



SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA MOVIMENTAÇÃO DE MATERIAIS COM VEÍCULOS AUTOMATICAMENTE GUIADOS NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0 – UM ESTUDO DE CASO DE UMA INDÚSTRIA ELETRÔNICA

SIMULATION OF MATERIAL HANDLING WITH AUTOMATED GUIDED VEHICLES IN THE INDUSTRY 4.0 CONTEXT - A CASE STUDY OF AN ELECTRONIC INDUSTRY

Rodrigo Begnini de Castilhos  E-mail: rbcastilhos@ucs.br

Ivandro Cecconello  E-mail: iceccone@ucs.br

*Universidade de Caxias do Sul (UCS), Caxias do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Resumo: O adequado dimensionamento dos recursos logísticos necessários, para garantir adequado abastecimento de linhas produtivas e movimentação de produtos acabados, representa um desafio para a maioria dos contextos industriais, e no segmento eletroeletrônico não é diferente. Neste contexto, este trabalho aborda o problema de dimensionamento de AGVs frente a demanda necessária de abastecimento de matérias prima e de retirada de produtos acabado, em uma indústria eletrônica. Assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma simulação computacional que possui dois AGVs na operação intralogística, comparando as principais métricas com dados reais e também com cálculos analíticos. O estudo foi desenvolvido durante o projeto de implementação do segundo veículo autônomo da planta, demonstrando as vantagens e limitações da ferramenta de simulação frente a métodos convencionais. Os resultados encontrados pelo método analítico mostraram-se mais otimistas quanto a eficiência do sistema, entretanto a simulação computacional entregou métricas mais coerentes com o cenário real de utilização dos veículos.

Palavras-chave: Simulação Computacional. Eficiência. Intralogística. AGV. Indústria 4.0.

Abstract: The adequate sizing of the necessary logistics resources to ensure adequate supply of production lines and movement of finished products represents a challenge for most industrial contexts, and in the electronics segment it is no different. In this context, this work addresses the problem of sizing AGVs in view of the necessary demand for supplying raw materials and removing finished products, in an electronics industry. Thus, the objective of this work was to develop a computational simulation that has two AGVs in intralogistics operation, comparing the main metrics with real data and also with analytical calculations. The study was developed during the implementation project of the plant's second autonomous vehicle, demonstrating the advantages and limitations of the simulation tool compared to conventional methods. The results found by the analytical method were more optimistic regarding the efficiency of the system, however the computational simulation delivered metrics that were more consistent with the real scenario of vehicle use.

Keywords: Computer Simulation. Efficiency. Intralogistics. AGV. Industry 4.0.

1 INTRODUÇÃO

A digitalização das indústrias, também denominada de Indústria 4.0, vem ganhando cada vez mais atenção dos gestores das empresas, por se tratar de uma transformação tecnológica que automatiza processos dentro da organização. Fottner *et al.* (2021) analisa que nas últimas duas décadas a complexidade da movimentação interna de materiais, também denominada de intralogística, tem aumentado consideravelmente, abrindo caminhos para utilização de sistemas autônomos de transporte de materiais.

De forma a responder pela demanda de sistemas de movimentação que tenham como características a flexibilidade, eficiência e robustez, premissas da Indústria 4.0, classifica os veículos automaticamente guiados – AGVs, como a classe de equipamento de transporte que mais ganha força nas empresas (Bilge; Tanchoco, 1997). Os AGVs são veículos não tripulados, alimentados por baterias, com capacidade de operar durante as 24 horas do dia, sem interrupções e com facilidades de customização ou criação de novas rotinas. Sabatini *et al.* (2013) afirmam que o uso de sistemas autônomos ainda é pouco explorado em indústrias e armazéns, contudo a substituição de empilhadeiras, veículos largamente utilizados, por sistemas autônomos aumenta sensivelmente a eficiência da movimentação, garante o tempo de ciclo e reduz completamente erros humanos.

López, Zalama e Gómez-García-Bermejo (2022) afirmam que problemas logísticos e de transporte foram trazidos para um plano de maior destaque com o elevado aumento de demanda em compras online causado pelos efeitos da pandemia do COVID-19. Contudo, o processo de transformação digital de uma empresa, segundo Luściński e Ivanov (2020), requer constante planejamento e monitoramento das variáveis que cercam a produtividade. Vista a complexidade da interação entre veículos, máquinas e homens, ferramentas de simulação de processos se tornam grandes aliadas durante as fases iniciais de implementação de novas tecnologias.

Investigar a influência da logística interna nos processos de produção é um passo importante, conforme demonstrado por Foit, Golda e Kampa (2020). O uso de softwares de simulação detalhada do modelo de produção, linhas, operadores e

robôs, é decisivo na tomada de decisões de melhorias da planta, bem como permite planejamentos mais apurados para o futuro do negócio.

Diante do contexto apresentado, o presente artigo tem como problema de pesquisa avaliar se o atual dimensionamento AGVs atende adequadamente a demanda necessária de abastecimento de matérias prima e de retirada de produtos acabado. Assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma simulação computacional de uma planta industrial eletroeletrônica que possui dois AGVs na operação intralogística, comparando as principais métricas com dados reais e também com cálculos analíticos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Schulze e Wullner (2006) definem que esse processo é inevitável nas empresas e não agrega valor ao produto, contanto, se essa etapa não ocorrer de maneira correta, passos posteriores, que geram valor, são prejudicados e o produto final pode não atender as expectativas de custo, qualidade e tempo de produção. Dessa forma, Fazlollahtabar (2016), concorda que a etapa de transporte deve ser realizada da maneira mais simples e com menor impacto econômico possível.

Bechtsis *et al.* (2017) defendem que não somente o sistema de produção deve ser flexível, mas também os métodos de transporte interno devem apresentar possibilidades de adaptação rápida a novos cenários sem abrir mão da confiabilidade. Foit, Golda e Kampa (2020) também demonstram que os padrões de Manufatura de Classe Mundial e Logística de Classe Mundial concordam que a performance da logística interna tem significativo impacto na performance da manufatura, uma vez que paradas operacionais impactam diretamente no fluxo de materiais em um sistema flexível.

2.1 Veículos Automaticamente Guiados

Conforme Sabatini *et al.* (2013), o primeiro sistema desse tipo foi implantado na década de 1950 pela empresa norte americana Barrett Electronics. Nos tempos atuais os AGVs têm uma participação de mercado de milhares de unidades vendidas por ano e os avanços tecnológicos tornam cada dia essa solução economicamente

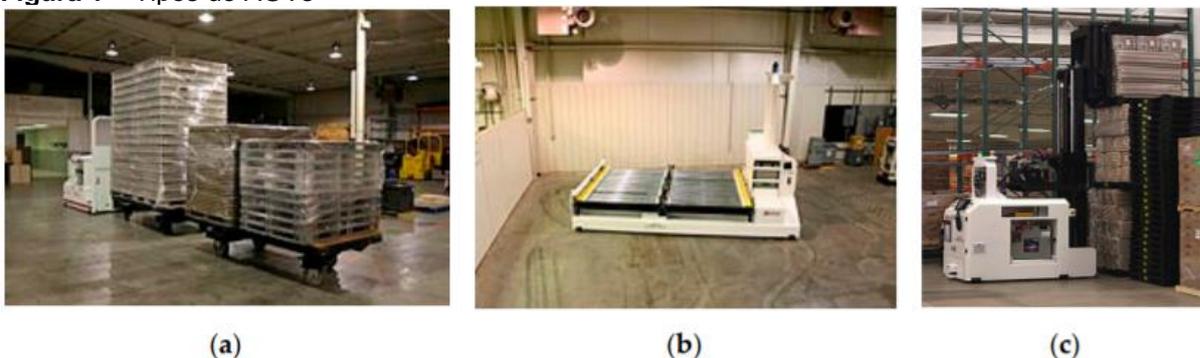
mais atrativa, conseqüentemente fazendo com que ela seja mais difundida nas organizações (Bechtsis *et al.*, 2016).

Matos *et al.* (2021) afirmam que atualmente AGVs são aplicados predominantes em cenários de movimentação de matérias dentro de indústrias, em linhas de produção, contudo a massificação dessa tecnologia vem tornando constante o uso desses veículos em hospitais e centros de distribuição, criando novas oportunidades e problemas a serem discutidos.

Os componentes que constituem um sistema de AGV são definidos por Schulze e Wullner (2006) como o veículo em si, responsável pela movimentação da carga, um controlador estacionário do sistema, responsável pelo gerenciamento de ordens de trabalho e tráfego dos veículos e os periféricos responsáveis pela interação dos veículos com o processo de movimentação.

Os transportadores normalmente são customizados para atender as demandas do processo de movimentação (Foit; Golda; Kampa, 2020). A figura 1 representa os principais tipos de AGVs, sendo eles rebocadores (a), carga unitária (b) ou paletizadores (c).

Figura 1 – Tipos de AGVs



Fonte: Adaptado de Foit, Golda e Kampa (2020).

No caso dos rebocadores, um ou mais vagões são conectados ao veículo com o objetivo de puxar a carga até o destino, onde o material pode ser liberado de forma manual ou automática. Já os paletizadores funcionam de forma similar a empilhadeiras, possuindo um dispositivo com formato de garfo, capaz de suspender paletes para realizar a movimentação e armazenamento dos mesmos. Por fim, os veículos do tipo de carga unitária são veículo que transportam o material sobre o

AGV, sendo que o dispositivo responsável pela transferência da carga podem ser mesas elevatórias, roletes ou correias motorizadas (Foit; Golda; Kampa, 2020).

Ao que diz respeito ao controlador do sistema de AGVs, este pode ser um servidor local, instalado na mesma planta que os veículos ou uma instalação em infraestrutura de nuvem remota (Bilge; Tanchoco, 1997). O controlador é responsável por todas as tarefas relacionadas ao gerenciamento da frota de AGVs, podendo ser elas: recebimento de ordens de transporte, priorização de rotas de maior impacto, agendamento de viagens, acompanhamento do status dos veículos, acompanhamento de máquinas e operadores vinculados ao transporte e a conferência de possíveis colisões ou conflitos. Matos *et al.* (2021) destacam que o controlador conta com algoritmos capazes de lidar com eventos não planejados, como falhas de localização ou comunicação com os AGVs, garantindo a confiabilidade e segurança da movimentação.

Por sua natureza autônoma associado a grande quantidade de sensores presentes nos veículos, uma grande quantidade de dados é gerada a cada transporte realizado, as quais são armazenadas em um banco de dados com as informações referentes aos processos, permitindo que gestores analisem relatórios de operação dos veículos e encontrem gargalos e possibilidades de melhorias do sistema (Oyekanlu *et al.*, 2020).

Sezen (2003) afirma que a maioria dos sistemas de veículos autônomos operam como seguidores de linha, isto é, uma linha guia é instalada no piso dos corredores por onde o AGV irá transitar. Contudo, Oyekanlu *et al.* (2020) mostram que sistemas de controle mais complexos, denominado de navegação livre, ganham cada vez mais mercado. Nesse modelo de navegação é aplicada uma fusão de sensores inerciais e sensores de visão, fazendo com que não seja necessário guia físico para a navegação do veículo. Um comparativo dos diferentes tipos de navegação é apresentado no quadro 1.

Quadro 1 – Principais sistemas de navegação autônoma

Método	Guia	Instalação	Flexibilidade	Custo
Indutivo	Condutor elétrico com sinais de alta frequência embutido no piso	Requer reforma do piso.	Baixa	Alto
Magnético	Fita magnética colada ou embutida no piso.	Aplicação de fita sobre o piso	Média	Médio
Ótico	Fita colorida ou pintura sobre o piso.	Aplicação de fita ou tinta sobre o piso.	Média	Baixo
Livre	Nenhum	Mapeamento virtual.	Alta	Alto

Fonte: Adaptador de Oyekanlu *et al.* (2020).

Schulze e Wullner (2006) apontam que essas características tornam os processos de transporte flexíveis, planejáveis e previsíveis, garantindo a reprodutibilidade e o rastreamento dos bens transportados, características desejadas por empresas inseridas no contexto da Indústria 4.0.

2.2 Simulação de processos de movimentação

Petrinec, Kovacic e Marozin (2003) frisam que as novas tecnologias podem se combinar de formas variadas dentro dos processos da empresa e essa grande quantidade de possibilidades abre espaço para o uso de realidades virtuais, possibilitando experimentar novos arranjos simulados antes de iniciar sistemas reais.

Ferramentas de simulação computacional, segundo Luściński e Ivanov (2020), são capazes de resolver problemas complexos através da experimentação de sistemas ou processos quando os mesmos ainda não existem, reduzindo custo, tempo e risco envolvido. Problemas de processos produtivos podem ser analisados através de métodos analíticos e por simulações em software, mas a forma analítica gera problemas matemáticos que demandam muito tempo e esforço para serem resolvidos (Pawlewski; Hoffa, 2014).

Yafei *et al.* (2018) comprovam através de software de simulação associado ao uso de técnica 5W1H as possibilidades de aumentar a eficiência de uma área de armazenamento através de alterações em rotas de movimentação e layout da planta.

Kesen e Baykoc (2007) concordam que modelagens matemáticas forçam o analista a assumir determinadas suposições sobre o sistema analisado, entretanto a medida que mais suposições são feitas com a finalidade de diminuir a complexidade matemática do problema, menos real é o resultado calculado. Por outro lado, Yafei,

et al. (2018) mostram que o uso de ferramentas de simulação não irá resultar em uma única solução ótima para o problema, mas sim uma análise do comportamento do sistema ao longo do tempo na medida que variáveis são alteradas pelo usuário.

Segundo López, Zalama e Gómez-García-Bermejo (2022), no contexto de simulação envolvendo veículos autônomos, tradicionalmente dois focos são observados nos trabalhos: o primeiro diz respeito a análise das capacidades de trafegabilidade do AGV, baseado em suas características físicas, controladores e sistema de navegação, já o segundo foco, que foi abordado nesse trabalho, analisa os veículos autônomos de forma global, otimizando rotas, agendamento e alocação de recursos.

No âmbito de analisar um sistema de movimentação autônomo, dada a quantidade de parâmetros e variáveis, técnicas de simulação são a escolha mais acertada de acordo com Kesen e Baykoc (2007). Especialmente quando o sistema analisado é composto de múltiplos veículos com capacidade de se deslocar de forma bidirecional, problemas de roteamento surgem e fazem com que políticas e algoritmos de coordenação sejam necessários para atingir uma solução satisfatória. López, Zalama e Gómez-García-Bermejo (2022) propõe em seu trabalho que a avaliação de um sistema de AGV seja desenvolvida em duas etapas, utilizando das vantagens da simulação em situações onde existem muitas variáveis para serem analisadas de forma simultânea e de recursos analíticos onde equações simples puderem descrever a operação do sistema.

Os objetivos principais de simular um sistema de AGVs são analisar a viabilidade do sistema, avaliar as regras de despacho de veículos, eliminar conflitos de tráfego, maximizar a produtividade, minimizar os custos de transporte, maximizar o espaço da planta e reduzir a quantidade de *buffers*, usando de indicadores (KPI) como OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) e OTE (*Overall Throughput Effectiveness*) (Foit; Golda; Kampa, 2020).

Sinriech e Tanchoco (1992) afirmam que é desejável ter o menor número possível de veículos, pois além do investimento inicial, existe ainda o efeito de diminuição do número de entregas que cada AGV pode fazer em função de congestionamentos e bloqueios de rotas. Oyekanlu *et al.* (2020) sugerem que o número ideal de veículos é encontrado ponderando itens como custo de aquisição,

custos de operação, número total de entregas do sistema em função do tempo e percentual de utilização de cada veículo.

Em seu trabalho de simulação de múltiplos veículos autônomos, Mahadevan e Narendran (1994) demonstram um método denominado SVL (*single vehicle loop*) que consiste em dividir as tarefas dos veículos em rotas menores, separando regiões da planta onde somente determinados veículos circulam, dessa forma problemas de conflitos ou travamentos de rotas são sensivelmente reduzidos em relação a um sistema onde todos os veículos tem liberdade para trafegar por toda planta. Tanchoco (1997) demonstrou também que utilizar buffers de envio ou recebimento com tamanho equivalente ao que o AGV é capaz de transportar pode trazer redução de até 50% no tamanho da frota.

Sezen (2003) aponta que softwares para simulação de sistemas de manufatura apresentam vantagens de poder considerar não somente a simulação da movimentação dos AGVs, mas também a sua interação com processos, máquinas e operadores da planta, permitindo identificar bloqueios e gargalos do sistema proposto.

3 MÉTODO

Desenvolveu-se um estudo de caso, definido por Yin (2015) como um método para entender um fenômeno do mundo real e assumir que a completa explicação do mesmo engloba condições e contextos pertinentes ao caso analisado. Dessa forma o autor destaca que um único estudo de caso não deve ser generalizado como solução para outras situações, contudo tem como meta expandir o conhecimento inicial sobre o tema.

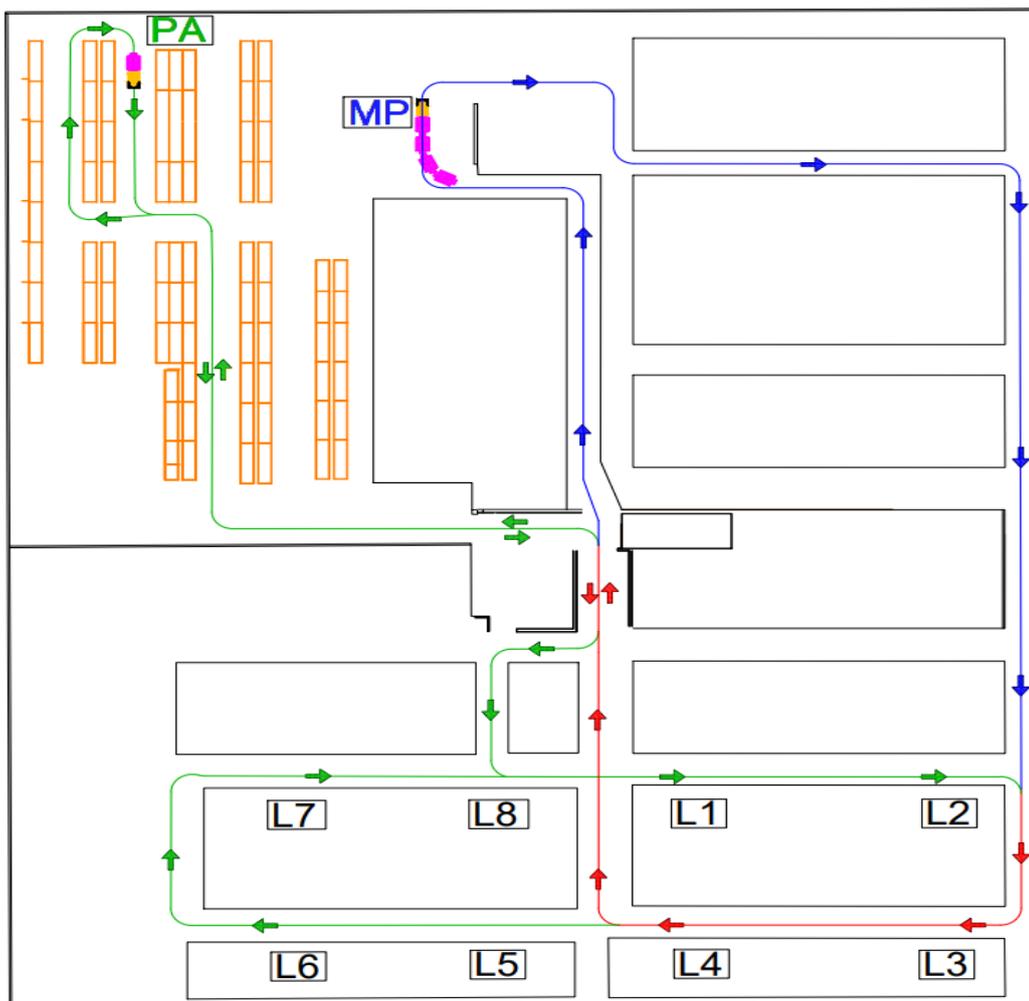
3.1 Caso proposto

O estudo de veículos autônomos se deu em uma planta localizada no estado de São Paulo onde uma indústria multinacional do ramo automotivo é responsável pela fabricação de módulos eletrônicos para as principais montadoras de automóveis do mundo.

A logística interna de materiais das células de produção dessa empresa acontecia através de um veículo rebocador, onde o operador conectava vagões e transportava paletes, no padrão PBR (1200x1000mm), contendo matéria prima ou produto acabado aos seus destinos. Atualmente, o veículo tripulado foi substituído por dois veículos autônomos analisados neste trabalho.

Nesse cenário dois processos de movimentação foram analisados: o primeiro consiste no fornecimento de matéria prima (MP) para as linhas de produção e o segundo contempla a retirada de produtos acabados (PA) da linha de produção para armazenamento no estoque da empresa. A planta que representa graficamente esses dois processos de movimentação é mostrada na figura 2.

Figura 2 – Planta e trajetos dos AGVs.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Na planta apresentada na figura 2, os pontos L1 à L8 representam as células de produção de diferentes produtos, enquanto que o ponto MP se refere ao local de fornecimento de matéria prima e o ponto PA o ponto para armazenamento de produtos acabados. Ainda próximo aos pontos MP e PA encontram-se os dois AGV em amarelo, para fins de referência de escala.

As atividades de abastecimento das células de produção com matéria prima são exclusividade de um veículo e são representadas pelo trajeto em azul, havendo paradas somente nos pontos L3 e L4. A tarefa de retirada de produtos prontos para armazenamento é atribuída ao segundo veículo e é feita com paradas em todas as linhas de L1 a L8, sendo representada pelo trajeto em verde.

São encontrados ainda trechos na cor vermelha, estes representam segmentos do caminho que são compartilhados pelos dois veículos. Cabe também a observação da existência de trechos bidirecionais, representados pelas setas, fazendo necessário que o sistema de gestão dos veículos controle o tráfego dos mesmos para evitar colisões ou bloqueio em caso de um veículo acessar o caminho que outro já estava utilizando.

A criação de ordens de movimentação do AGV é atrelada aos operadores, toda vez que uma célula necessitar de matéria prima, irá realizar um chamado do material necessário através do computador instalado em seu posto de trabalho, automaticamente o operador do estoque de matéria prima irá receber essa requisição em seu monitor e irá abastecer o veículo com o material requisitado. A partir disso o veículo se desloca de forma automática até a célula solicitada e aguarda o operador remover os itens. O processo para retirada de produto acabado acontece da mesma maneira, o operador cria uma ordem de transporte, o AGV se desloca até seu posto para que o produto seja depositado e por fim o veículo irá se deslocar até o local de armazenamento.

A planta apresentada representa a solução de espaços na fábrica em que se torna fisicamente viável a operação de um veículo autônomo compatível com o material transportado, bem como permite uma integração harmoniosa com outros processos de fabricação e movimentação da empresa. Variações de rotas, através de outros corredores podem apresentar soluções com menores distâncias, todavia podem causar conflitos com outros processos produtivos da empresa, portanto não serão abordados neste trabalho.

A indústria analisada opera em três turnos diários de 8 horas, de segunda a sábado, fazendo com que cada operador trabalhe por 40 horas semanais. Dessa forma é esperado que a bateria do AGV tenha desempenho para operar de maneira contínua, com pequenos intervalos entre os intervalos para descanso ou alimentação dos operadores. A ausência de expediente aos domingos permitirá ao veículo uma recarga completa no banco de baterias.

3.2 Modelagem analítica de desempenho

A partir do layout apresentado, é necessário a avaliação de desempenho do sistema de movimentação, com a finalidade de verificar se o mesmo atende à demanda da empresa em questão. Essa análise parte da verificação da demanda de matéria prima de cada linha, bem como a capacidade de produção dessa linha por unidade de tempo. A tabela 1 apresenta a quantidade de entregas necessárias para abastecer as linhas e remover produtos prontos em situação de produção máxima das linhas.

Tabela 1 – Demanda de movimentação

AGV	Origem	Destino	Transportes por hora
1	MP	L3	4
1	MP	L4	2
2	L1 ou L2	PA	3
2	L3 ou L4	PA	1
2	L5 ou L6	PA	1
2	L7 ou L8	PA	0,5

Fonte: Elaborada pelos autores.

Posteriormente calcula-se o número de entregas por hora que o sistema proposto tem capacidade de realizar, levando em consideração a distância entre os pontos de entrega, a velocidade de deslocamento do veículo de 0,8 m/s em média e um tempo ocioso de 60 segundos para o operador efetuar o transbordo da carga. Os resultados dessa análise são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Desempenho projetado

AGV	Origem	Destino	Distância (m)	Tempo (min)	Entregas/Hora
1	MP	L3/L4	208	5,8	10
2	L1/L2/L3/L4	PA	254	6,8	8
2	L5/L6/L7/L8	PA	322	10,9	5

Fonte: Elaborada pelos autores.

Sabendo da demanda de transportes por hora e com as informações calculadas do tempo previsto para cada viagem do veículo autônomo, é realizado o somatório das viagens necessárias por hora a fim de verificar se o sistema atende aos requisitos. A tabela 3 apresenta o deslocamento previsto dos dois veículos, bem como seu tempo em operação e ocioso.

Tabela 3 – Utilização dos AGVs

AGV	Deslocamento (metros por hora)	Minutos em uso por hora	Minutos ocioso por hora	Uso
1	1248	46,7	13,3	78%
2	1499	58,1	1,9	97%

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os resultados da análise demonstram que ambos veículos possuem utilização inferior a 100%, mostrando que o sistema proposto tem viabilidade de implementação na situação de produção máxima de todas linhas.

3.3 Modelagem simulada de desempenho

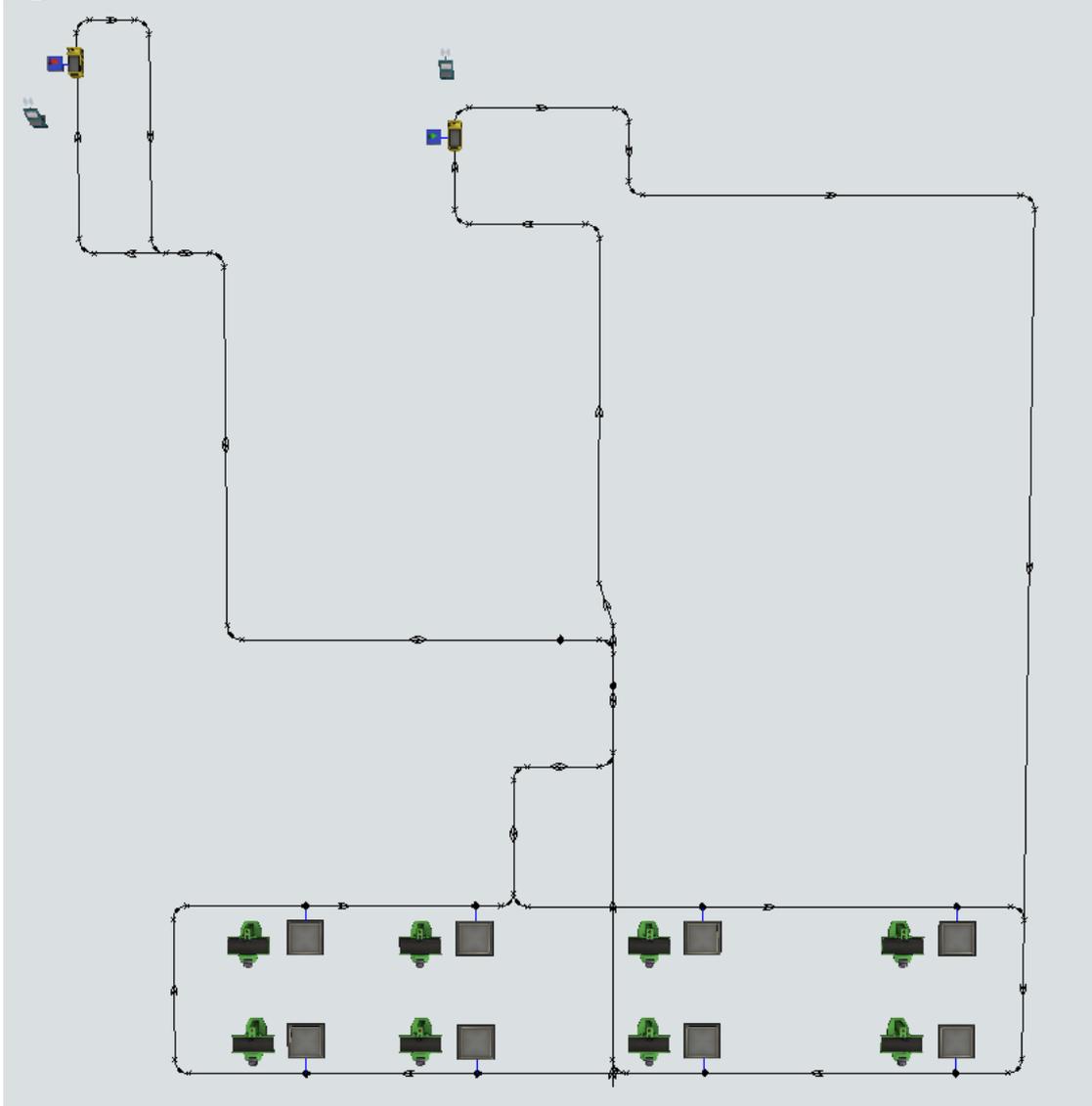
A utilização de simulação computacional permite uma análise a partir de um mundo intermediário ao método puramente analítico desenvolvido pela teoria e a observação prática da performance de um sistema real. Luściński e Ivanov (2020), em seu trabalho de simulação de veículos autônomos, definem que a simulação é uma imitação de uma operação do mundo real que permite melhor compreender situações e aperfeiçoar resultados.

Para desenvolver a simulação de movimentação de materiais no cenário proposto utilizou-se o software Flexsim[®] 2021. Yafei, *et al.* (2018) definem o software como uma ferramenta poderosa, capaz de auxiliar a empresa na análise comercial e técnica de novas soluções. O Flexsim[®] permite a modelagem e simulação de eventos discretos associados a visualização 3D. Ainda é possível utilizar os recursos de relatórios e gráficos para avaliar problemas e alternativas.

O passo inicial para desenvolver a simulação consiste na construção do modelo virtual equivalente ao sistema físico. Para isso, a planta apresentada anteriormente é recriada no software, respeitando as dimensões reais dos trajetos a

serem percorridos. São adicionado ainda os dois AGVs e as 8 células de produção. A figura 3 mostra o modelo virtual criado no software Flexsim®.

Figura 3 – Modelo virtual



Fonte: Elaborada pelos autores.

Para cada segmento de reta ou curva do circuito a ser percorrido foram atribuídas características de sentido de trânsito, uma vez que parte do circuito admite o fluxo em apenas um sentido e outros segmentos permitem que os veículos se desloquem em ambas direções. Para que os veículos realizem as atividades de coleta e despejo de material, são inseridos pontos de controle em todas as regiões de tomada de decisão do veículo. Esses pontos têm também a função de alocação e

desalocação de trechos da rota para um veículo, evitando dessa forma congestionamentos ou colisões.

As oito células de produção têm seus parâmetros configurados para que se comportem da mesma forma que o cenário real, isto é, o tempo de processo de cada uma delas é ajustado para demandar matéria prima e entregar produtos prontos nas taxas apresentados na tabela 1. Foi considerado ainda uma parada de 60 segundos em cada carga ou descarga do veículo, dessa forma é simulado o tempo gasto pelos operadores para remover o material do mesmo. A tabela 4 apresenta o tempo de processamento dos recursos de cada uma das linhas de produção.

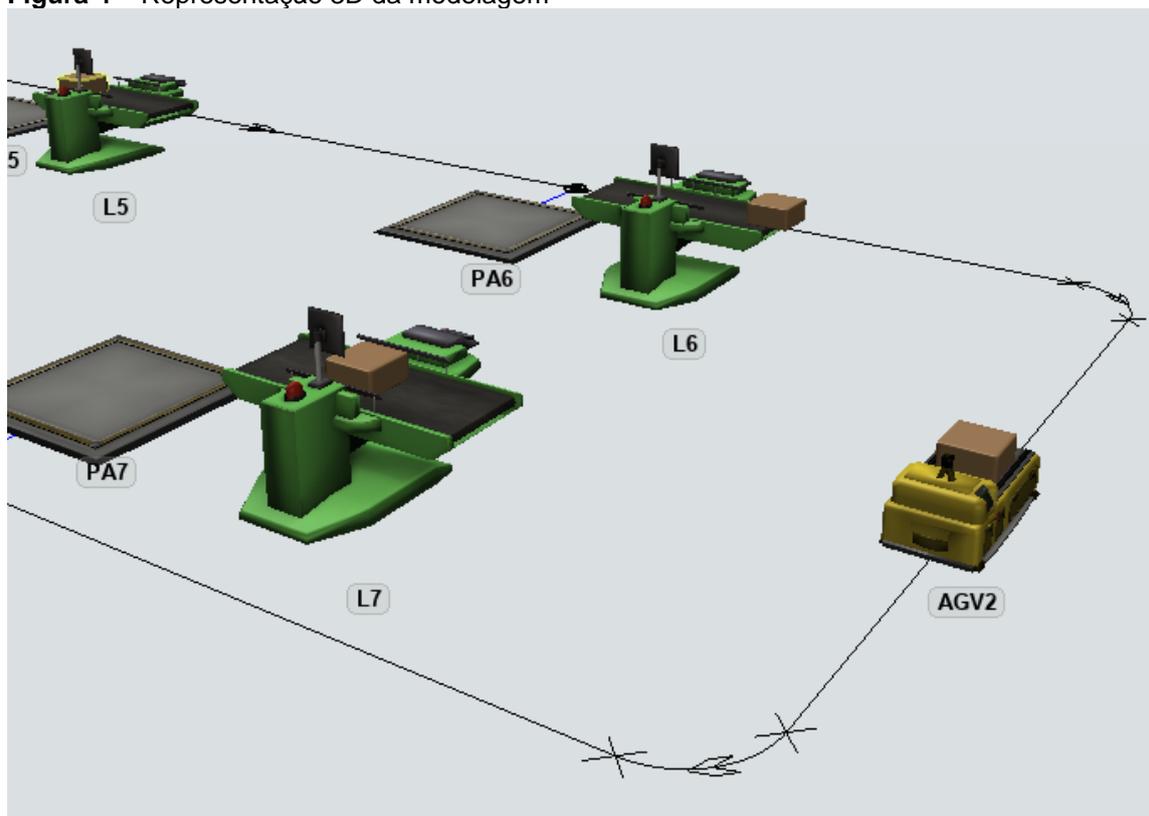
Tabela 4 – Tempo de processamento das linhas

Linha	Tempo de Processamento (min)
1	40
2	40
3	60
4	60
5	90
6	90
7	150
8	150

Fonte: Elaborada pelos autores.

O veículo foi configurado para deslocar-se a uma velocidade de 1 m/s em trechos de retas e 0,6 m/s durante as curvas. Alguns trechos de retas em corredores mais estreitos ou com maior fluxo de pessoal tiveram a velocidade máxima reduzida para 0,8 m/s por questões de segurança. No cenário analisado o peso máximo transportado pelo AGV é de 850kg, portanto para evitar acionamentos bruscos a taxa de aceleração do veículo é configurada para 0,3 m/s² quando o mesmo estiver carregado e 1 m/s² quando vazio. A figura 4 mostra a representação 3D do AGV 2 deslocando-se com carga entre as linhas 6 e 7.

Figura 4 – Representação 3D da modelagem



Fonte: Elaborada pelos autores.

É configurado ainda um ponto de estacionamento dos veículos próximos aos pontos de entrega de produtos prontos e de matéria prima, dessa forma sempre que um veículo estiver ocioso o mesmo irá retornar para seu estacionamento, diminuindo chances de congestionamento e aproveitando o tempo vago para recarregar as baterias.

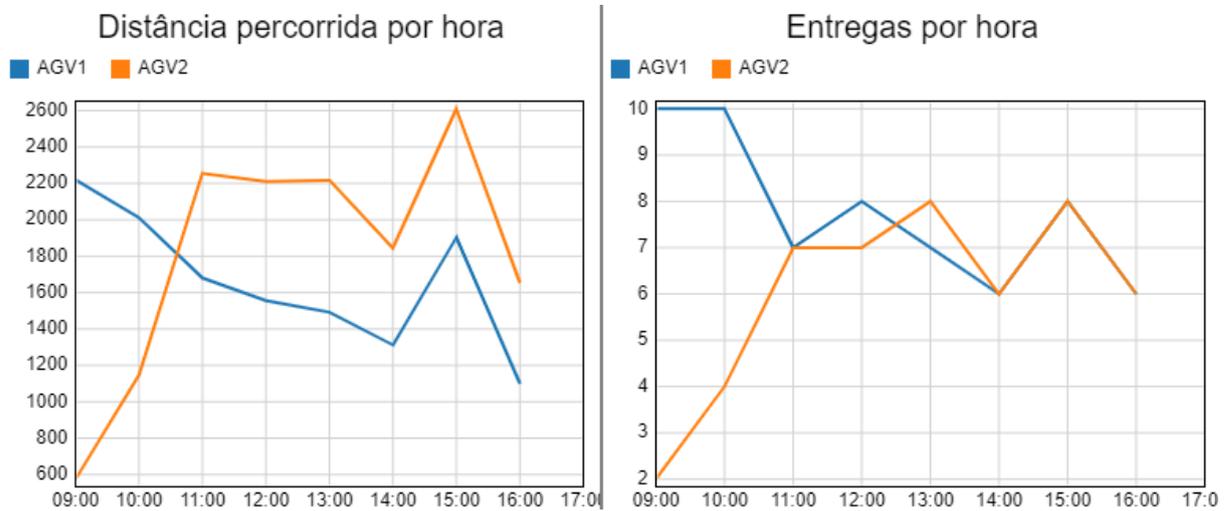
4 RESULTADOS

4.1 Resultados da simulação

A partir da construção do modelo virtual com os parâmetros do cenário apresentado, obtém-se os resultados da simulação. No instante inicial da simulação considerou-se que todas as linhas estavam desabastecidas, sendo necessário um tempo inicial onde a maior carga de trabalho é composta pelo AGV1 trazendo matéria prima para abastecer as linhas. A figura 5 demonstra esse fenômeno a partir

da dos dados relativos a distância percorrida e do número de entregas realizadas por cada veículo em função do tempo.

Figura 5 – Distância percorrida e número de entregas em função do tempo durante um turno

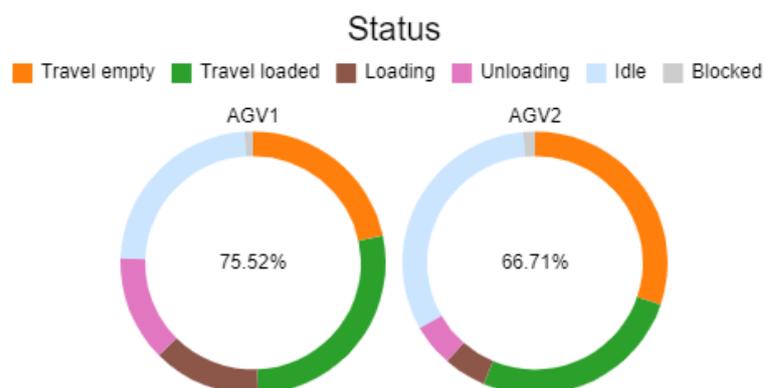


Fonte: Elaborada pelos autores.

A análise da figura 5 demonstra que no instante inicial todo o deslocamento é efetuado pelo AGV1, abastecendo as linhas que iniciam então seus trabalhos. Após aproximadamente duas horas o AGV1 reduz seu ritmo de trabalho, uma vez que todas as linhas já estão servidas de matéria prima, é nesse instante que o AGV2 aumenta seu ritmo em função das linhas que já entregam produtos acabados. A partir disso, pode-se concluir que são necessárias aproximadamente duas horas para que o sistema entre em seu estado normal de operação, sendo este período também denominado de tempo de *warm-up* (aquecimento) no software Flexsim®.

A ferramenta de modelagem permite também a avaliação do estado dos AGVs ao longo do tempo. A figura 6 mostra a ocupação dos veículos após 8 horas de trabalho, representando um turno.

Figura 6 – Estado dos AGVs após 8 horas

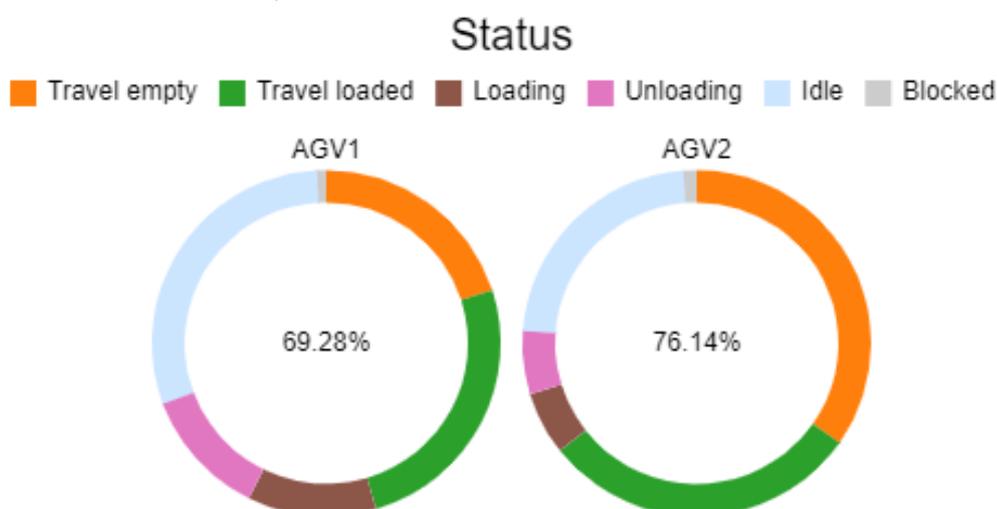


Fonte: Elaborada pelos autores.

Os gráficos da figura 6 mostram que ao final do primeiro turno o AGV1 deslocou-se em 49,5% do tempo, enquanto que o AGV2 se manteve em movimento durante 56,4% de sua jornada. É importante observar também como o tempo de carga e descarga de materiais consome uma parcela considerável da operação dos veículos, representando 26,3% do tempo do AGV1 e 11% do tempo do AGV2. A utilização total dos veículos ficou em 75,52 e 66,71% respectivamente.

Contudo, a avaliação de utilização dos AGVs tão somente durante o primeiro turno de trabalho pode levar a equívocos uma vez que durante as horas iniciais da simulação as linhas estavam desabastecidas. A simulação de uma semana completa de trabalho dos veículos é apresentada na figura 7.

Figura 7 – Estado dos AGVs após 1 semana

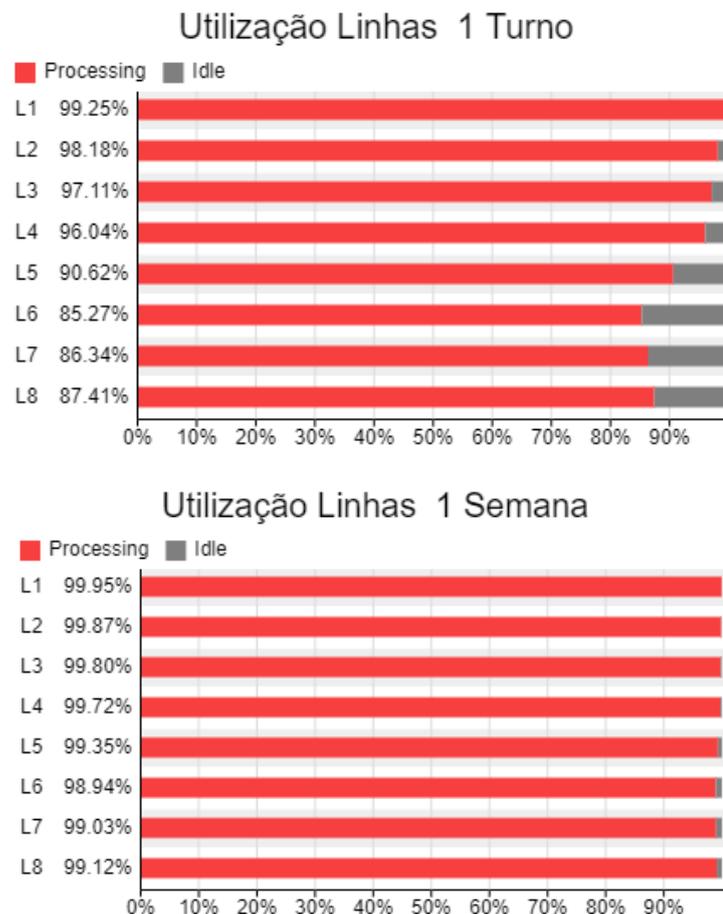


Fonte: Elaborada pelos autores.

A utilização de uma maior janela de tempo na simulação, apresentada na figura 7, representa com maior fidelidade a operação normal da planta. Com isso, a utilização do AGV1 diminui de 75,52% para 69,28%, situação já esperada em função da sobrecarga inicial para abastecer as linhas. Já o AGV2 tem sua utilização sensivelmente aumentada, de 66,71% para 76,14%. Foi constatado também que cerca de 0,8% do tempo o AGV1 teve seu caminho bloqueado pelo outro veículo, enquanto que o AGV2 teve sua rota ocupada por 1,25% do tempo total.

Contudo, apesar dos veículos permanecerem grande parte do seu tempo em utilização, essa informação de forma isolada não é suficiente para identificar se o sistema cumpre adequadamente o papel de abastecer e remover produtos prontos das linhas. Para avaliar se todas linhas estão devidamente abastecidas traçou-se o gráfico de utilização das linhas ao longo do tempo. O resultado é apresentado na figura 8.

Figura 8 – Utilização das linhas

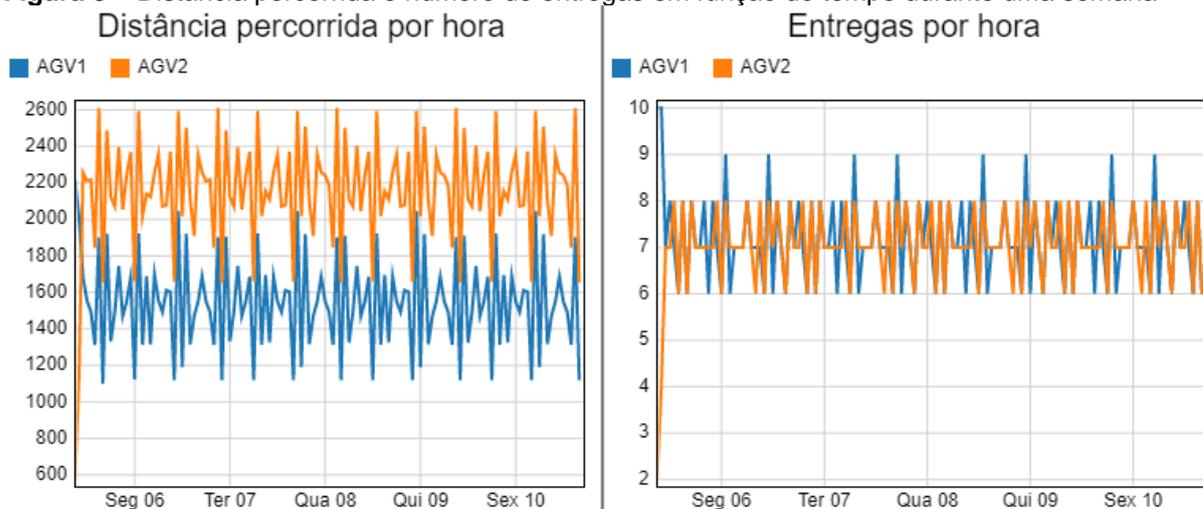


Fonte: Elaborada pelos autores.

Novamente o cenário de desabastecimento inicial das linhas pode ser visualizado pela figura 8, onde as linhas 5 a 8 tem uma maior ociosidade devido ao retardo inicial de matéria prima. Todavia, após o período inicial de estabilização das entregas de matéria prima na produção, percebe-se através da análise de uma semana de operação que todas as linhas mantêm sua produtividade acima de 98,9%. A baixa taxa de ociosidade das máquinas demonstra que os AGVs têm plena capacidade de manter a produção funcionando de maneira eficaz.

Passado o período de *warm-up*, a simulação mostra que os eventos de deslocamento e entrega dos veículos se tornam cíclicos, repetindo um mesmo padrão ao longo do tempo. Tal efeito é demonstrado pelos gráficos de distância percorrida e entregas por hora gerados para um período de uma semana de operação visualizados na figura 9.

Figura 5 – Distância percorrida e número de entregas em função do tempo durante uma semana



Fonte: Elaborada pelos autores.

A análise dos gráficos mostra que ambos AGVs fazem em média 7 entregas por hora. As variações de demanda das linhas de produção devido ao tempo de processamento fazem esse valor oscilar em mínimos de 6 entregas por hora e máximos de 9 entregas por hora.

Além dos resultados da simulação, foram registrados os dados de operação dos veículos durante uma semana de acompanhamento. Durante o período de acompanhamento a planta observada passava por fortes impactos da pandemia de COVID-19, como a escassez de semicondutores, problemas relacionados ao

recebimento de matéria prima e encerramento de atividades de clientes representativos. Em função disso, toda a planta operava em condições abaixo da expectativa normal de produção, resultando dessa forma em baixa demanda dos veículos autônomos. Os resultados da análise, simulação e prática são demonstrados na tabela 5.

Tabela 5 – Comparativo das diferentes análises

AGV 1	Deslocamento (m)	Utilização	Entregas por Hora
Método Analítico	1248	58%	10
Simulação	1500	70,1%	7
Cenário Real	832	53%	4
AGV 2	Deslocamento (m)	Utilização	Entregas por Hora
Método Analítico	1660	73%	15
Simulação	2200	77,4%	7
Cenário Real	780	45%	3

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os dados apresentados na tabela 5 mostram que o cenário encontrado pelo método analítico apresenta resultados mais otimistas, com utilização dos veículos em 58% e 73% enquanto que a simulação mostrou utilização de 70,1% e 77,4%. O número de entregas por hora também foi menor no modelo simulado. Estes resultados podem ser explicados pela falta de sincronismo das linhas em solicitar matéria prima e entregar produtos prontos, fazendo com que os veículos tenham que se deslocar várias vezes em um curto período de tempo. Além disso, é importante considerar que a simulação levou em conta rotas bloqueadas pelos AGVs, enquanto que o modelo analítico proposto não prevê essa situação.

Apesar de o cenário real observado na empresa não condizer com a capacidade total de produção das linhas, foi possível constatar que o escalonamento da demanda dos veículos entre as linhas se comporta de forma coerente com a simulação, bem como situações de bloqueio dos AGVs acontecem em proporções coerentes com os resultados do simulador.

Fica claro dessa forma as vantagens da utilização do software Flexsim® sobre o método analítico utilizado. É demonstrado nesse caso que não somente uma análise do AGV seria suficiente para aumentar a performance do sistema, uma vez que não foram verificadas alterações em rotas que gerassem benefícios significativos. Entretanto, uma avaliação completa das linhas de produção, de forma a criar um melhor escalonamento da demanda de matéria prima das linhas

aumentaria a eficiência dos veículos, permitindo que os mesmos prestassem serviço inclusive para mais linhas, sem afetar a produtividade das demais.

5 CONCLUSÃO

Para uma empresa atuar no mercado globalizado de alta competitividade se torna essencial a redução de custos e garantia de qualidade. Nesse contexto, a utilização de automações como os veículos autônomos se mostrou uma solução viável para o estudo de caso realizado, com base na simulação computacional e análises realizadas, a partir do delineamento do objetivo deste trabalho.

A complexidade envolvida no desenvolvimento de sistemas de AGVs leva a tomada de decisões que não apresentam uma única solução ótima, por isso, o estágio inicial de projeto é fortemente beneficiado com a utilização de ferramentas computacionais de simulação, permitindo a elaboração de diferentes cenários de interação entre logística e produção.

A taxa de utilização dos veículos, que em todos os cenários analisados não superou 77%, demonstrou que há razoável margem para expansões futuras na operação, sem necessidade de novos investimentos. Neste sentido também, conforme demonstrado por Bilge e Tanchoco (1997) e Mahadevan e Narendran (1994), foi constatado que a adição de *buffers* de envio ou recebimento nas linhas aumentaria ainda mais a eficiência do sistema.

A utilização de métodos analíticos apresentou resultados mais otimistas que a simulação, com situações onde a utilização dos veículos ficou até 12% abaixo dos resultados apresentados pelo software. Contudo, observou-se que a simulação ofereceu resultados mais condizentes com o cenário real, uma vez que levou em conta variáveis que o método analítico não considera, como congestionamento dos veículos ou falta de sincronismo na solicitação de ordens de transporte.

Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que a simulação computacional se mostrou uma ferramenta mais realista e confiável para avaliar o desempenho dos AGVs na operação intralogística, quando comparada ao método analítico. A análise revelou que a falta de sincronismo entre as linhas e os bloqueios das rotas impactam diretamente na eficiência dos veículos, evidenciando a complexidade do sistema. Além disso, verificou-se que uma reavaliação do escalonamento da demanda de matéria-prima pode otimizar o uso dos AGVs,

permitindo maior cobertura sem comprometer a produtividade. Dessa forma, o estudo reforça a importância da simulação na tomada de decisão para melhorias operacionais.

De acordo com os resultados obtidos fica constatado que o *software* Flexsim[®] tem a capacidade de recriar fielmente um modelo de simulação da planta apresentada. Com suas ferramentas de análise se torna possível criar diferentes situações na planta e extrair métricas do comportamento dos veículos e das linhas de produção. Dessa forma, ferramentas de simulação computacional se mostram ferramentas valiosas para engenheiros e administradores aumentarem a performance de seus processos fabris e reduzir custos.

Para trabalhos futuros, sugere-se a ampliação do estudo com a inclusão de um número maior de AGVs e a simulação de diferentes configurações operacionais, visando identificar estratégias mais eficientes de escalonamento da demanda. Além disso, a integração de algoritmos de inteligência artificial para otimizar a alocação e as rotas dos veículos pode proporcionar ganhos adicionais de desempenho. Outra possibilidade é a análise do impacto da introdução de outras tecnologias da Indústria 4.0, como sensores inteligentes e sistemas de gestão em tempo real, para aumentar a eficiência da intralogística.

REFERÊNCIAS

BECHTSIS, Dimitrios; TSOLAKIS, Naoum; VLACHOS, Dimitrios; IAKOVOU, Eleftherios. Sustainable supply chain management in the digitalisation era: The impact of Automated Guided Vehicles. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 3970-3984, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616316675>. Acesso em: 10 maio. 2025.

BILGE, Ümit; TANCHOCO, Jose MA. AGV systems with multi-load carriers: basic issues and potential benefits. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 16, n. 3, p. 159-174, 1997. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/AGV-systems-with-multi-load-carriers%3A-Basic-issues-Bilge-Tanchoco/f4cb0a17728a9756bb3c85daf4126ec3f41fd070>. Acesso em: 10 maio. 2025.

FAZLOLLAHTABAR, Hamed. Parallel autonomous guided vehicle assembly line for a semi-continuous manufacturing system. **Assembly Automation**, 2016. Disponível em: <https://www.proquest.com/docview/2082270398>. Acesso em: 10 maio. 2025.

FOTTNER, Johannes; CLAUER, Dana; HORMES, Fabian; FREITAG, Michael; BEINKE, Thies; OVERMEYER, Ludger; GOTTWALD, Simon; ELBERT, Ralf; SARNOW, Tessa; SCHMIDT, Torstem; REITH, Karl; ZADEK, Hartmut; THOMAS, Franziska. Autonomous Systems in Intralogistics-State of the Art and Future Research Challenges. **Logistics Research**, v. 14, n. 1, p. 2, 2021. Disponível em: <https://www.econstor.eu/handle/10419/297188>. Acesso em: 10 maio. 2025.

FOIT, Krzysztof; GOŁDA, Grzegorz; KAMPA, Adrian. Integration and evaluation of intra-logistics processes in flexible production systems based on oee metrics, with the use of computer modelling and simulation of agvs. **Processes**, v. 8, n. 12, p. 1648, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/12/1648>. Acesso em: 11 maio. 2025.

KESEN, Saadettin Erhan; BAYKOÇ, Ömer Faruk. Simulation of automated guided vehicle (AGV) systems based on just-in-time (JIT) philosophy in a job-shop environment. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 15, n. 3, p. 272-284, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1569190X06000852>. Acesso em: 12 maio. 2025.

LUŚCIŃSKI, Sławomir; IVANOV, Vitalii. A Simulation Study of Industry 4.0 Factories Based on the Ontology on Flexibility with using Flexsim Software. **Management and Production Engineering Review**, Polonia, v. 11, n. 3, p. 74-83, 2020. Disponível em: <https://www.journals.pan.pl/dlibra/publication/134934/edition/117941>. Acesso em: 12 maio. 2025.

MAHADEVAN, B. and; NARENDRAN, T. T. A hybrid modelling approach to the design of an AGV-based material handling system for an FMS. **The international journal of production research**, v. 32, n. 9, p. 2015-2030, 1994. Disponível em: <https://repository.iimb.ac.in/handle/2074/10385>. Acesso em: 12 maio. 2025.

MATOS, Diogo; COSTA, Pedro; LIMA, José; COSTA, Paulo. Multi AGV coordination tolerant to communication failures. **Robotics**, v. 10, n. 2, p. 55, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2218-6581/10/2/55>. Acesso em: 12 maio. 2025.

LÓPEZ, Joaquín; ZALAMA, Eduardo; GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO, Jaime. A simulation and control framework for AGV based transport systems. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 116, p. 102430, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X21001271>. Acesso em: 12 maio. 2025.

OYEKANLU, Emmanuel A.; SMITH, Alexander C.; THOMAS, Windsor P.; MULROY, Grethel; HITESH, Dave; RAMSEY, Matthew; KUHN, David J.; MCGHINNIS, Jason D.; BUONAVITA Steven C.; LOOPER, Nickolous A.; NG, Mason; NGOMA, Anthony; LIU, Weimin; MCBRIDE Patrick G.; SHULTZ, Michael G.; CERASI, Craig; SUN, Dan. A review of recent advances in automated guided vehicle technologies: Integration challenges and research areas for 5G-based smart manufacturing applications. **IEEE access**, v. 8, p. 202312-202353, 2020. Disponível em:

https://www.academia.edu/73335048/A_Review_of_Recent_Advances_in_Automated_Guided_Vehicle_Technologies_Integration_Challenges_and_Research_Areas_for_5G_Based_Smart_Manufacturing_Applications. Acesso em: 13 maio. 2025.

PETRINEC, Krešimir; KOVACIC, Zdenko; MAROZIN, Alessandro. Simulator of multi-AGV robotic industrial environments. **2003 IEEE International Conference on Industrial Technology**, p. 979-983, 2003. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/4071056_Simulator_of_multi-AGV_robotic_industrial_environments. Acesso em: 13 maio. 2025.

PAWLEWSKI, Pawel; HOFFA, Patrycja. Optimization of cross-docking terminal using flexsim/optquest-case study. **Proceedings of the Winter Simulation Conference 2014**, p. 2013-2024, 2014. Disponível em: <https://www.informs-sim.org/wsc14papers/includes/files/177.pdf>. Acesso em: 13 maio. 2025.

SABATTINI, Lorenzo; SECCHI, Cristian; COTENA, Giuseppina; RONZONI, Davide; FOPPOLI, Matteo; OLEARI, Fabio. Technological roadmap to boost the introduction of AGVs in industrial applications. **IEEE 9th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)**, p. 203-208, 2013. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/261210001_Technological_roadmap_to_boost_the_introduction_of_AGVs_in_industrial_applications. Acesso em: 13 maio. 2025.

SCHULZE, Lothar; WULLNER, Alexander. The approach of automated guided vehicle systems. **2006 IEEE international conference on service operations and logistics, and informatics**, p. 522-527, 2006. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/4125635>. Acesso em: 13 maio. 2025.

SEZEN, Bülent. Modeling automated guided vehicle systems in material handling. **Doğuş Üniversitesi Dergisi**, v. 4, n. 2, p. 207-216, 2003. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/281090567_Modeling_Automated_Guided_Vehicle_Systems_in_Material_Handling. Acesso em: 13 maio. 2025.

SINRIECH, D.; TANCHOCO, J. M. A. An economic model for determining AGV fleet size. **International Journal of Production Research**, v. 30, n. 6, p. 1255-1268, 1992. Disponível em: <https://scispace.com/papers/an-economic-model-for-determining-agv-fleet-size-djb02lhb2e>. Acesso em: 13 maio. 2025.

YAFEI, Liu; QINGMING, Wang; PENG, Ge. Research on simulation and optimization of warehouse logistics based on flexsim-take C company as an example. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND MANAGEMENT (ICITM), 7., p. 288-293, 2008. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8333963>. Acesso em: 13 maio. 2025.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2015. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Estudo_de_Caso_5_Ed.html?hl=pt-BR&id=EtOyBQAAQBAJ&redir_esc=y. Acesso em: 13 maio. 2025.

Biografia dos Autores

Rodrigo Begnini de Castilhos

Engenheiro eletricitista formado pela Universidade de Caxias do Sul (UCS) em 2019. É pós-graduado em Engenharia Industrial pela UCS (2022) e em Gestão Empresarial pela Focus (2023). Iniciou sua trajetória profissional como engenheiro de hardware na Spark AG, em Nova Prata, atuando no desenvolvimento de sistemas embarcados. Atualmente, coordena projetos de engenharia voltados à automação de processos em ambientes industriais e logísticos, com foco em movimentação de materiais utilizando veículos autônomos e soluções automatizadas para inventário. Possui experiência em projetos aplicados a armazéns de grande porte, com ênfase em tecnologias integradas à Indústria 4.0.

Ivandro Ceconello

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela UCS (1998) e mestrado em Engenharia de Produção pela UFSC (2002). Doutor em Administração pela UCS (2019) na linha de pesquisa em estratégia e operações. Atualmente é professor de Graduação e Pós-Graduação da Universidade de Caxias do Sul. Coordenador de cursos de pós-graduação em Engenharia Industrial e Engenharia 4.0. Larga vivência na área de Engenharia de Produção e Mecânica, com ênfase em Planejamento, Projeto e Controle de Sistemas de Produção de componentes automotivos. Tem especial interesse e pesquisa sobre: lean manufacturing; gestão de projetos; indústria 4.0; sistemas de produção; moldes de injeção; digitalização; simulação; e produtos inteligentes.



Artigo recebido em: 07/04/2022 e aceito para publicação em: 26/03/2025

DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v25i2.4611>