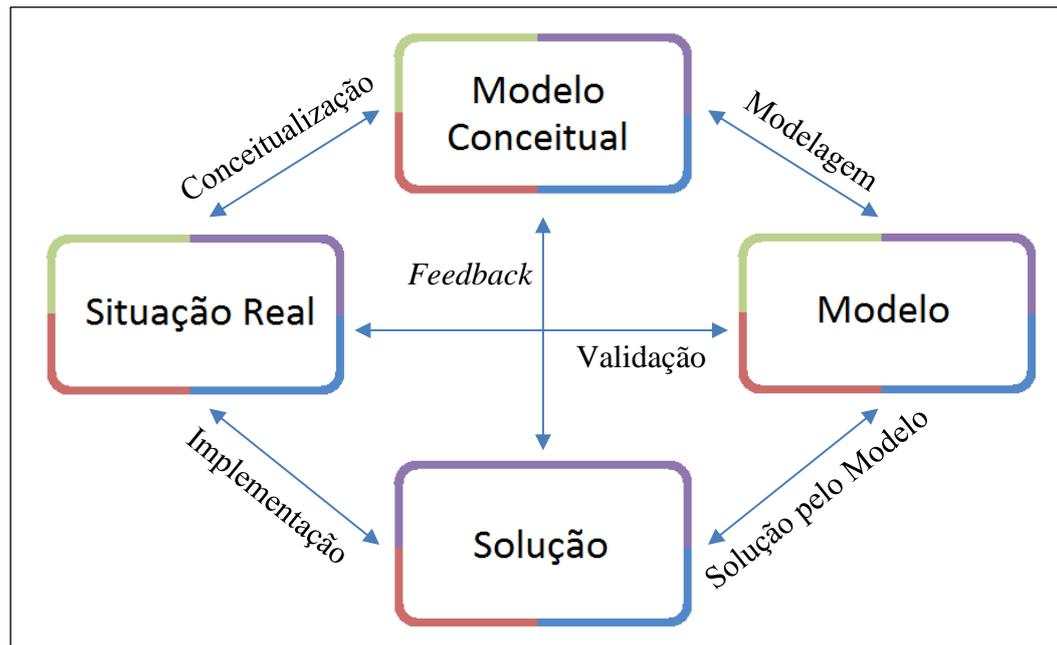


Fonte: Autor (2020).

A modelagem abordada neste trabalho foi realizada ainda durante o desenvolvimento do projeto. A partir dos dados reais levantados, buscou-se simular diferentes cenários e, com parâmetros de entrada diferentes, observar os comportamentos das variáveis consideradas relevantes pela equipe. Foi sugerido o melhor cenário, em termos econômicos e operacionais. Os resultados obtidos podem, então, ser utilizados como auxílio na tomada de decisão por parte da equipe de trabalho.

Assim, diante das classificações apresentadas, é possível observar que a abordagem de pesquisa mais adequada à contextualização e aos objetivos deste trabalho é a modelagem empírica-descritiva.

Figura 7 - Modelo sugerido por Mitroff



Fonte: Adaptado de BERTRAND; FRANSOO (2002).

3.2 ETAPAS

A fim de atingir o objetivo desejado pela equipe técnica, este trabalho apresenta os parâmetros utilizados na simulação das movimentações do novo almoxarifado a ser implantado na fábrica, bem como os resultados nela observados.

Conforme descrito anteriormente, o desenvolvimento deste trabalho, por ser uma modelagem quantitativa com simulação, deve envolver a elaboração conceitual, a construção do modelo e a sua validação, que visa garantir que o modelo esteja bastante fidedigno à realidade.

Considerando os aspectos gerais deste trabalho, foi possível, por fim, estabelecer etapas para sua confecção. Mais detalhadamente, tendo em vista o tipo de modelagem a ser aplicado, bem como o modelo de Mitroff et al. (1974) – que apresenta as fases de conceitualização, modelagem, solução do modelo e (se cabível) implementação, incluindo validação e realimentações – foi possível seguir o modelo sugerido por Robinson (2004) e adaptar os seguintes passos para alcançar o objetivo pretendido inicialmente (vide Figura 8): (1) definição do problema; (2) descrição do modelo conceitual; (3) codificação do modelo; (4) experimentação e (5) implementação do modelo de simulação. Cada uma das etapas pode ser descrita conforme segue:

- a. definição do problema: etapa na qual busca-se entender a situação ou problema a ser analisado;
- b. descrição do modelo conceitual: nesta etapa, é fornecida uma descrição detalhada do modelo a se desenvolver;
- c. codificação do modelo: etapa na qual busca-se converter o modelo conceitual em modelo computacional;
- d. experimentação: busca-se, nesta etapa, encontrar o melhor cenário, ou desenvolver um melhor entendimento do sistema analisado;
- e. implementação do modelo de simulação: finalmente, nesta etapa é apresentada uma mudança tangível ou um melhor entendimento da situação estudada.

Figura 8 - Passos seguidos na execução do trabalho



Fonte: Autor (2020).

3.3 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

O escopo do projeto abordado, conforme pré-definido pela equipe de trabalho, limita-se à automatização de um único almoxarifado que associa a armazenagem de lâminas, comumente chamadas de “chapas”, de rotores e de estatores, nos termos explicitados no Capítulo 4 deste trabalho.

Inicialmente, diante do conhecimento prévio das principais características do projeto, após os primeiros contatos com a equipe de trabalho na empresa, foi realizada uma pesquisa literária e comercial, a fim de identificar os principais problemas encontrados em estudos e implantações já realizadas. Assim, conhecendo também as características práticas do processo e limitações físicas da fábrica, a equipe delimitou o escopo das atividades e etapas a serem realizadas durante o desenvolvimento do projeto e, dentre elas, aquelas especificamente concernentes à simulação e modelagem do problema. As simplificações e suposições utilizadas pela equipe de trabalho, de igual forma, estão relatadas nos capítulos subsequentes.

No tocante às delimitações desta obra, particularmente, serão expostas as principais características de projeto, do cenário atual (antes da implementação da automatização), do cenário pretendido, dos parâmetros de modelagem e de seus resultados.

Detalhamentos técnicos das tecnologias embarcadas em equipamentos e soluções de TI não são aqui abordados. Devido ao sigilo solicitado pela empresa, dados sensíveis, como algumas características funcionais específicas de processo e algoritmos desenvolvidos na etapa de codificação do modelo, também permanecerão velados. Dados econômicos também permanecerão ocultos.

As conclusões expostas nos próximos capítulos, por fim, abordam recomendações do autor e da equipe de trabalho, que poderão eventualmente ser acatadas pela diretoria da empresa, de acordo com critérios por esta adotados.

4 CARACTERÍSTICAS DO PROJETO E MODELAGEM

Neste capítulo, são apresentadas as principais características da empresa, da equipe de trabalho e do projeto de automatização do almoxarifado de lâminas, desde o cenário atual até a situação proposta. O capítulo também traz uma breve apresentação das necessidades em conectividade. Em seu fechamento são, por fim, apresentados os diferentes cenários de estudo, bem como resultados atingidos na simulação, os quais, uma vez experimentados e validados pelos membros participantes, serão utilizados como auxílio na tomada de decisão.

4.1 A EMPRESA E A EQUIPE DE TRABALHO

O resultado atingido neste trabalho se destina ao apoio à decisão na implementação de um novo almoxarifado em uma fábrica de motores multinacional, situada na região sul do Brasil.

Seu desenvolvimento é realizado junto a uma equipe de trabalho multidisciplinar, contando com engenheiros mecânicos, engenheiros de produção, engenheiros de automação, engenheiros civis, técnicos de segurança do trabalho e programadores. Esta equipe é atualmente responsável por sugerir e desenvolver melhorias em processos, equipamentos e instalações nos parques fabris instalados no Brasil e também no exterior, de modo a proporcionar à empresa e segurança, produtividade e competitividade.

O grupo está à frente de implementações tecnologicamente disruptivas na fábrica, e tem particular interesse em métodos e equipamentos relacionados à Indústria 4.0, alinhando a temática de seus projetos com os objetivos estratégicos definidos pela diretoria da empresa.

Os resultados operacionais da empresa vêm demonstrando lucro crescente, e as projeções para os próximos exercícios seguem tendência de crescimento.

4.2 CENÁRIO ATUAL

A seguir, serão apresentadas as principais características físicas e de processo no cenário atual (antes da implementação do projeto). Estes mesmos dados foram levantados pela equipe e apresentados às empresas candidatas ao fornecimento dos AGVs.

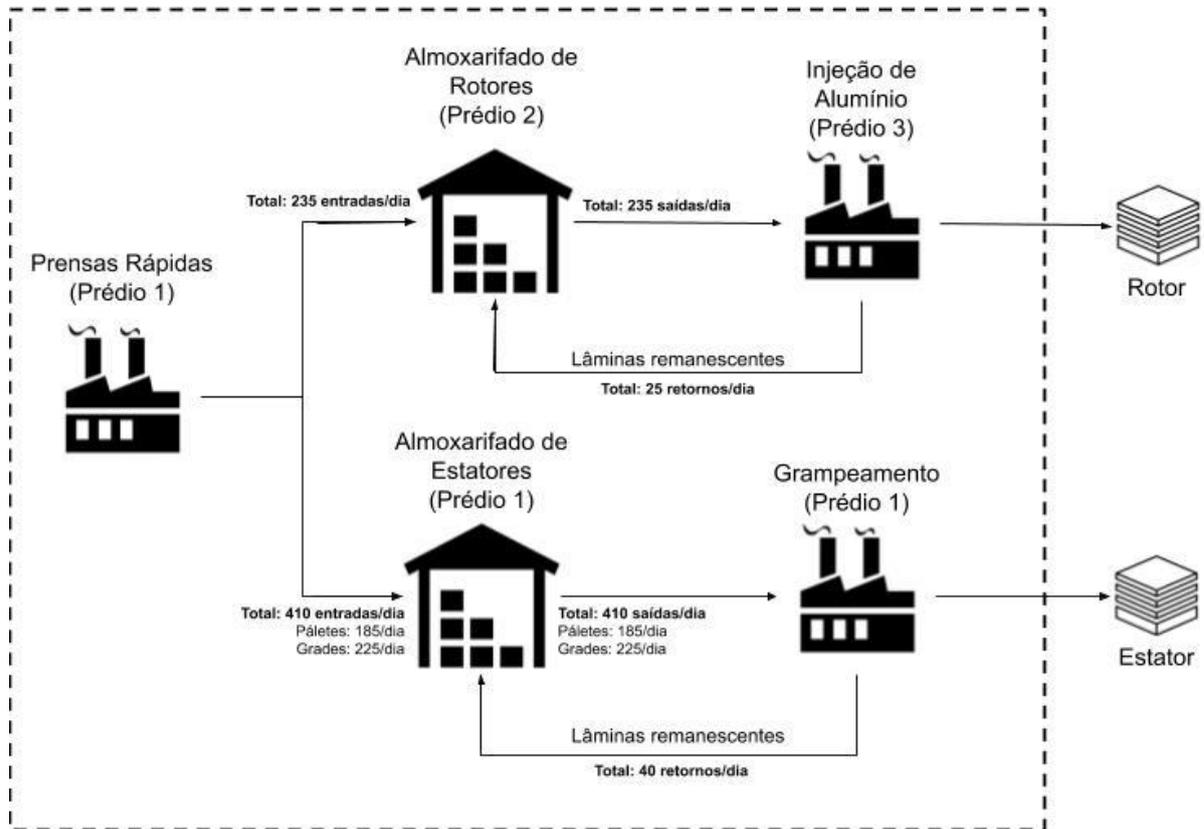
4.2.1 Movimentações

Os materiais a serem armazenados no novo almoxarifado automatizado são atualmente armazenados em dois almoxarifados, alocados em prédios distintos (vide Figura 9): o

almoxarifado de Rotores, com capacidade para 655 grades, e o almoxarifado de Estatores, com capacidade para 1100 recipientes, entre páletes e grades. A movimentação de materiais, neste cenário, ocorre conforme relatado a seguir:

- a. Almoxarifado de Rotores (Prédio 2): o processo se inicia no Departamento de Estamparia (Prédio 1), onde 31 centros de trabalho conformam chapas de aço e alocam as lâminas acabadas em recipientes (grades de aço). As grades são transportadas até o Prédio 2 em uma empilhadeira, onde são pesadas e armazenadas em porta-páletes. Quando o Departamento de Injeção de Rotores (Prédio 3) necessita de lâminas de rotor, uma ordem é enviada ao Almoxarifado de Rotores, que então providencia o transporte até o a entrada do prédio solicitante (novamente, este transporte é realizado por empilhadeira comum). Outra empilhadeira, então, movimenta a grade até o centro de trabalho consumidor. No caso de haver, ao final do processo de injeção, chapas não processadas na grade, estas devem retornar ao Prédio 2, utilizando-se dos mesmos meios, para pesagem, armazenagem e eventual adensamento (realocação de grade).
- b. Almoxarifado de Estatores (Prédio 1): no prédio onde as chapas são conformadas (Prédio 1), há um estoque para estatores, de modo que os materiais processados nos (mesmos) centros de trabalho dos rotores são ali armazenados. Os estatores são levados das prensas-rápidas até o almoxarifado por empilhadeira, sendo pesados antes da armazenagem. Quando solicitado pelo Grampeamento, que também se situa no mesmo prédio, as lâminas são retiradas dos porta-páletes por empilhadeira e transportadas ao respectivo centro consumidor. Analogamente, havendo lâminas remanescentes, estas devem retornar ao almoxarifado para pesagem, armazenagem e/ou adensamento.

Figura 9 - Representação do fluxo de materiais na produção de rotores e estatores; dados levantados pela equipe de trabalho ante histórico de movimentações no ano de 2019

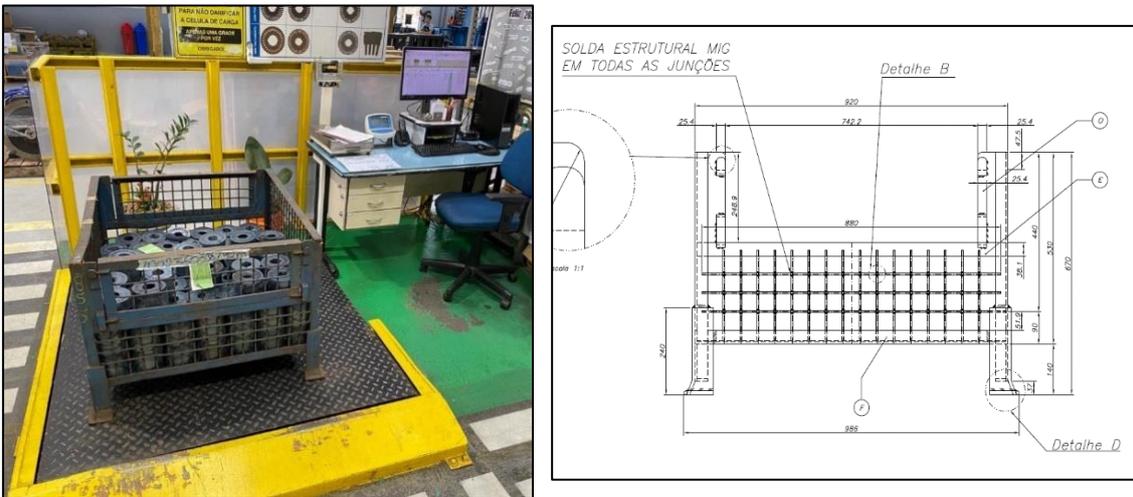


Fonte: Autor (2020).

4.2.2 Recipientes

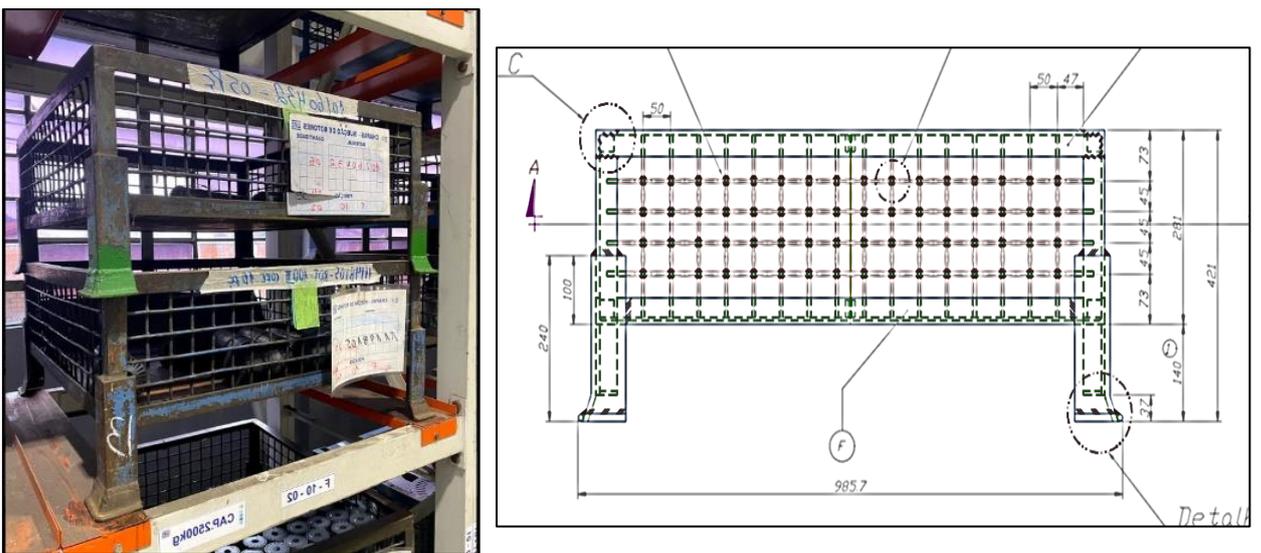
As lâminas de rotores são armazenadas em grades de aço quadradas (tipos I e II, vide Figuras 10 e 11), enquanto que as lâminas de estatores podem também ser armazenadas em paletes (Figura 12) de madeira (principalmente as de maior diâmetro). Um recipiente carregado pesa, em média, 1600kg, podendo chegar a até 2000kg.

Figura 10 - Processo de pesagem de uma grade de rotores; à direita, principais dimensões da grade de tipo I (mm)



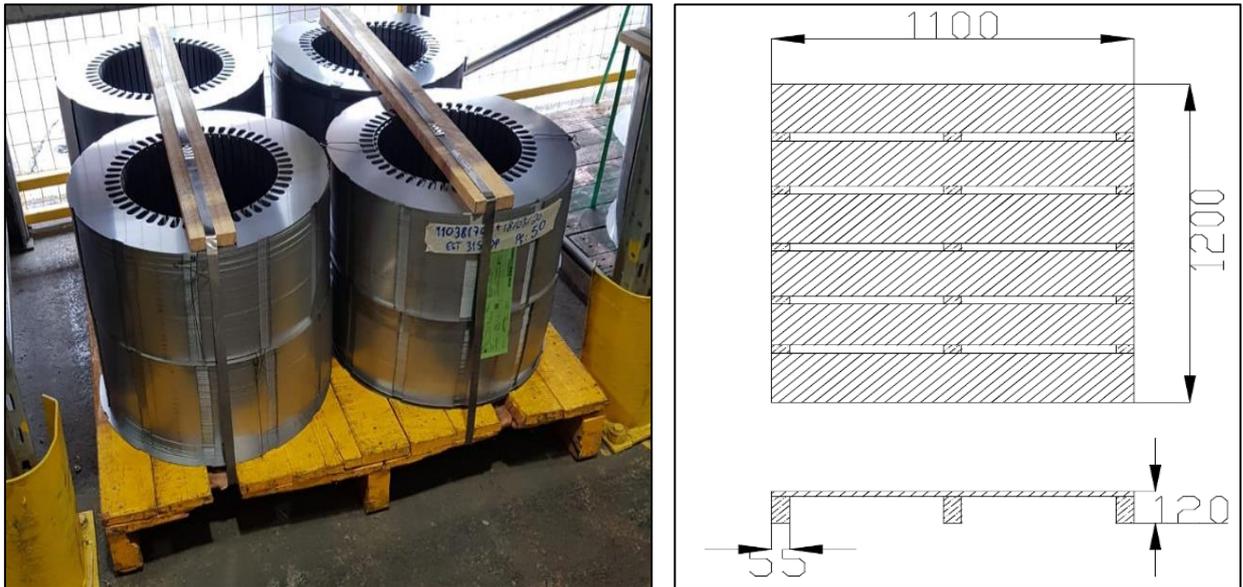
Fonte: Autor (2020).

Figura 11: Armazenagem da grade de tipo II e, à direita, suas dimensões (mm)



Fonte: Autor (2020).

Figura 12 - Pálete com estatores; à direita, dimensões do pálete (mm)



Fonte: Autor (2020).

4.2.3 Estrutura dos almoxarifados

Os *layouts* dos almoxarifados de rotores e estatores estão representados nos Anexos I (referente ao almoxarifado operando atualmente no Prédio 2) e II (referente ao almoxarifado operando atualmente no Prédio 1) deste trabalho.

A estrutura das colunas dos porta-páletes utilizada (Figura 13) é padrão comercial em aço e as entradas e saídas ocorrem somente de um lado da vaga. As dimensões das vagas variam de acordo com o tipo de recipiente a ser armazenado, uma vez que as vagas para páletes necessitam ser maiores do que as vagas para grades. Apesar do uso de protetores de coluna, a estrutura apresenta diversos sinais de danos, já que está sujeita a deformações advindas de choques com as empilhadeiras. Muitos dos protetores, inclusive, estão soltos devido a ocorrências passadas. As longarinas e colunas não são do tipo de caldeiraria.

Figura 13 - Estrutura dos porta-páletes



Fonte: Autor (2020).

4.2.4 Controle e Registros

Atualmente, o controle de movimentações nos almoxarifados é feito por operadores. Na entrada de materiais, após efetuar o transporte e a armazenagem das grades, os mesmos registram o endereço, peso, tara da grade e código de SKU em uma folha de papel (Figura 14). Durante o turno, esses dados são transferidos para um *software*, para mero registro das informações. Quando é necessário retirar material do almoxarifado, o mesmo sistema é consultado e o(s) endereço(s) do respectivo SKU é(são) indicado(s). No caso de haver mais do que uma vaga ocupada pelo SKU solicitado, o operador faz a seleção de uma das vagas,

seguindo a recomendação de fazer a menor quantidade de movimentações possível e, se factível, respeitando a lógica FIFO. Ao todo, são 994 SKUs para estatores e 1.312 para rotores.

Embora a empresa tenha acesso a um módulo de WMS em seu sistema de ERP, estes almoxarifados não fazem essa integração de forma automática ou simultânea. Uma vez que a priorização de retirada de materiais é feita pelos próprios operadores, ocorre frequentemente a obsolescência de materiais.

Figura 14 - Processo de pesagem de grade, com destaque aos apontamentos.



Fonte: Autor (2020).

4.2.5 Perdas e ineficiências

No sistema atual, é possível apontar algumas perdas e ineficiências. Algumas das principais estão descritas no Quadro 2.

Quadro 2 - Perdas e ineficiências do cenário atual

CARACTERÍSTICA	PERDA / INEFICIÊNCIA
Distâncias entre almoxarifados	Anualmente, são percorridos cerca de 10.000 km entre o Prédio 1 e o Prédio 2.
Trajetos Prédio 1 - Prédio 2 descoberto	Em dias chuvosos, as lâminas estão sujeitas à exposição à água, facilitando sua oxidação.
Terreno irregular das vias	Devido à sinuosidade das vias e às irregularidades no terreno, as lâminas se movimentam, gerando desorganização e defeitos estruturais.
Operação manual no transporte das grades	Alguns quase-acidentes advindos de manobras mal executadas foram registrados no local, com perda de material. Houve também registro acidente envolvendo operador, gerando dispêndio monetário.
Consumo	O consumo de combustível é proporcional à grande quantidade de movimentações.
Empilhadeiras a gás	Por serem movidas a combustível fóssil, as empilhadeiras não são otimizadas em sustentabilidade.
Apontamentos manuais	Foram registradas divergências entre as quantidades armazenadas fisicamente e aquelas apontadas no <i>software</i> utilizado pelos operadores.
Quantidade de funcionários	Com a operação em três turnos, deve haver três equipes em operação em cada um dos dois almoxarifados
Paradas	Os operadores efetuam paradas programadas e não programadas durante o turno, reduzindo OEE e TEEP
Operação manual na armazenagem	Usualmente, as manobras realizadas pelos motoristas das empilhadeiras acabam danificando a estrutura dos porta-páletes.

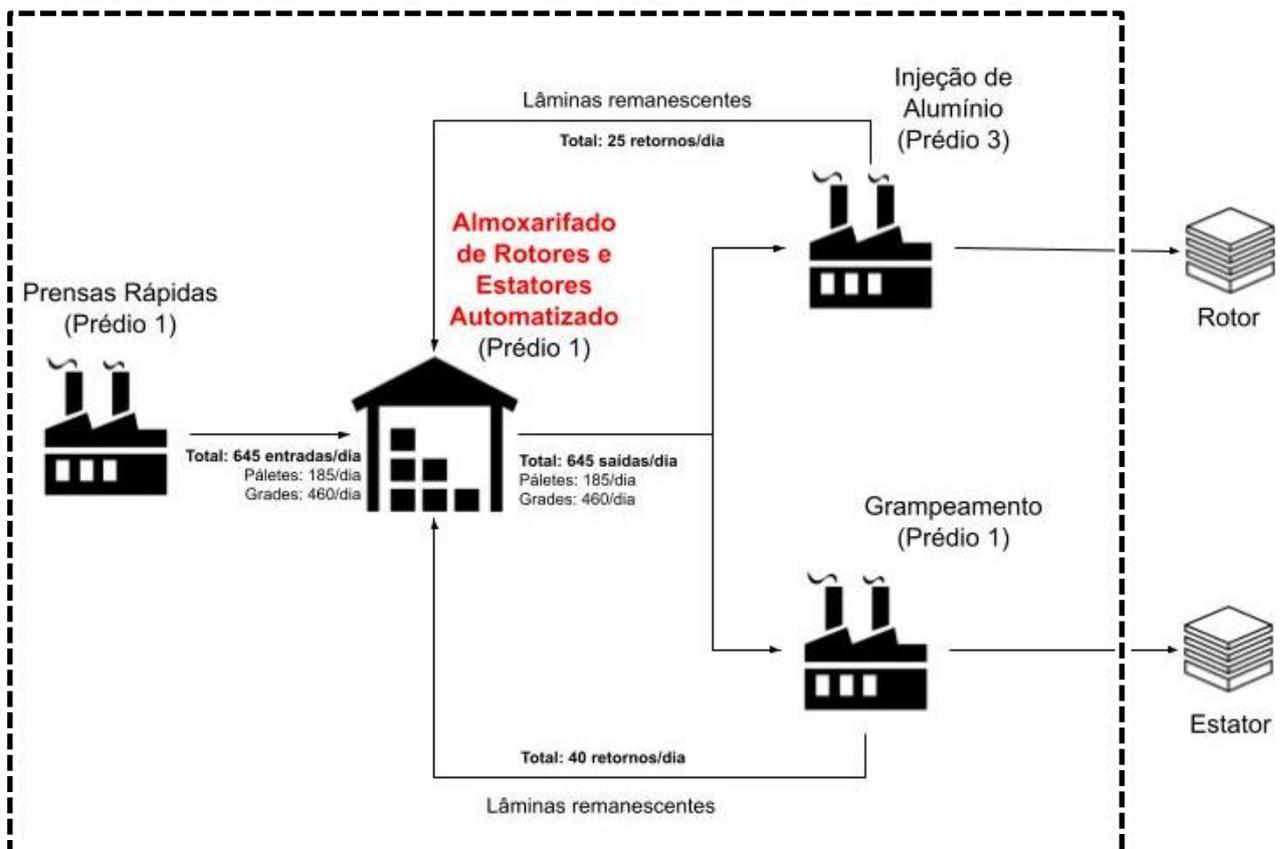
Fonte: Autor (2020).

4.3 CENÁRIO PROPOSTO

Com a instalação do novo almoxarifado, pretende-se juntar os almoxarifados de rotores e estatores em um único local, a saber, o prédio 1, onde localizam-se as prensas-rápidas e também os centros de grampeamento.

Desta forma, a representação das movimentações é apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Movimentações no cenário proposto



Fonte: Autor (2020).

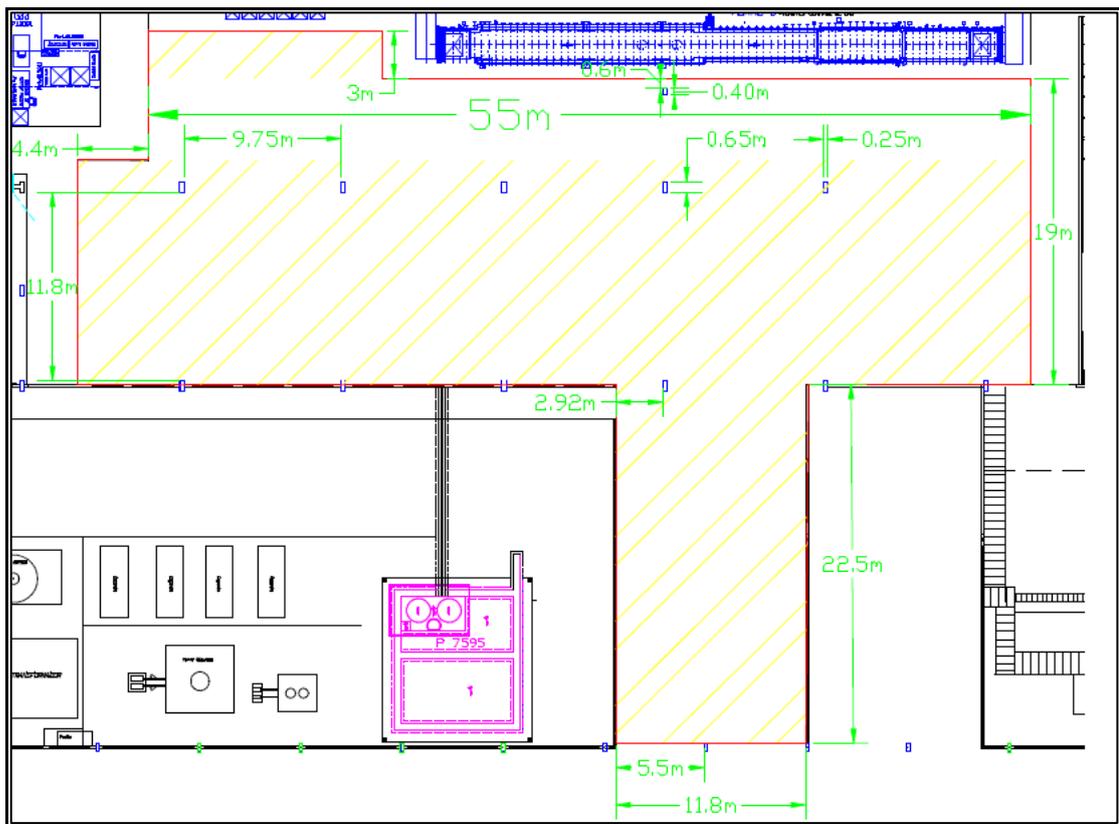
Entre os prédios 1 e 3, atualmente, existe uma área construída, ocupada majoritariamente por equipamentos obsoletos e em desuso. Com o *layout* proposto (vide Figura 17), esta área (chamada na empresa de área nobre, por se situar entre duas fábricas de grande relevância em volume de produção) também seria ocupada, ganhando maior funcionalidade (notar que há uma entrada/saída de material voltada também para a fábrica da injeção de rotores no *layout* proposto, disponibilizado no tópico 4.3.2 a seguir).

Assim, é possível observar que todo o transporte anteriormente realizado em empilhadeira comum, em vias descobertas, poderá ser feito em área construída (coberta).

4.3.1 Área disponível

Com a retirada do almoxarifado da área onde atualmente se situa o almoxarifado de Estatores (Prédio 1), bem como das máquinas que ocupam a área entre este prédio e a Injeção de Rotores (Prédio 3), será então disponibilizada uma área de, aproximadamente, 1400 m², conforme mostra a Figura 16.

Figura 16 - Área disponível para construção do novo almoxarifado



Fonte: Autor (2020).

4.3.2 Layout Proposto

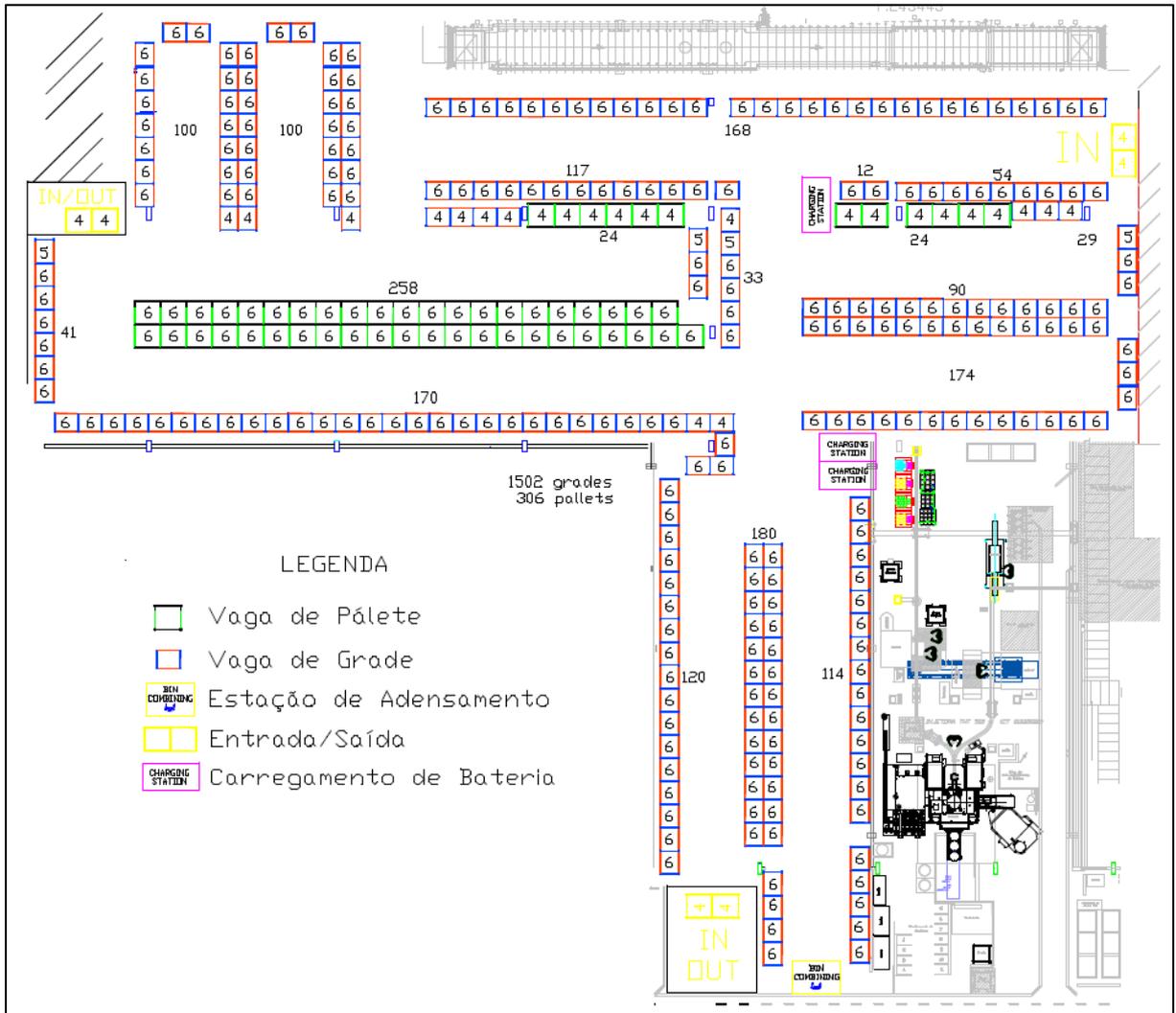
Em análise à estrutura disponível, considerando o número de vagas atual, possíveis otimizações nas movimentações e aumento na demanda, estima-se que o número de vagas a ser mantido deve ser de, no mínimo, 1800 (entre grades de aço e páletes).

O layout proposto deve, ainda, considerar as limitações de altura máxima de operação para os AGVs. Neste caso, estima-se que os mesmos alcançam cerca de cinco metros de altura (aproximadamente seis andares de porta-páletes – “chão mais cinco”). O prédio tem ainda

colunas e vigas, as quais não podem ser transpostas. Ademais, tubulações de gás e água estão suspensas na área proposta.

Respeitando-se todas as limitações expostas anteriormente, a inclinação do telhado, as vigas e colunas, tubulações e máquinas circunvizinhas, propõe-se um *layout* capaz de acomodar toda a demanda de vagas (Figura 17).

Figura 17 - *Layout* proposto



Fonte: Autor (2020).

Esta mesma proposta foi apresentada aos fornecedores da solução final, sugerindo-se que, em caso de estrita necessidade, apenas pequenas alterações fossem realizadas, uma vez que o custo global de projeto não poderia, de igual maneira, estar sujeito a maiores impactos.

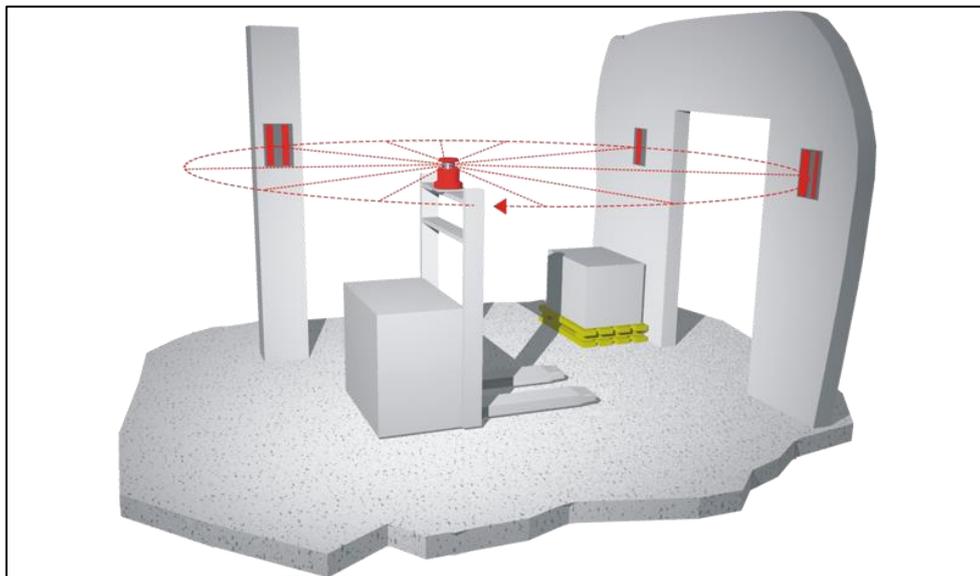
4.4 CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS

Conforme comentado anteriormente, o projeto de automatização de almoxarifado se iniciou com a possibilidade de utilizar outros tipos de equipamentos, além dos AGVs. Embora a equipe de trabalho tenha optado por desenvolver, paralelamente ao projeto aqui abordado, um estudo para implementar transelevadores em parte da área disponível, concluiu-se na etapa de análise econômica, que as reformas civis necessárias implicariam em um dispêndio monetário inviável. Assim, foi dada preferência aos veículos autoguiados.

A fim de atender às necessidades de movimentação em vários níveis de porta-páletes, considerando a massa e dimensões das grades, optou-se por utilizar AGV do tipo empilhadeira.

As possibilidades futuras de aumento em demanda de vagas, de alteração de *layout* e de expansão da operação dos veículos também junto aos centros de trabalho foram levadas em conta. Portanto, uma vez que um dos sistemas de navegação que, atualmente, oferece maior flexibilidade no ambiente de operação desejado, neste sentido, é a referência por *laser* (Figura 18), será dada preferência a esse método de guiamento.

Figura 18 - Esboço do método de guiamento a *laser*



Fonte: DEMUTH (2019).

Deste modo, escopo de equipamentos cotados é limitado. Algumas características dos mesmos podem ser visualizadas nos Anexos III, IV e V deste documento.

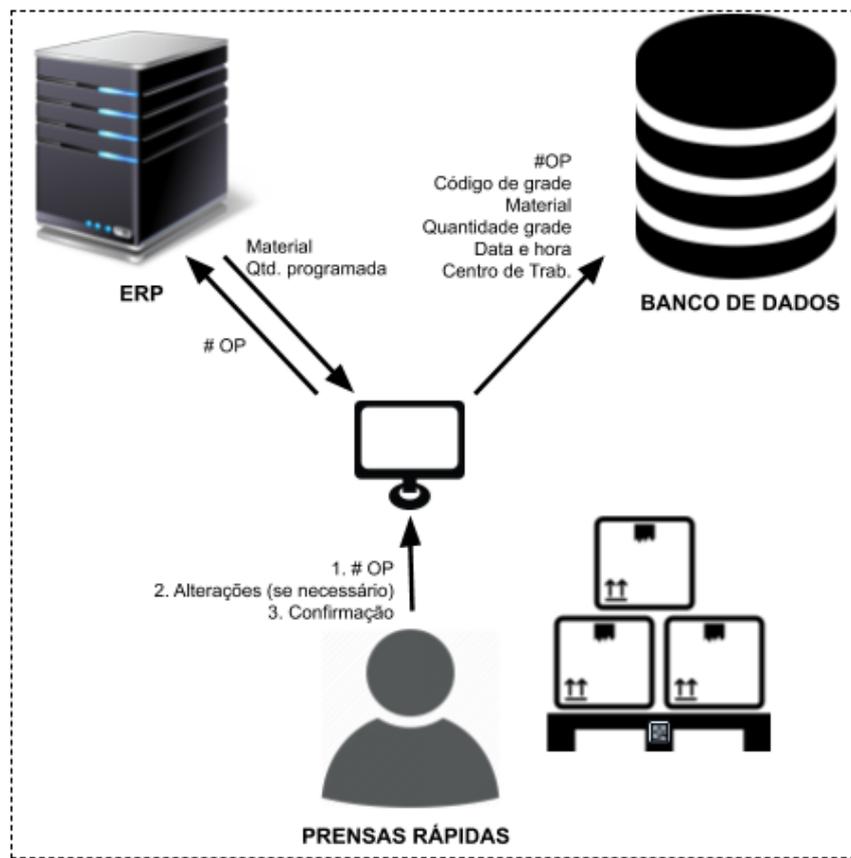
4.5 CONECTIVIDADE

Definidas as características físicas do almoxarifado e dos veículos, pode-se definir também os requisitos básicos funcionais para que o sistema opere integrado com o sistema ERP utilizado pela empresa. Os elementos são apresentados a seguir, de acordo com o fluxo do qual fazem parte.

4.5.1 Prensas rápidas - Almoxarifado

Na movimentação de grades e páletes entre as prensas rápidas e o almoxarifado, as informações tramitarão segundo o esquema da Figura 19.

Figura 19 - Tramitação de dados para grades de produtos acabados



Fonte: Autor (2020).

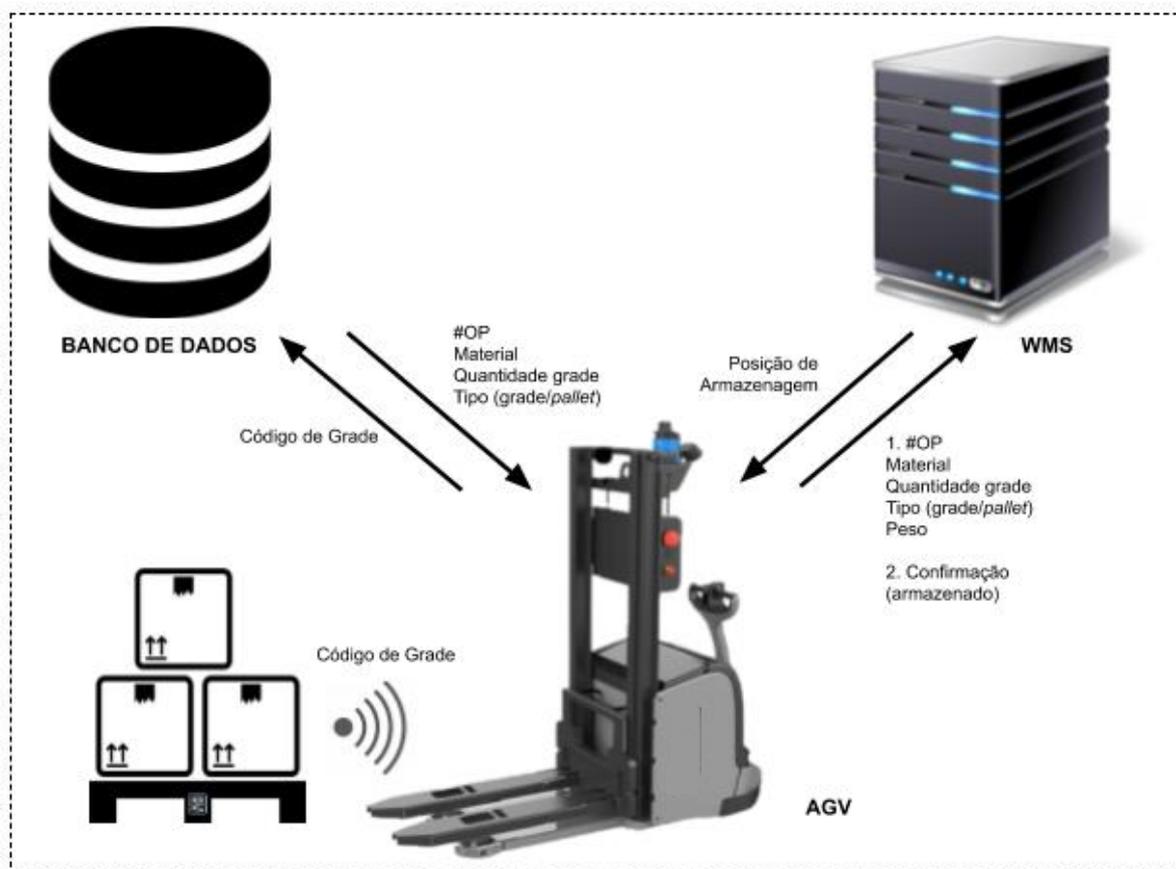
Uma vez finalizado o processo de fabricação das lâminas, o operador informará a um terminal o número da ordem de produção. O servidor retornará as informações de material e quantidade programada para que o operador faça a conferência. Estes dados, somados à data e hora de operação e número de centro de trabalho, serão associados ao código de recipiente e

armazenados em um banco de dados. O transporte até o almoxarifado será realizado por empilhadeira manual.

4.5.2 Recebimento no Almoxarifado

Já no almoxarifado, quando recipientes chegam ao almoxarifado, um sinal será enviado ao AGV (através de sensor de presença) e o mesmo fará a leitura do código da grade, enviará esta informação ao banco de dados e este, por sua vez, retornará as características da carga. Após pesagem, realizada pelo AGV, será solicitada ao WMS a armazenagem do material. O sistema WMS, então, prescreverá o posicionamento da grade e enviará a informação ao AGV. Observa-se que as posições de armazenagem terão que ser previamente cadastradas em sistema. A Figura 20 representa este processo.

Figura 20 - Tramitação de dados dentro do almoxarifado automatizado, para recebimento e armazenagem de produtos acabados

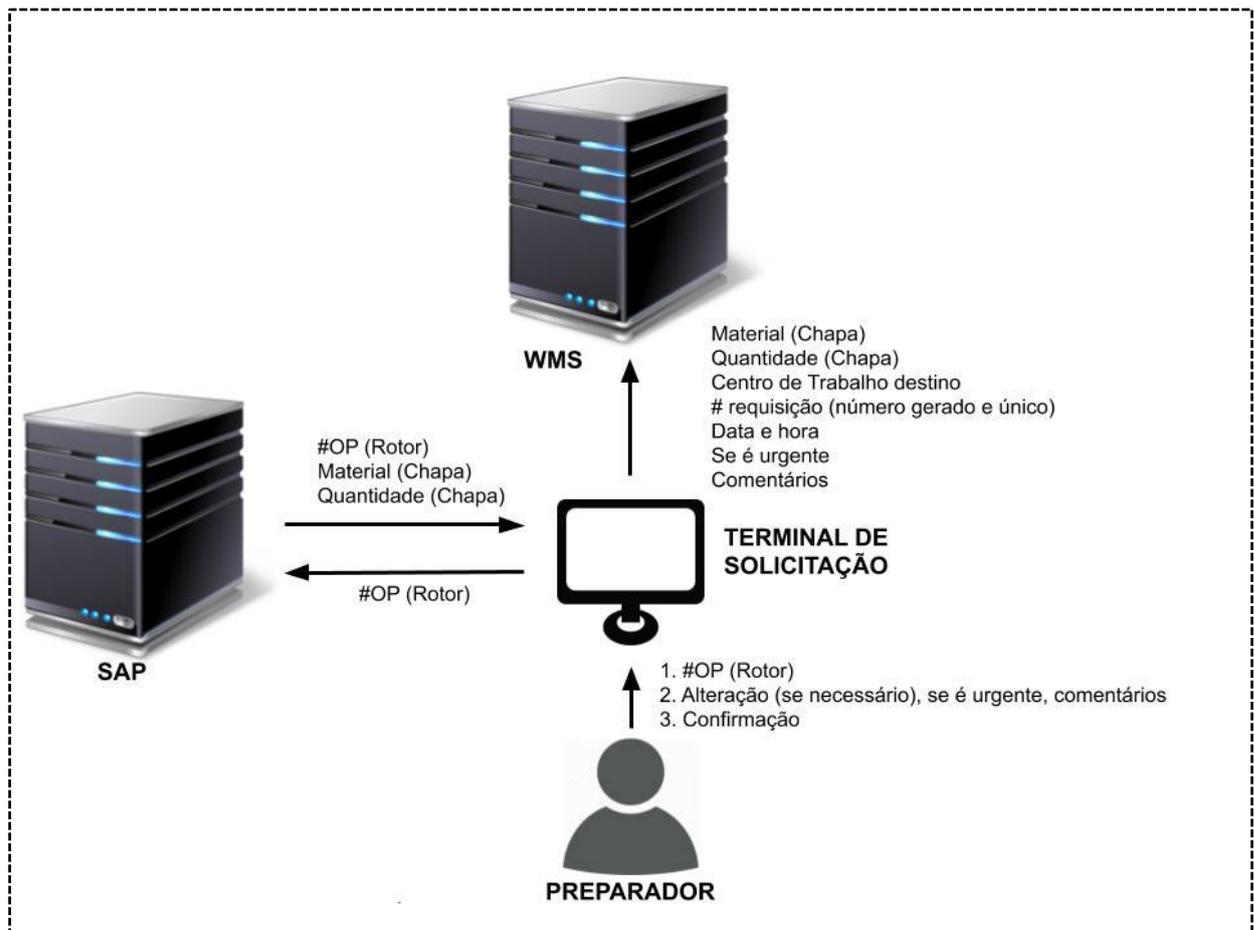


Fonte: Autor (2020).

4.5.3 Almojarifado - Centros de consumo de lâminas

Quanto à movimentação de materiais entre o almojarifado e os centros de trabalho de consumo de lâminas, as informações tramitarão conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Tramitação de dados na solicitação de material nos centros consumidores

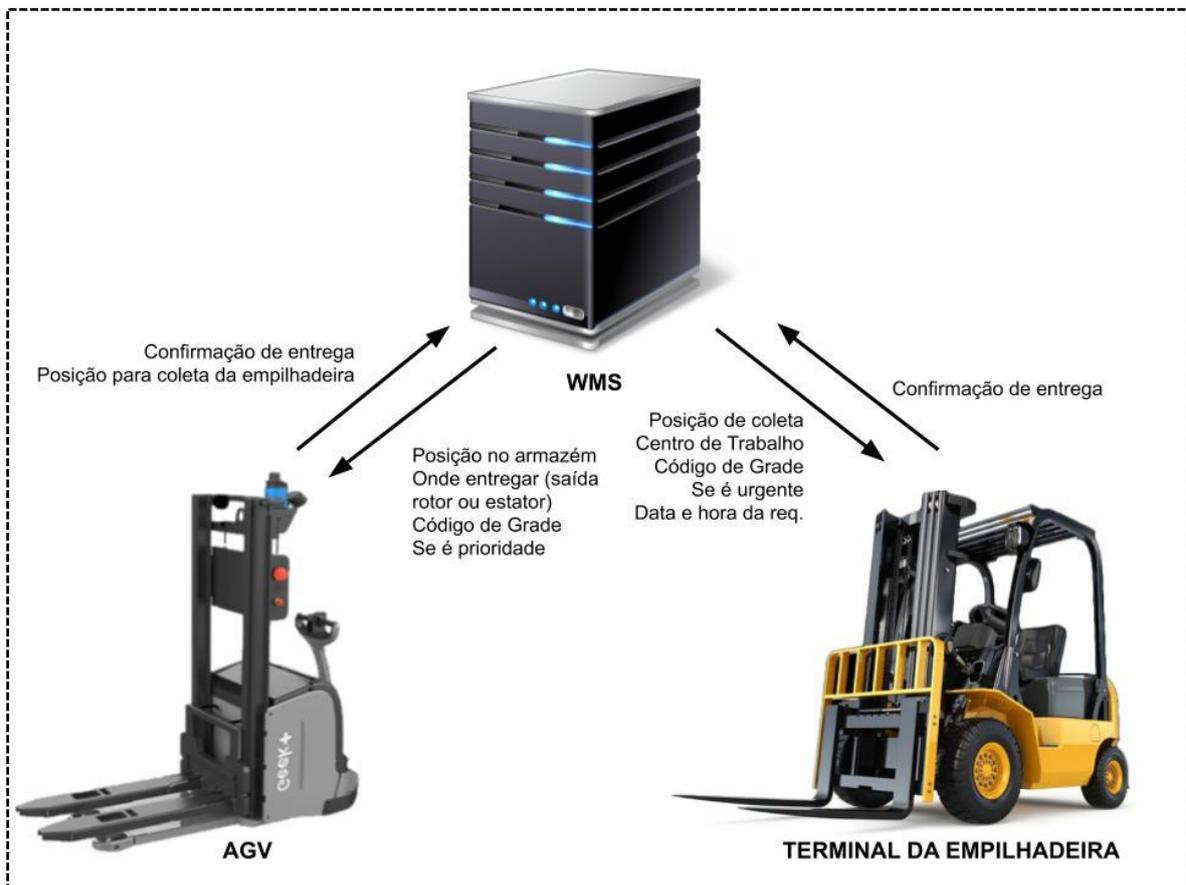


Fonte: Autor (2020).

4.5.4 Coleta no Almojarifado

Quando os centros consumidores de chapas solicitarem materiais, o sistema WMS atribuirá a coleta de recipiente a um dos AGVs. Ocorrerá também que, uma vez realizado o transporte de chapas até a saída do almojarifado pelo AGV, o sistema terá que atribuir coleta de recipiente à empilhadeira que fará o transporte até o respectivo centro de trabalho. Neste caso, as informações terão o fluxo da Figura 22.

Figura 22 - Fluxo de informações na coleta de materiais para centros consumidores



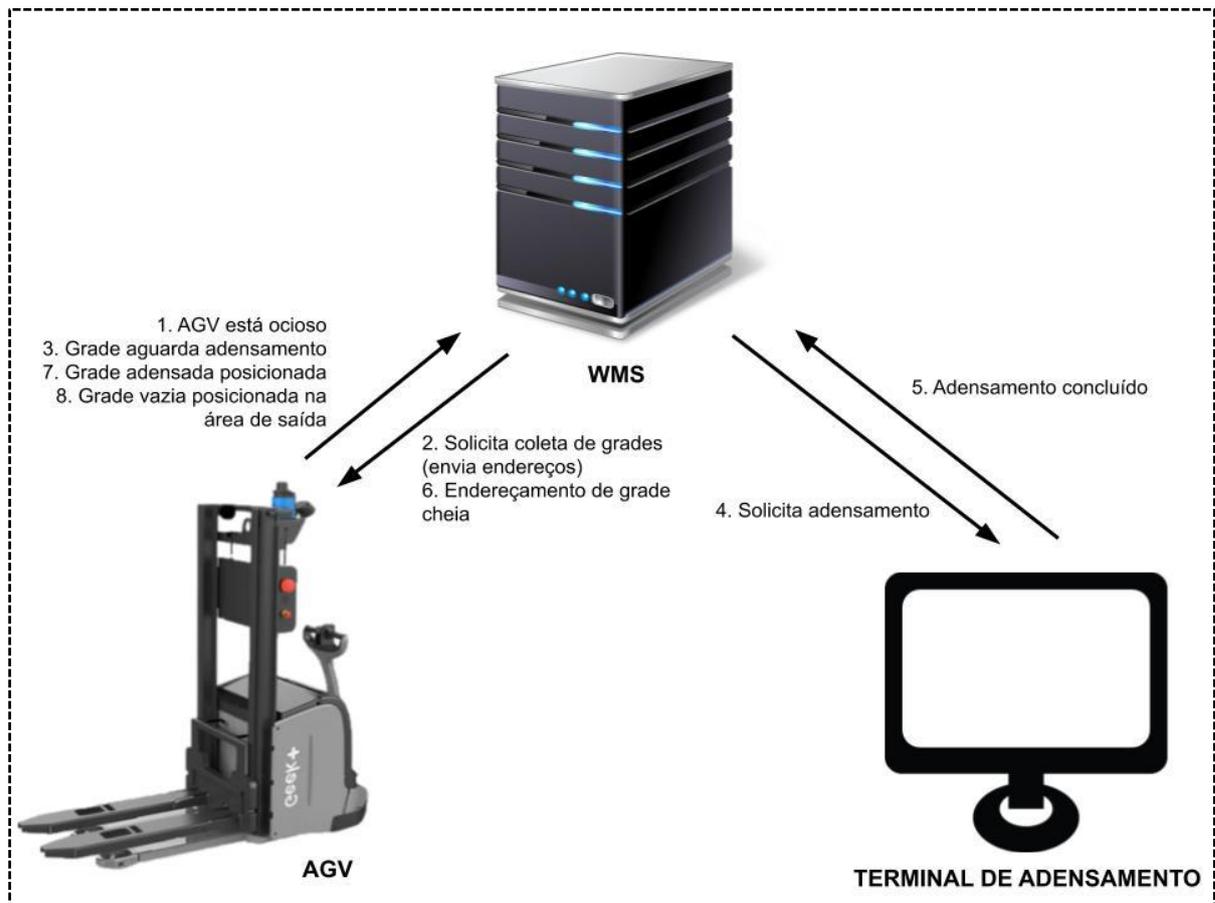
Fonte: Autor (2020).

Ocorrerão ainda situações nas quais, havendo ociosidade de AGV, serão realizadas operações de adensamento. Neste caso, o fluxo de informações será o da Figura 23. As grades vazias serão posicionadas na área de saída de estator (a empilhadeira será responsável por levar as grades vazias até a área de grades vazias; esse processo será o mesmo de entrega de grades nos centros consumidores).

4.5.5 Retorno de lâminas

Nos centros consumidores, nem todas as lâminas disponíveis no recipiente são utilizadas. Nesta situação, será necessário retornar a grade para armazenagem. O operador fará a solicitação de coleta à empilhadeira através de um dispositivo chama garçom, e esta transportará o recipiente até a posição de recebimento do almoxarifado.

Figura 23 - Fluxo de informações de adensamento



Fonte: Autor (2020).

4.6 CENÁRIOS DE ESTUDO

Dada a necessidade de se dimensionar a quantidade de veículos a operar as movimentações do almoxarifado, foi feita a modelagem do sistema e simulação em cenários diferentes, para observação e análises.

Sabendo que a velocidade média de operação das empilhadeiras manuais é superior à velocidade média dos AGVs, e considerando que atualmente há duas empilhadeiras operando em cada almoxarifado, *a priori*, o número de veículos deveria ser maior. Entretanto, se considerarmos que não haverá mais a distância entre almoxarifados, uma vez que haverá um único espaço físico na proposta projetada, os tempos médios de atendimento poderão ser reduzidos. Assim, sugestionou-se a realização de estudos mais detalhados, via modelagem computacional e simulação, utilizando quatro cenários diferentes, com cinco a oito equipamentos, no sentido de garantir que a aquisição de equipamentos para a operação funcional do novo sistema fosse a mais economicamente interessante.

Os parâmetros e critérios adotados estão relatados no tópico a seguir.

4.6.1 Cenários 1 a 4: operação com políticas de alocação e priorização, e diferentes números de AGV

Conforme observado no levantamento bibliográfico, é possível observar, com o uso de simulação, o comportamento do sistema quando sujeito a alterações em suas variáveis. Assim, embora a simulação utilize dados históricos de demanda, para de avaliar o comportamento do sistema operando com diferentes números de veículos – no Cenário 1, com cinco equipamentos; no Cenário 2, com seis equipamentos; no Cenário 3, com sete equipamentos e; no Cenário 4, com oito equipamentos –, durante a codificação do modelo, foram definidas as últimas regras para o funcionamento do sistema de armazenagem automatizado. Foram definidas também aproximações, segundo relatado a seguir, dadas as limitações do *software* e a necessidade de se concluir a programação em tempo hábil.

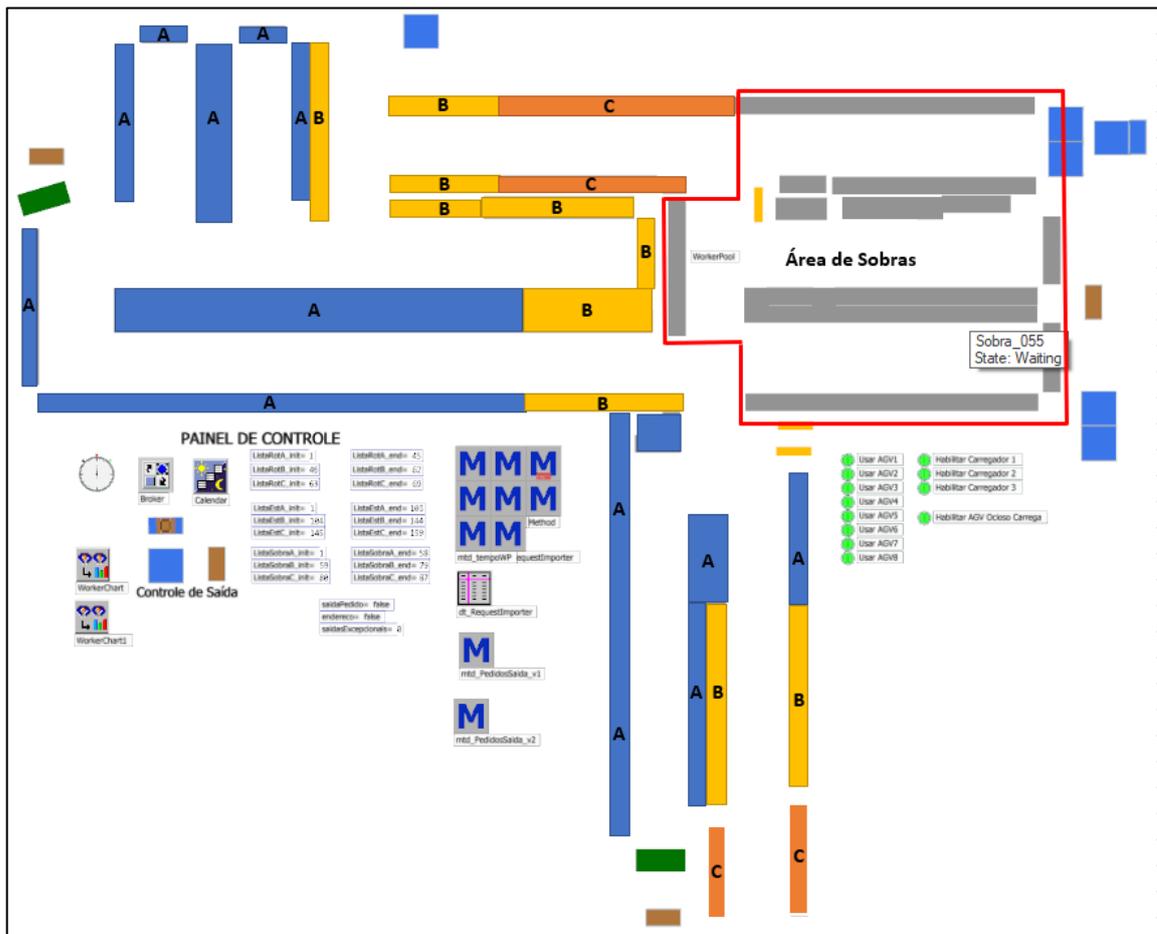
As observações presentes neste tópico abordam as regras que, após experimentação, foram julgadas mais adequadas. O *software* utilizado foi o Tecnomatix Plant Simulation, versão 15.2.3, ano 2020, desenvolvido pela Siemens PLM Software, que permite a representação do sistema em terceira dimensão, conforme mostrado a seguir.

À luz da abordagem apresentada por Carvalho J. (2002), foi adotada a curva ABC para estabelecer áreas de priorização de armazenagem no almoxarifado automatizado. Assim, itens de estator do tipo A (que correspondem a 65% das movimentações no histórico do último ano) serão alocados nas vagas mais próximas à saída para o Prédio 1. Os itens B (25% da demanda), nas vagas imediatamente mais distantes, e os itens C (10% da demanda), por sua vez, mais próximo da entrada. Na eventualidade de haver demanda de entrada de um item A no almoxarifado, se todas as vagas destinadas a este estiverem ocupadas, será utilizada uma vaga de item B e, na ausência desta, uma vaga de item C. Analogamente, os itens de rotores serão classificados em A, B e C e alocados próximo à saída para o prédio onde é feita a injeção de alumínio (Prédio 3). Destina-se ainda uma área de sobras, em espaço comum às rotas de rotores e estatores, para o caso de ocupação total de todas as vagas. O mapeamento das áreas pode ser visualizado na Figura 24.

Uma vez que o registro das movimentações nos dois almoxarifados, no ano de 2019 estava disponível, propôs-se utilizar esta mesma demanda, projetando-a no novo almoxarifado automatizado.

Apesar de os dados estarem disponíveis por data e turno, foi necessário realizar um tratamento os mesmos. Aproximou-se a distribuição das movimentações ao longo do turno (já que os horários não estavam registrados). Assim, foi utilizada uma função de distribuição uniforme para randomizar os movimentos do turno ao longo das horas de trabalho do turno.

Figura 24 - Áreas de armazenagem para itens, de acordo com a classificação ABC



Fonte: Autor (2020).

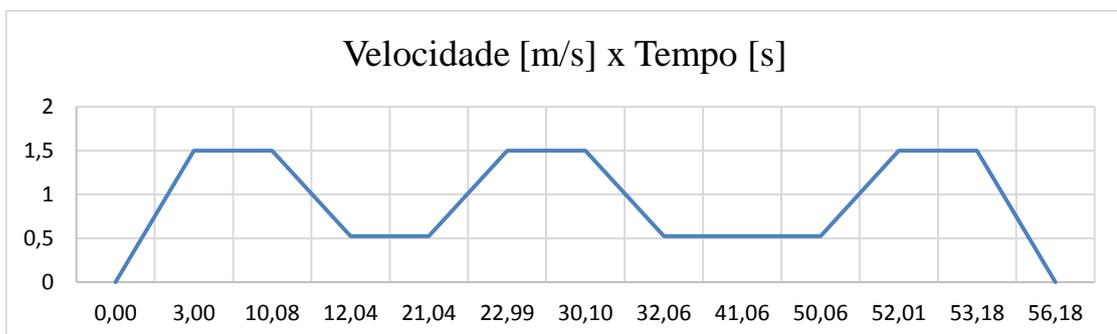
No momento inicial da simulação, os materiais são distribuídos no almoxarifado de acordo com a área correspondente ao seu tipo (A, B ou C). Deste modo, se um material do tipo A, por exemplo, foi movimentado no histórico, então na simulação um material do tipo A será movimentado em um horário dentro do turno correspondente.

A segunda aproximação do modelo leva em consideração a possibilidade de obstrução de rota. Assim, embora a espera pelo veículo até desobstrução não seja modelada, estima-se, em conjunto com a opinião dos fornecedores, uma perda de 15% do tempo total das viagens. Deste modo, todas as viagens da rota têm seu tempo total acrescido nesta proporção.

A terceira aproximação é a (des)carga das baterias dos AGVs. Foram consideradas baterias de Lítio de 450Ah. O consumo dos veículos é proporcional ao tempo decorrido, sendo que operam a 50A quando estes estão realizando tarefa e 1A no modo *standby*. O carregamento é realizado seguindo a seguinte lógica: os veículos partem com carga máxima e aceitam a atribuição de tarefas até atingirem a marca de 12% do valor total, dirigindo-se às estações de carregamento na sequência. No caso de, durante a realização destas últimas tarefas atribuídas, ficarem com carga menor do que 10% do total, os veículos atribuem a tarefa aos demais e dirigem-se imediatamente ao carregamento. Caso todos os carregadores estejam ocupados, o AGV com a maior carga deve sair para atender aos pedidos, desde que esteja acima do limite de 22%. A bateria é, então, carregada até 100% (a menos que haja necessidade de carregamento de outro veículo com carga menor). Quando ocioso, o veículo segue para a estação de carregamento mais próxima (*opportunity charging*).

A velocidade de movimentação dos AGVs também foi aproximada, considerando velocidade máxima de 1,5 m/s e mínima de 0,5 m/s. As distâncias totais de rota, desde o ponto médio de cada área de armazenagem de material (rotores/estatores A, B ou C) até a respectiva entrada/saída do almoxarifado foram medidas, e as velocidades médias (distância percorrida dividida pelo tempo total de deslocamento) foram calculadas para cada movimentação. Um exemplo de curva de variação de velocidade, considerando as curvas de trajeto, pode ser visualizado no Gráfico 2, a seguir. O módulo da (des)aceleração utilizada, considerando movimento uniformemente variado, é de $0,5 \text{ m/s}^2$ (valor também aproximado em contato com os fornecedores).

Gráfico 2 - Variação de velocidade ao longo do tempo, na movimentação dos rotores de tipo A



Fonte: Autor (2020).

Assim, a média de todas as velocidades atingida é de 0,88 m/s. Entretanto, para que se considere a possibilidade de aquisição de um equipamento com menos capacidade, a velocidade média utilizada em simulação foi de 0,75 m/s.

Ainda sobre os tempos de movimentação, aproxima-se um tempo de subida de garfo de 5 segundos por andar e de descida de 4 segundos por andar. O tempo de carregamento (*picking*) é estimado em 20 segundos, e compreende o avanço do garfo, o levantamento da carga e a sua retirada da vaga. O tempo de descarga (*delivery*) é, analogamente, de 20 segundos.

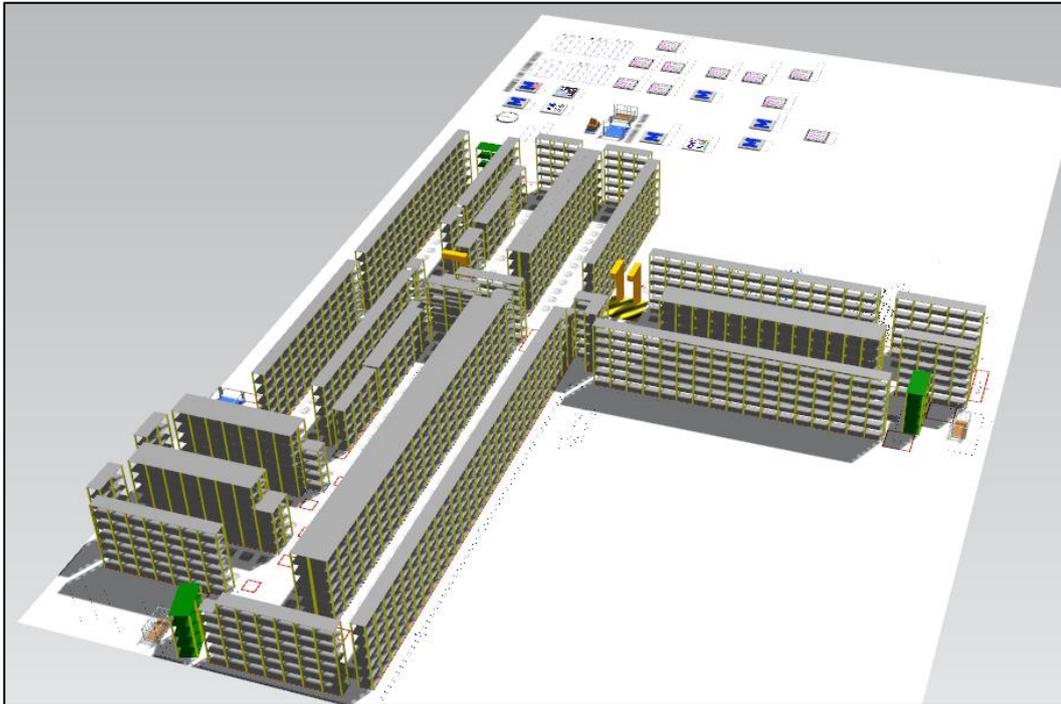
No tangente à atribuição de tarefas aos veículos, na modelagem, a equipe de trabalho determinou que a priorização seja ser feita na seguinte ordem, por simplificação: a tarefa é atribuída, inicialmente, ao “Veículo 1”; caso este veículo esteja ocupado, é utilizado o “Veículo 2”, e assim por diante. No caso de todos os veículos estarem ocupados, a tarefa será atribuída ao veículo com o menor número de solicitações na fila. A fim de garantir o fornecimento de material em tempo hábil para produção, as movimentações de entrada serão realizadas somente após estarem atribuídas todas as movimentações de saída do almoxarifado. A representação da operação de adensamento, por fim, será feita a partir da retirada de duas grades das vagas do almoxarifado; após o tempo de processamento (operação manual) será armazenada uma única grade (a grade vazia é, em geral, retirada pela empilhadeira manual e levada até o centro de trabalho com menor número de grades vazias, fora do almoxarifado).

4.7 RESULTADOS E ANÁLISES

A seguir, são explicitados os resultados atingidos nas simulações. A codificação do modelo foi feita de modo que se possibilitasse a visualização dos porta-páletes em três dimensões. Esta representação, conforme mostrado na Figura 25, permite inclusive que se observem as movimentações nos diferentes níveis (andares) do almoxarifado.

Após a codificação do modelo, foi feita a experimentação do mesmo. As 109.204 movimentações registradas em 2019 foram utilizadas nesta simulação. Os cenários 1 a 4 foram modelados com cinco, seis, sete e oito recursos (veículos), respectivamente, conforme relacionado na Tabela 1.

Figura 25 - Representação do almoxarifado, conforme visualizado no *software*



Fonte: Autor (2020).

Tabela 1 - Quantidade de AGVs em cada cenário de estudo

Quantidade de AGVs no sistema	
Cenário 1	5
Cenário 2	6
Cenário 3	7
Cenário 4	8

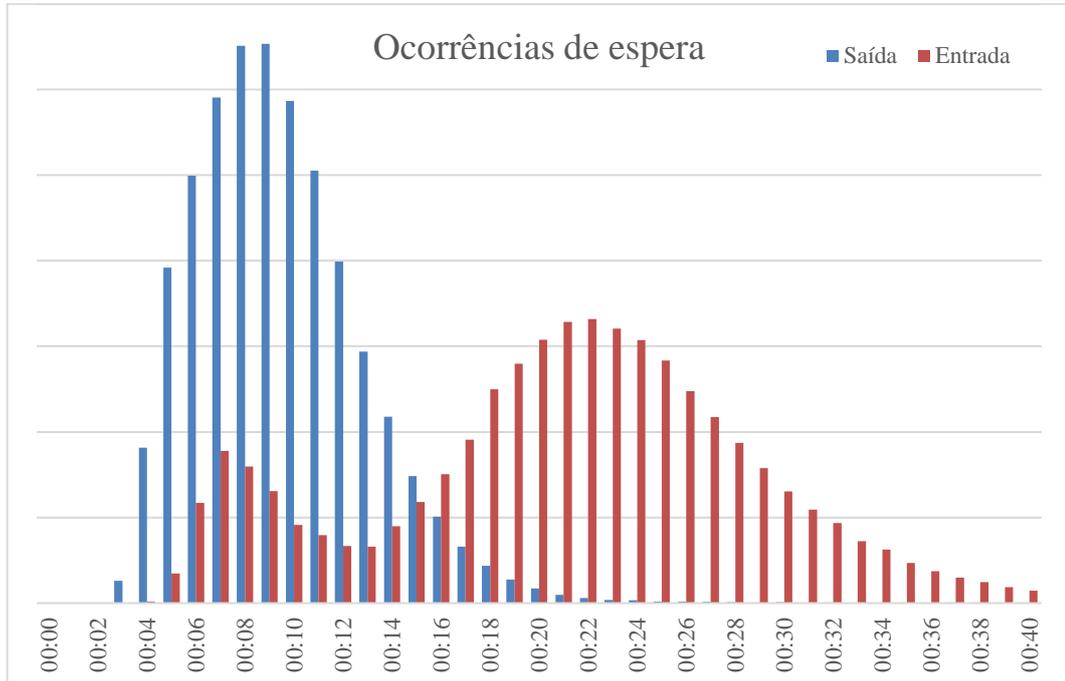
Fonte: Autor (2020).

Representações gráficas e análises dos resultados atingidos foram realizadas, para melhor entendimento de alguns parâmetros funcionais do almoxarifado, e são apresentadas a seguir, nos tópicos 4.7.1 a 4.7.5.

4.7.1 Resultados para o tempo de espera

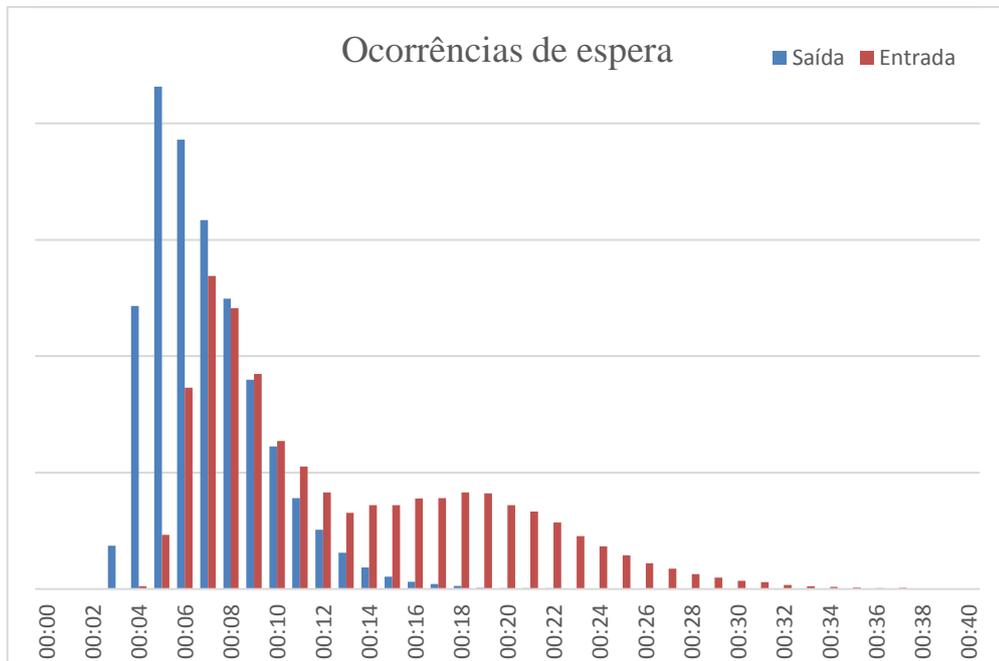
As análises a seguir dizem respeito ao tempo de espera na entrada e na saída de materiais do almoxarifado automatizado. A distribuição de frequências das ocorrências pode ser visualizada nos Gráficos 3 a 6.

Gráfico 3 - Distribuição de frequência de tempos de espera no Cenário 1 (5 AGVs)



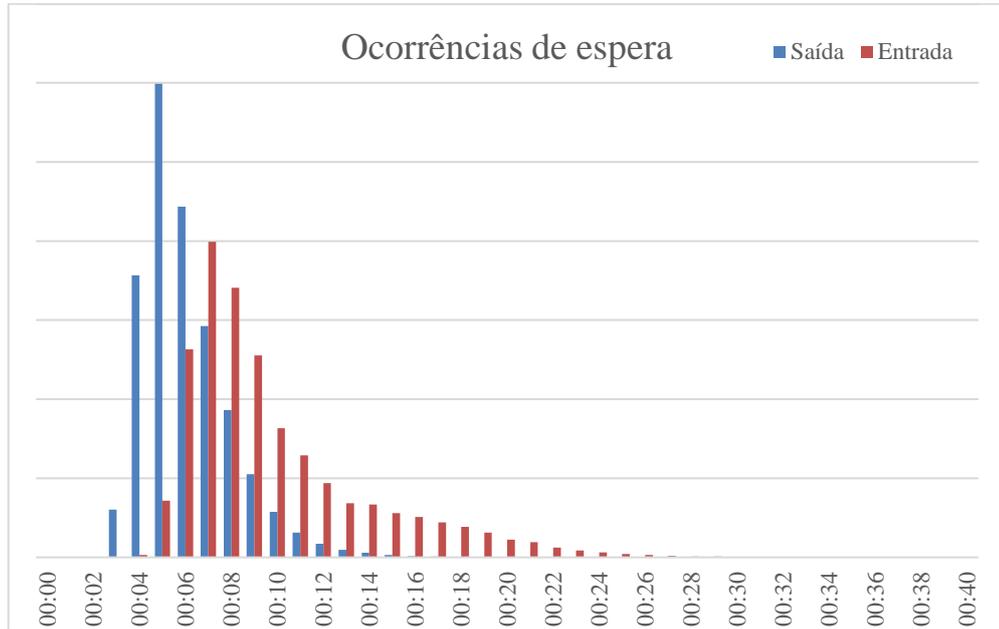
Fonte: Autor (2020).

Gráfico 4 - Distribuição de frequência de tempos de espera no Cenário 2 (6 AGVs)



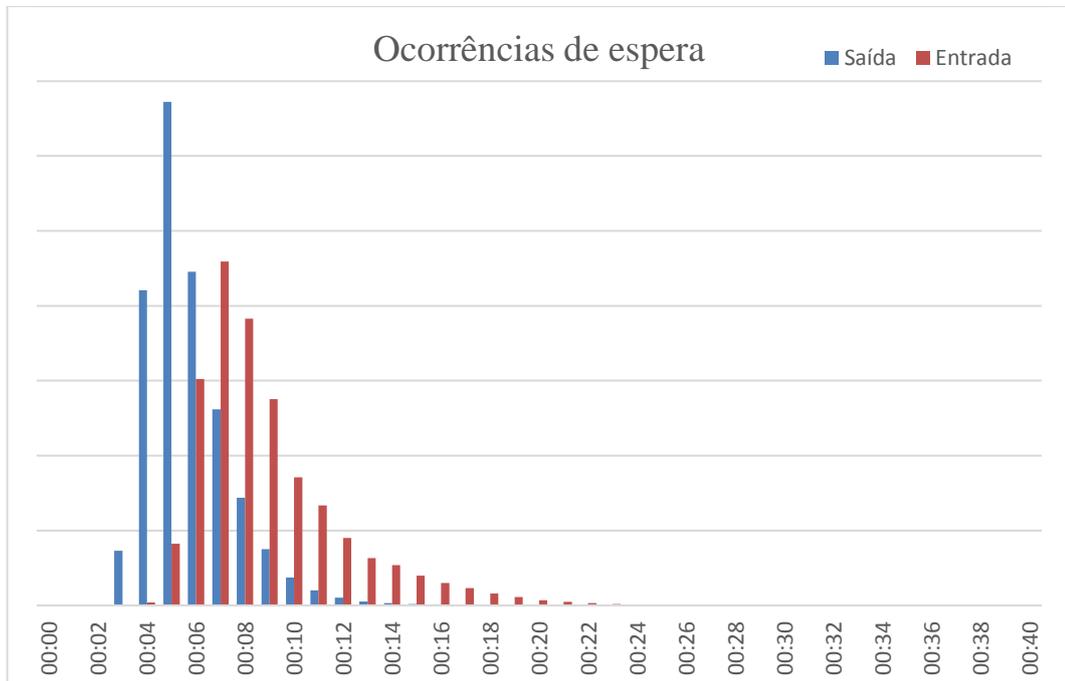
Fonte: Autor (2020).

Gráfico 5 - Distribuição de frequência de tempos de espera no Cenário 3 (7 AGVs)



Fonte: Autor (2020).

Gráfico 6 - Distribuição de frequência de tempos de espera no Cenário 4 (8 AGVs)



Fonte: Autor (2020).

De acordo com os gráficos, o tempo de espera mais frequente para a saída de material do almoxarifado, quando este opera com 5 veículos, está entre 8 e 9 minutos. Para os picos de demanda, o tempo de espera pode chegar a até 40 minutos. Se aumentarmos o número de AGVs

para 6, o intervalo de maior frequência se situa entre os 4 e os 6 minutos. Ao aumentarmos mais um veículo (operação com 7 AGVs), a maior frequência de tempos de espera continua nos mesmos patamares, porém há uma dispersão menor. Este mesmo fenômeno ocorre quando há 8 veículos operando. Em todos os casos, há ocorrências eventuais de espera maior ou igual a 40 minutos.

Já para os tempos de espera na saída, a operação com 5 AGVs resultou em um comportamento particular: há “picos” de frequência, um próximo aos 7 minutos e outro (maior) por volta dos 22 minutos. A justificativa deste tipo de comportamento está na política de priorização estabelecida pela equipe de trabalho; as probabilidades de atendimento em uma média de tempo variam de acordo com a presença ou ausência de filas na saída do almoxarifado, que são prioritárias. Embora o mesmo fenômeno ocorra na operação com 6 AGVs, é possível observar um aumento no primeiro pico (pois há menor formação de filas). Ainda assim, existe um pico de frequência de espera próximo dos 19 minutos, além daquele próximo dos 7 minutos. Para 7 veículos, nota-se que há somente um ponto de máximo na distribuição de frequências, o qual se situa próximo dos 7 minutos.

Por fim, a diferença deste último cenário para aquele de operação com 8 AGVs está na dispersão das frequências: enquanto que há ocorrências de espera maior ou igual a 40 minutos na operação com 7 veículos, a espera máxima para 8 veículos está próxima dos 21 minutos.

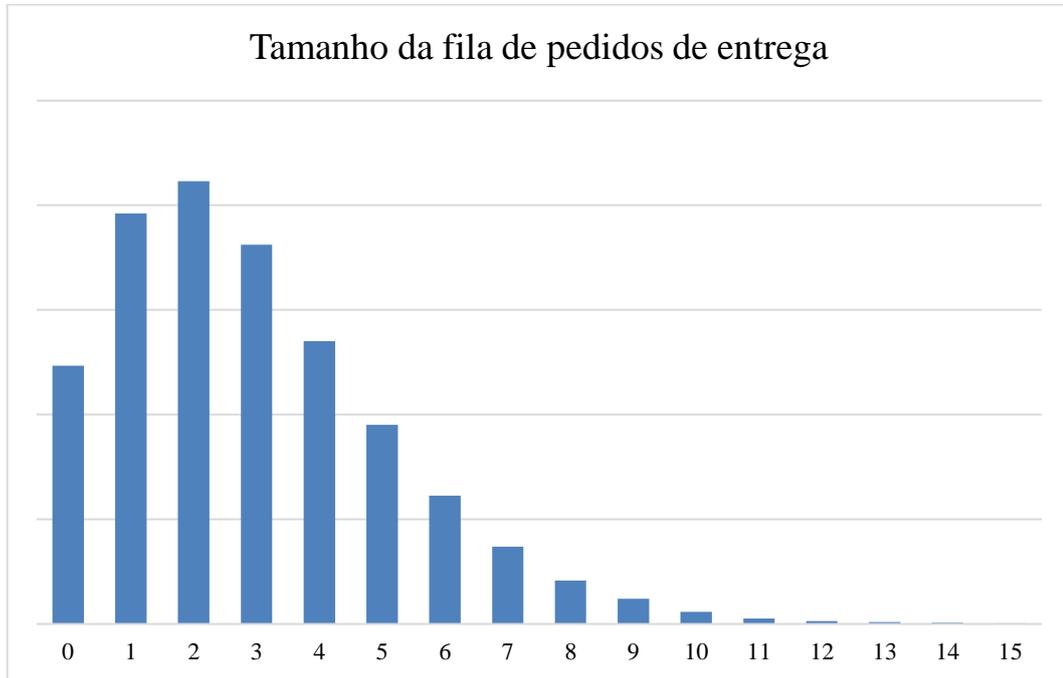
4.7.2 Resultados para o tamanho da fila de pedidos de entrega

Os Gráficos 7 a 10 mostram o tamanho da fila de pedidos de entrega, isto é, de saída do almoxarifado.

Os gráficos mostram que o número mais frequente de pedidos em fila, na saída do almoxarifado, varia de acordo com a quantidade de veículos em operação. Na primeira situação, com 5 veículos, a maior frequência de tamanho de fila é de dois recipientes, sendo observadas algumas ocorrências de 15 ou mais pedidos em fila.

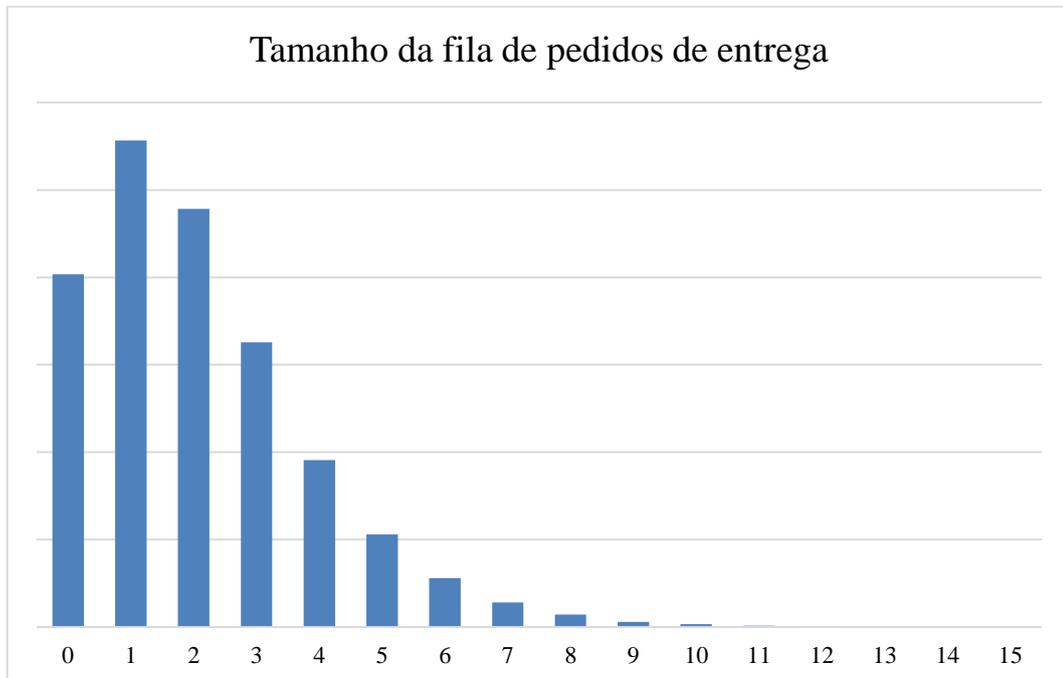
Já para 6 AGVs, a maior frequência de pedidos em fila é de uma unidade. Embora observem-se ocorrências de 15 ou mais pedidos em fila, a dispersão neste caso é menor. As mesmas constatações podem ser feitas para a operação com 7 e 8 veículos, sendo que a dispersão é progressivamente menor, de acordo com o aumento no número de AGVs operando.

Gráfico 7 - Distribuição de frequência de tamanhos de fila na saída para o Cenário 1 (5 AGVs)



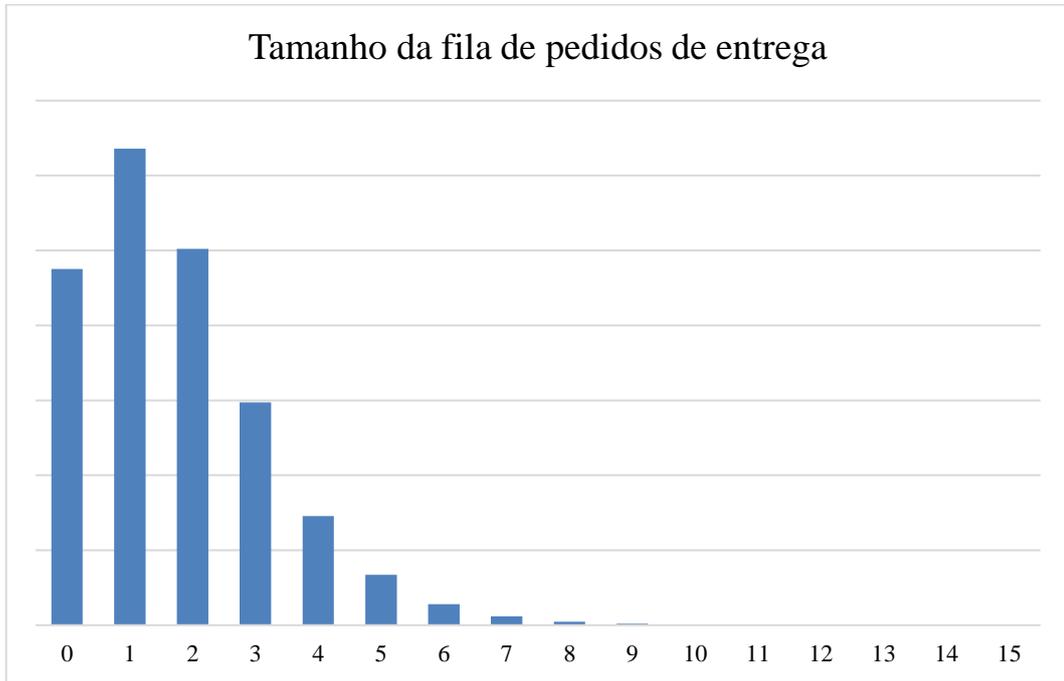
Fonte: Autor (2020).

Gráfico 8 - Distribuição de frequência de tamanhos de fila na saída para o Cenário 2 (6 AGVs)



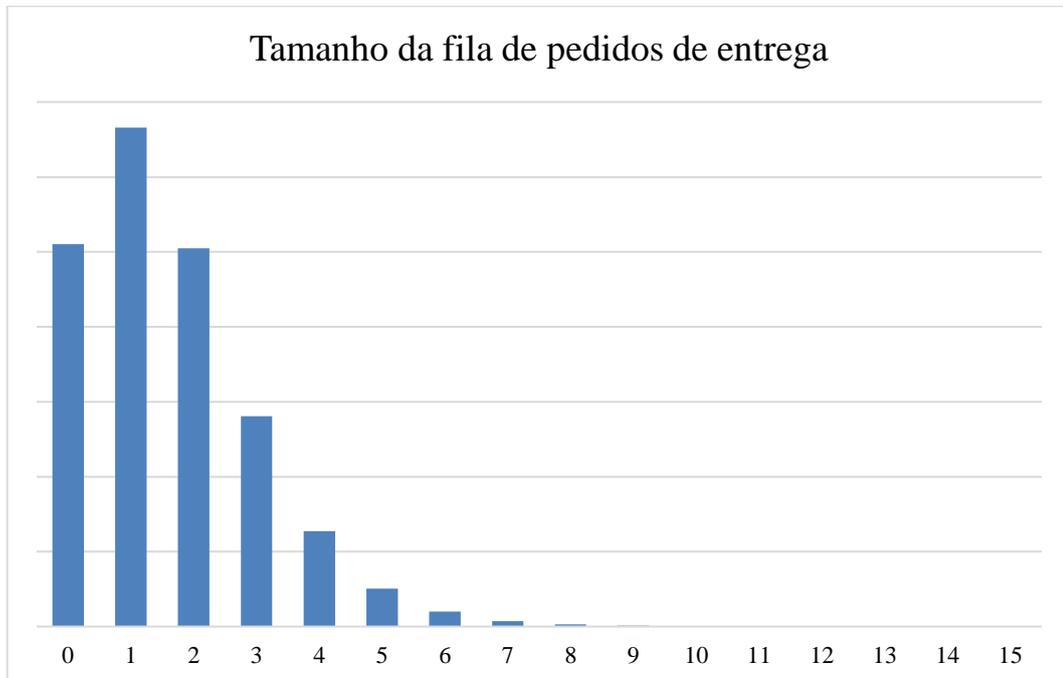
Fonte: Autor (2020).

Gráfico 9 - Distribuição de frequência de tamanhos de fila na saída para o Cenário 3 (7 AGVs)



Fonte: Autor (2020).

Gráfico 10 - Distribuição de frequência de tamanhos de fila na saída para o Cenário 4 (8 AGVs)



Fonte: Autor (2020).

4.7.3 Resultados para a quantidade de grades aguardando entrada

A entrada do almoxarifado, por ter menor prioridade de atendimento pelos veículos, está mais sujeita à formação de filas. Os Gráficos 11 a 14, a seguir, mostram a distribuição de frequência de tamanho de fila nesta área.

Na operação com 5 AGVs, embora a maior frequência corresponda a uma fila de zero recipientes, há algumas ocorrências de 100 ou mais recipientes em espera. Fisicamente, isso representa que neste cenário haverá necessidade da presença de *buffers* na entrada do almoxarifado. Nos demais cenários, o número de ocorrências de filas não nulas se distribui de maneira decrescente, e diminui, conforme aumenta a quantidade de veículos operando.

Gráfico 11 - Distribuição de frequência do tamanho de fila na entrada; Cenário 1 (5 AGVs)



Fonte: Autor (2020).

Gráfico 12 - Distribuição de frequência do tamanho de fila na entrada; Cenário 2 (6 AGVs)



Fonte: Autor (2020).

Gráfico 13 - Distribuição de frequência do tamanho de fila na entrada; Cenário 3 (7 AGVs)



Fonte: Autor (2020).

Gráfico 14 - Distribuição de frequência do tamanho de fila na entrada; Cenário 4 (8 AGVs)



Fonte: Autor (2020).

4.7.4 Resultados para a carga geral das baterias

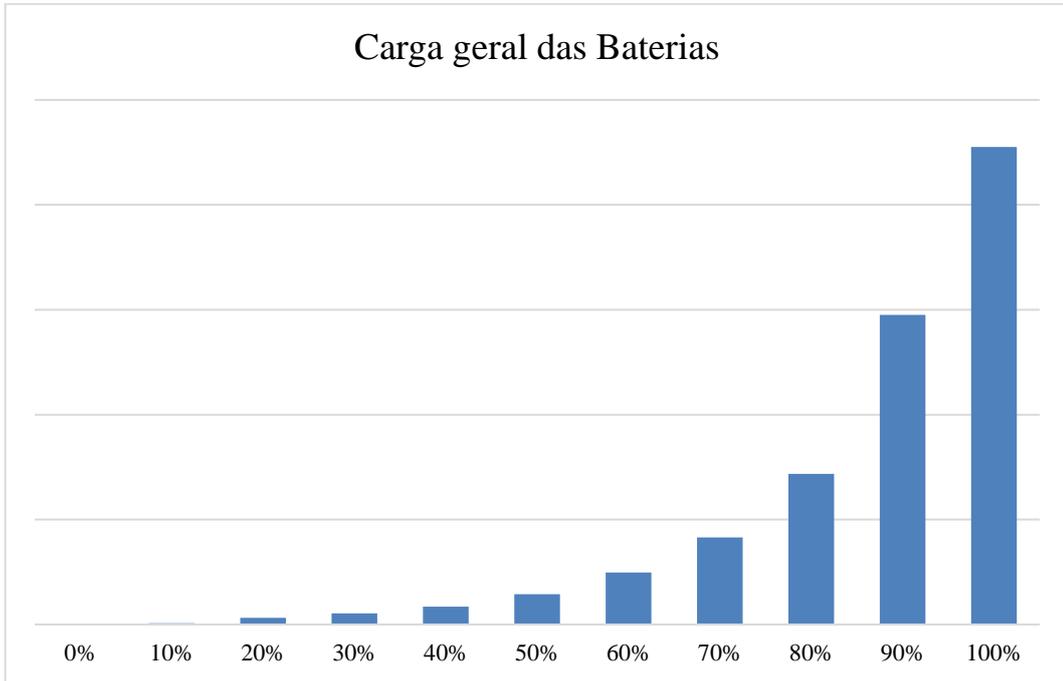
Quanto ao carregamento das baterias, observa-se que com um maior número de veículos operando no almoxarifado, haverá maior concorrência pelo mesmo recurso de recarga (neste caso, as estações de carregamento). Assim, a modelagem desta variável se justifica não só na validação do modelo, mas também no estudo de eventual necessidade de instalação de mais recursos no sistema.

Os Gráficos 15 a 18 mostram a distribuição de frequência de diferentes intervalos de nível de carga.

É possível observar que, no caso de haver 5 AGVs operando no almoxarifado, em alguns momentos haverá eventos de nível de reserva, próximo de 10% do total. O mesmo não ocorre para operação nos demais cenários, com 6 ou mais veículos (os valores chegam ao nível de 20% para 6 e 7 veículos e de 30% para 8 veículos).

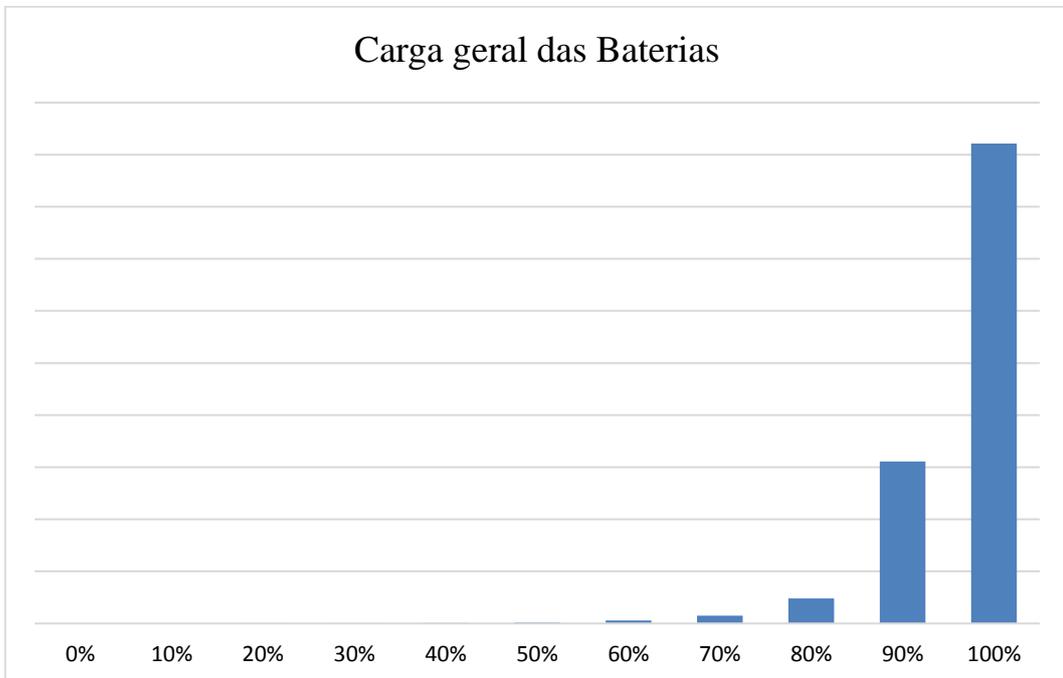
Também dos gráficos é possível observar que a dispersão de frequências diminui conforme aumenta o número de veículos, de modo que a carga das baterias permanece próxima de 100%.

Gráfico 15 - Distribuição de frequência dos níveis de carga de bateria; Cenário 1 (5 AGVs)



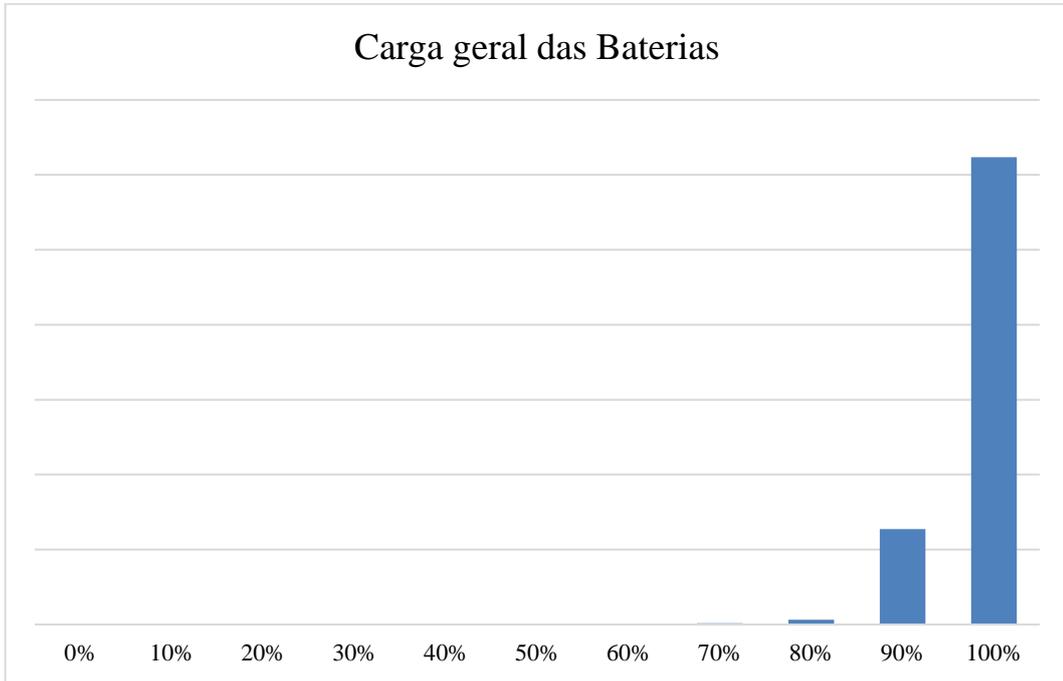
Fonte: Autor (2020).

Gráfico 16 - Distribuição de frequência dos níveis de carga de bateria; Cenário 2 (6 AGVs)



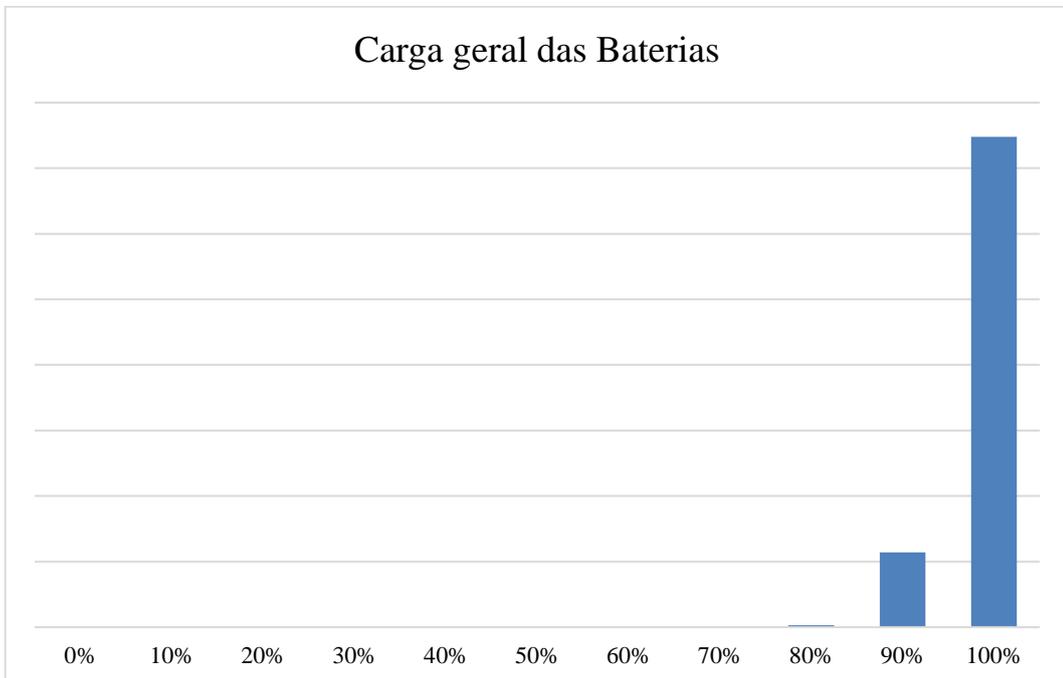
Fonte: Autor (2020).

Gráfico 17 - Distribuição de frequência dos níveis de carga de bateria; Cenário 3 (7 AGVs)



Fonte: Autor (2020).

Gráfico 18 - Distribuição de frequência dos níveis de carga de bateria; Cenário 4 (8 AGVs)



Fonte: Autor (2020).

4.7.5 Análises gerais

Sendo o principal motivador desta modelagem o estudo da possibilidade de operação em um número reduzido de veículos, as políticas adotadas nas etapas de experimentação buscaram garantir a factibilidade do sistema em cada cenário. Isto é, ainda que outras políticas de priorização de movimentações ou de alocação de materiais possam vir a otimizar o número de AGVs, e/ou os tempos de fila, aquelas aplicadas aqui garantem, segundo critérios estabelecidos pela equipe de trabalho, que o sistema atenderá a demanda em alguns cenários.

Ao observarmos o desempenho geral do sistema operando no Cenário 1 (com cinco AGVs), é possível notar que:

- a. há ocorrência de recipientes em fila na entrada do almoxarifado com tempo de espera igual ou superior a 40 minutos, gerando possíveis atrasos no atendimento à produção (atualmente, o tempo máximo de espera para entrada de materiais no almoxarifado é de aproximadamente 30 minutos);
- b. a maior frequência de número de recipientes na fila de saída do almoxarifado, neste caso, é de 2 unidades, o que acaba por dificultar o atendimento na entrada, diminuindo o nível de atendimento do sistema, em geral;
- c. a carga das baterias, em algumas oportunidades, chega ao nível crítico.

Já a operação no Cenário 2, com seis veículos, não apresenta o mesmo comportamento, uma vez que:

- a. o tempo máximo e médio na fila de entrada são menores;
- b. a maior frequência de número de recipientes em fila de entrega é de uma unidade, e a frequência de fila nula é maior – o que possibilita que ocorra o comentado no item (a);
- c. as baterias não chegam ao nível crítico, e há menor dispersão em relação ao nível máximo de carga.

Deste modo, embora o desempenho dos Cenários 3 e 4 (com sete ou oito veículos) tenha um nível de atendimento mais alto (em relação ao Cenário 2, com seis veículos), conhecendo as limitações do sistema e as aproximações do modelo, é possível afirmar que a operação com seis AGVs é factível. Portanto, devido a razões econômicas, optou-se por declinar, em primeiro momento, a operação com os Cenários 3 e 4.

Os investimentos em novo(s) veículo(s) poderiam se justificar em implementações futuras, em expansão de atendimento aos centros de trabalho, eliminando a necessidade da operação das empilhadeiras manuais.

Além disso, algumas observações podem ser feitas a partir das lições aprendidas com este trabalho:

- primeiramente, sobre o *layout* proposto, observou-se que os veículos demoram mais para sair de corredores sem saída (*dead-end*). Esse problema pode ser solucionado se, ao confeccionar o *layout* do almoxarifado, for projetada uma curva para que o AGV tenha acesso a outros corredores sem ter que fazer um retorno de 180° no mesmo corredor (a menos que este seja suficientemente largo para executar a manobra em velocidade superior à mínima);
- o problema de congestionamento de veículos no almoxarifado pode ser mitigado se as vagas de materiais de maior importância (em número de movimentações) não estiverem próximas entre si. Uma codificação mais detalhada, no sentido de efetuar a parada de veículos quando da obstrução de rotas, e que inclua a tomada de rota alternativa (como faria um AMR, por exemplo), seria capaz de validar com mais rigor o desempenho dos equipamentos no *layout* construído;
- estima-se que outros problemas indesejados que ocorrem atualmente, como a obsolescência de materiais, também sejam mitigados com a instalação do novo almoxarifado, cabendo um estudo detalhado deste fenômeno.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho foi parte integrante de um projeto real, cuja proposta é juntar dois almoxarifados (um de lâminas de rotores e outro de lâminas de estatores), em uma fábrica multinacional de motores elétricos. O almoxarifado proposto operará de forma automatizada, com veículos autoguiados.

O trabalho apresentou uma caracterização de automação de almoxarifados e de transportadores do tipo AGV. Apresentou-se também um levantamento bibliográfico sobre a modelagem de sistemas e simulação, com aplicações em dimensionamento de almoxarifados. A partir de métodos da literatura, foi possível estabelecer etapas para o desenvolvimento do trabalho.

Na aplicação do método proposto, as principais características funcionais do almoxarifado e dos seus equipamentos foram descritas, possibilitando o entendimento de suas necessidades de operação.

Projitou-se o *layout* do novo almoxarifado automatizado, indicou-se o tipo de transportador mais adequado e elencaram-se os principais elementos de conectividade para a operação com os AGVs.

Diante da necessidade de tomada de decisão sobre o dimensionamento da frota de AGVs, simularam-se cenários diferentes, considerando uma classificação de materiais e diferentes números de veículos. Dado o histórico de movimentações do último ano, os materiais foram classificados e áreas específicas de armazenagem para cada classe foram criadas no modelo do novo almoxarifado.

Após experimentação do modelo, considerando as restrições e simplificações da modelagem, as análises feitas permitiram sugerir um número funcional e economicamente viável para operar as movimentações do almoxarifado automatizado: seis AGVs. O desenvolvimento deste estudo embasou a proposta final a ser apresentada à diretoria da empresa, a qual optou por aprová-la. O seu objetivo, segundo avaliado pela equipe de trabalho, foi integralmente cumprido.

Além de fornecer suporte à tomada de decisão na automatização do almoxarifado de lâminas de rotores e estatores, o registro do desenvolvimento desta pesquisa, da metodologia aplicada, do levantamento dos dados e dos resultados atingidos, poderá embasar outros estudos para aplicações auxiliares e/ou similares, especialmente no tocante ao dimensionamento de almoxarifados automatizados.

Por fim, conclui-se deste trabalho que a automação de almoxarifados, no contexto da Indústria 4.0, e devido à importância atual do comércio eletrônico, vem tomando cada vez mais notoriedade no cenário mundial. Projetam-se grandes investimentos nestas tecnologias para os próximos anos e, por serem ferramentas competitivas, requer-se que algumas destas soluções, embora ainda em processo de maturação tecnológica, estejam cada vez mais dominadas pelas empresas interessadas em garantir o seu sucesso.

Sugere-se, para trabalhos futuros, o acompanhamento da implementação do projeto, e o estudo do desempenho do sistema no caso de operar, eventualmente, com diferentes tipos de transportadores. Outras possibilidades são o estudo do atendimento não restrito ao almoxarifado (em cenários onde os AGVs possam ir até os centros de trabalho) e, além disso, o estudo da performance do sistema com aumentos relevantes de demanda.

REFERÊNCIAS

ALLEN, W. 26 warehouse pros reveal the most important factors to consider when moving to an automated warehouse. **6 River Systems**. 2020. Disponível em: <https://6river.com/considerations-for-moving-to-an-automated-warehouse/>. Acesso em: 01 nov. 2020.

ALNAHHAL, M; AHRENS, D. A Simulation-Based System for Calculating Optimal Numbers of Forklift Drivers in Industrial Plants. **Bavarian Journal of Applied Sciences**. 2018.

AUGUSTSSON, P. Live Webinar – Integrate with AGV. **FlexQube**. 2016. Disponível em: <https://www.slideshare.net/AndersFogelberg1/integrate-with-agvs-webinar-presentation-by-flexqube>. Acesso em: 01 nov. 2020.

BAKER, P.; HALIM, Z. An exploration of warehouse automation implementations: cost, service and flexibility issues. **Supply Chain Management: An International Journal**. 2007, v. 12(2), pp. 129-138.

BECHTSIS, D.; TSOLAKIS, N.; VOUZAS, M.; VLACHOS, D. Industry 4.0: Sustainable material handling processes in industrial environments. **Computer Aided Chemical Engineering**. 2017, v. 40, pp. 2281-2286.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Modelling and Simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**. 2002, v.22, n.2, p.241-264.

BORGEMO, E.; JABRANE, Z. **Evaluating Usage of Automated Guided Vehicles with Respect to Warehouse Layout Changes**. 2018. Disponível em: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8951495&fileId=8951502>. Acesso em: 10 nov. 2020.

BUČKOVÁ, M.; KRAJČOVIČ, M.; JERMAN, B. Impact of digital factory tools on designing of warehouses. **Journal of Applied Engineering Sciences**. 2017, n. 15(2), pp. 173–180.

CARVALHO, J. M. C. de. **Logística**. 3ª ed, pp. 226-227. Lisboa: Edições Silabo, 2002.

CARVALHO, L.S. **Modelagem e simulação: poderosa ferramenta para a otimização de operações logísticas**. 2007. Disponível em: https://sitedalogistica.webnode.com.br/_files

/200000034-6be256cdce/Modelagem%20e%20Simula%C3%A7%C3%A3o%20-%20Poderosa%20Ferramenta%20para%20a%20Otimiza%C3%A7%C3%A3o%20de%20Opera%C3%A7%C3%B5es%20Log%C3%ADsticas%20-%20Rev.%20Final.pdf Acesso em: 09 nov. 2020.

CAUDELL, D. Warehousing 101: An Introduction to Digital Warehouse Automation. **RFgen**. Novembro de 2018. Disponível em: <https://www.rfgen.com/blog/warehousing-101-an-introduction-to-warehouse-automation/>. Acesso em: 01 nov. 2020.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: Teoria e Aplicações**. 4ª edição. Editora Campus - Elsevier. São Paulo: 2014.

CUSTODIO, L.; MACHADO, R. Flexible automated warehouse: a literature review and an innovative framework. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 2020, n. 106, pp. 533-558.

DEKHNE A.; HASTINGS, G.; MURNANE, J.; NEUHAUS, F. Automation in logistics: Big opportunity, bigger uncertainty. **Travel, Transport & Logistics Practice**. McKinsey & Company. Abril de 2019. Disponível em: <https://www.sipotra.it/wp-content/uploads/2019/04/Automation-in-logistics-Big-opportunity-bigger-uncertainty.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2020.

DEMUTH, R. Laser Scanner for Navigation. **Götting**. 2019. Disponível em: <https://www.goetting-agv.com/components/43600>. Acesso em: 01 nov. 2020.

FEDORKO, G.; HONUS, S. & SALAI, R. Comparison of the Traditional and Autonomous AGV Systems. **MATEC Web of Conferences**. 2017, n. 134, pp. 13. Disponível em: 10.1051/mateconf/201713400013. Acesso em: 26 set. 2020.

GAGLIARDI, J. P.; RENAUD, J.; RUIZ. A. A simulation model to improve warehouse operations. **Winter Simulation Conference**. 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/221525087_A_simulation_model_to_improve_warehouse_operations#fullTextFileContent. Acesso em: 10 nov. 2020.

Goods to person robotics (agv/amr): warehouse automation \$27b by 2025. **Forwarder Magazine**. Outubro de 2019. Disponível em: <https://forwardermagazine.com/goods-to-person-robotics-agv-amr-future-of-warehouse-automation-market-worth-27b-by-2025/>. Acesso em: 01 nov. 2020.

GU, J. **The forward reserve warehouse sizing and dimensioning problem**. Dissertação (Degree of Doctor of Philosophy) – Georgia Institute of Technology. 2005. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-forward-reserve-warehouse-sizing-and-problem-Gu/4b543406051b3973462af37904db11758d96ae13>. Acesso em: 13 nov. 2020.

HARRINGTON, L. Warehouse Labor Performance: And the Winner is...Everyone. **Inbound Logistics**. Maio de 2008. Disponível em: <https://www.inboundlogistics.com/cms/article/warehouse-labor-performance-and-the-winner-iseveryone/>. Acesso em 01 nov. 2020.

HWANG, H. S.; CHO, G. S. A performance evaluation model for order picking warehouse design. **Computers & Industrial Engineering**. 2006, v. 51, n. 2, pp. 335-342. Disponível em:

JBT. **Forked AGVs**. 2020. Disponível em: <https://www.jbtc.com/en/south-america/automated-systems/products-and-applications/products/forked-agvs>. Acesso em: 10 nov. 2020.

JUNGHEINRICH. **Automated stacker**. 2020. Disponível em: <https://www.jungheinrich.com.br/sistemas/ve%C3%ADculos-automatizados-agv/erc-213a-795474>. Acesso em: 10 nov. 2020.

KATTEPUR, A.; MUKHERJEE, A.; BALAMURALIDHAR, P. Verification and Timing Analysis of Industry 4.0 Warehouse Automation Workflows. **IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)**. 2018.

LE-AHN, Tuan; DE KOSTER, M. B. M. A review of design and control of automated guided vehicle systems. **European Journal of Operational Research**. 2006, v. 171, n. 1, pp. 1-23.

LONG, J.; ZHANG, C. L. The summary of AGV guidance technology. **Advanced Materials Research**. 2012, v. 591-593, pp. 1625-1628.

LOWE, H. Smart Warehousing: What are Smart Warehouse Systems? **Select Hub**. 2019. Disponível em: <https://www.selecthub.com/warehouse-management/smart-warehouse-systems/>. Acesso em: 01 nov. 2020.

LYNCH, S. The 5 Challenges to AGV Implementation and How to Overcome Them. **FlexQube**. 2019. Disponível em <https://www.flexqube.com/news/the-5-challenges-to-agv-implementation-and-how-to-overcome-them/>. Acesso em: 10 ago. 2020.

MACRO, J. G.; SALMI, R. E. A simulation tool to determine warehouse efficiencies and storage allocations. **Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference**.

MCCREA, B. There's no stopping warehouse automation. **Logistics Management**. Julho de 2020. Disponível em: https://www.logisticsmgmt.com/article/theres_no_stopping_warehouse_automation_covid_19. Acesso em 01 nov. 2020.

MEHAMI, J.; MAULUDIN, N.; ZHONG, R. Y. Smart automated guided vehicles for manufacturing in the context of Industry 4.0. **Procedia Manufacturing**. 2018, n. 26, pp. 1077-1086.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Revista Produção**. Poli-USP. 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/prod/v17n1/14.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2020.

MITROFF, I. I.; BETZ, F.; PONDY, L.R.; SAGASTI, F. **On managing science in the systems age**: Two schemas for the study of science as a whole systems phenomenon. *Interfaces*, 4, 3: 46-58. 1974.

MIYAGI, P. E. Introdução a Simulação Discreta. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

OLIVEIRA, A. J. **Desenvolvimento de um protótipo de veículo autoguiado para célula produtiva**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Curitiba, 2011, pp. 20. Disponível em: <http://sistemas.institutoslactec.org.br/mestrado/dissertacoes/arquivos/JoseOliveira.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2020.

PRADO, D. S. **Usando o Arena em simulação**. 3.ed. Belo Horizonte: INDG Tecnologia e Serviços Ltda, 2003.

REVELIOTIS, S. A. Conflict Resolution in AGV Systems. **IIE Transactions**. 2000, v. 32, pp. 647-659.

RÍOS, D. R.; POLO, L. R.; BARROS, M. J.; BOLAÑO, L. C.; MALDONADO, E. The design of a real-time warehouse management system that integrates simulation and optimization models with rfid technology. **The International Journal of Computer Science & Applications**. 2013, v. 2, n. 4.

ROBINSON, S. **Simulation: the practice of model development and use**. 2004 (pp. 336). Chichester: Wiley.

SAKURADA, N.; MIYAKE, D. I. **Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços**. Revista Gestão da Produção, São Carlos, v. 16, n. 1, pp. 25-43. 2009.

SANTOS, G. **O que é automação industrial**. Disponível em: <http://www.automacaoindustrial.info/o-que-e-automacao-industrial-parte-i>. 2014. Acesso em: 10 nov. 2020.

SHIBUYA, M. K.; MAIELLARO, J. R.; STETTINER, C. F. **A aplicação da simulação computacional como uma ferramenta para a tomada de decisões logísticas**. Apresentação de Trabalho/Simpósio. 2012. Disponível em <https://www.marinha.mil.br/spolm/sites/www.marinha.mil.br/spolm/files/102116.pdf>. Acesso em: 09 nov. 2020.

THEUNISSEN, J.; XU, H.; XU, X.; ZHON, R. Y. Smart AGV System for Manufacturing Shopfloor in the Context of Industry 4.0. **25th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)**. 2018.

VAN GEEST, M.; TEKINERDOGAN, B.; CATAL, C. Design of a reference architecture for developing smart warehouses in industry 4.0. **Computers in Industry**. 2020. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0166361520305777?token=69C5D46AD2C039AC>

880D23BFFC658EEFF927259122154A7510A4FC0BE176B1D8A89CA7519DB689DE917
C914C418CED91. Acesso em: 10 nov. 2020.

ANEXO II - Layout do almoxarifado de lâminas de estatores atual

