



**NOVA**  
NOVA SCHOOL OF  
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL

PEDRO RAFAEL DE FIGUEIREDO RODRIGUES

Licenciado em Ciências da Engenharia e Gestão Industrial

# AUTOMATIZAÇÃO DO ABASTECIMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM COM RECURSO À SIMULAÇÃO

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA E GESTÃO INDUSTRIAL

Universidade NOVA de Lisboa

Novembro, 2021





# AUTOMATIZAÇÃO DO ABASTECIMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM COM RECURSO À SIMULAÇÃO

**PEDRO RAFAEL DE FIGUEIREDO RODRIGUES**

Licenciado em Ciências da Engenharia e Gestão Industrial

**Orientadora:** Doutora Ana Paula Ferreira Barroso  
Professora Auxiliar, NOVA School of Science and Technology

**Júri:**

**Presidente:** Professora Doutora Maria Celeste Rodrigues Jacinto,  
Professora Associada com Agregação, FCT-NOVA

**Vogais:** Professor Doutor Izunildo Fernandes Cabral,  
Professor Auxiliar Convidado, FCT-NOVA  
Professora Doutora Ana Paula Ferreira Barroso,  
Professora Auxiliar, FCT-NOVA

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA E GESTÃO INDUSTRIAL

Universidade NOVA de Lisboa  
Novembro, 2021



## **AUTOMATIZAÇÃO DO ABASTECIMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM COM RECURSO À SIMULAÇÃO**

Copyright © Pedro Rafael de Figueiredo Rodrigues, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

Muito Obrigado à organização e à equipa que me acolheu e me proporcionou este desafio, sempre cheia de vontade em ajudar e participar. Foi uma temporada cheia de momentos bem passados, divertidos, e também cheia de aprendizagens que seguem comigo. Ao Paulo e a toda a sua equipa, deixo o meu sincero agradecimento!

A todos os meus colegas que fizeram parte do meu percurso académico e que tornaram tudo mais simples, divertido e memorável, o meu Muito Obrigado! Um forte bem haja à squad das tartarugas ninja, ao meu Padrinho e à Camila que foram sem dúvida um pilar neste meu percurso e que me proporcionaram momentos que certamente não esquecerei. E por fim um Forte agradecimento à minha madrinha Filipa, que de forma incansável se disponibilizou para me ajudar e que sempre esteve presente desde o primeiro ao último dia. À minha verdadeira Madrinha, o meu enorme Obrigado!

Deixo uma grande nota de agradecimento à minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Paula Barroso pela forte presença neste projeto e pela orientação incansável que me deu. Não esquecerei os e-mails que teve o cuidado de enviar para me motivar e "dar um empurrão na dissertação", tal como esta, guardo muitas outras referências que teve o cuidado de me escrever.

Obrigado à Mariana pelo constante suporte e paciência, e por me ter acompanhado em todos os momentos deste meu percurso. Um Forte Agradecimento à minha Mãe e ao meu Pai pelo aconselhamento incansável que me deram ao longo da minha vida e por me incentivarem sempre a seguir o melhor caminho. Mais do que as palavras, foi sem dúvida dos vossos exemplos que retirei os meus ensinamentos.

Por último, e simultaneamente em primeiro lugar, a ti Sofia por excederes a definição de irmã em todos os sentidos da palavra. Por tudo o que fizeste por mim, por seres um exemplo em todos os marcos que passei e por promoveres esta nossa enorme cumplicidade.



# RESUMO

O constante crescimento da procura de automóveis novos e a elevada concorrência existente nos respetivos mercados, representa um desafio para as indústrias do setor que são constantemente obrigadas a reduzir os custos de produção e, paralelamente, a aumentar a capacidade para satisfazer os mercados atuais. Para acompanhar esta realidade, ao longo dos anos estas empresas foram tornando os seus processos e as suas fábricas cada vez mais automatizadas, por forma a garantir não só a capacidade de responder à procura a custos baixos, como também uma elevada qualidade de produção que, hoje em dia, também tem um papel fundamental nesta indústria. Estas adaptações foram apelidadas de revoluções industriais sendo que a tendência atual é também conhecida por indústria 4.0.

O estudo de caso que está na base desta dissertação tem como objetivo analisar a automatização do processo manual de preparação e abastecimento de peças à linha de montagem, recorrendo ao uso de veículos autónomos de transporte ou AGV's. Para este estudo, foram selecionados 4 processos de sequência e de abastecimento e, com recurso à simulação foram construídos diferentes cenários, com base num diferente número de AGV's e para diferentes tipologias de processo. Posteriormente foi realizada uma análise comparativa dos cenários por forma a obter conclusões sobre as melhores opções e combinações mais proveitosas para o sistema em estudo, objetivando a eficiência e solidez da operação em análise. Para o efeito, o estudo inicialmente incidiu no dimensionamento do número de AGV's necessários, tendo em conta dois métodos diferentes de carregamento de baterias. Em seguida, foi feita uma análise dos parâmetros de carga de baterias que permitem maximizar a utilização dos AGV's.

A automatização desta operação permitirá não só um maior retorno à organização a médio prazo, fruto da redução de custos operacionais, como também permitirá operar continuamente, mesmo em feriados e dias festivos, e com maior qualidade e eficácia, resultado da maior consistência e precisão que uma automação consegue garantir, quando comparado com uma operação manual. O recurso à simulação e a determinação dos melhores cenários acrescenta um elevado valor na fase de projeto, pois permitirá ajudar na tomada de decisão para retirar o maior partido do investimento em causa e confere uma maior confiança na solução, pois desta forma é possível antever possíveis problemas que poderão surgir.

**Palavras Chave:** Automação, Simulação, AGV, Linha de Montagem, Industria 4.0



# ABSTRACT

The constant growth in the search for new automobiles and the existing high competition in this market represents a challenge for the industries of this sector that are constantly forced to reduce production costs and, in parallel, increase capacity to have to ability to respond to the current markets. In this context, over the past years companies have been automating more and more their processes and factories, targeting to ensure not only the production capacity with lower costs as well as the production quality that nowadays has a fundamental role in this Industry.

The case study examined on this dissertation aims to analyze the automation of the current manual process of preparation and supply of parts to the assembly line, using autonomous transport vehicles or AGV's. For this study, 4 sequences and supply processes were selected and, using simulation and different scenarios, several paradigms with different amounts of AGV's and different process typologies were analyzed, which were then compared in order to obtain conclusions about the best options and most profitable combinations for the system under study, aiming the efficiency and robustness of the operation under analysis. For this purpose, initially the study focused on sizing the number of AGV's needed, considering two different battery charging methods. Subsequently, an analysis of the battery charging parameters that allow maximizing the use of these AGV's was performed.

The automation of this operation will not only allow a greater return to the organization in a medium term, due to the reduction in operating costs, but will also allow to operate continuously, even on holidays, and with greater quality and efficiency, because of the greater consistency and accuracy that an automation can guarantee, when compared to an operation conducted by a human. The use of simulation and the determination of the best scenarios add a high value on a project phase, since it will help in the decision-making process to get the most out of the investment in question, and gives more confidence in the solution, since with this method it is possible to foresee possible problems that may arise.

**Keywords:** Automation, Simulation, AGV, Assembly Line, Industry 4.0



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento e Âmbito.....	1
1.2	Objetivo do Trabalho.....	2
1.3	Metodologia do Estudo.....	2
1.4	Estrutura da Dissertação.....	3
<b>2</b>	<b>ENQUADRAMENTO TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
2.1	Logística.....	5
2.1.1	Evolução do Conceito.....	5
2.1.2	Logística Externa, Logística In-House e Logística Inversa.....	7
2.1.3	Eficiência e Custos Logísticos.....	9
2.2	A Evolução da Indústria - Indústria 4.0.....	10
2.2.1	Veículos Autonomamente Guiados – AGV's.....	12
2.3	Simulação e o Conceito de Digital Twin.....	17
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>21</b>
3.1	Descrição do Processo de Abastecimento Interno.....	21
3.1.1	Supermercados.....	22
3.1.2	Linha de Montagem.....	23
3.2	Introdução de AGV's no Abastecimento da Linha.....	24
3.3	Síntese do Capítulo.....	24
<b>4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA -DIGITAL TWIN.....</b>	<b>27</b>
4.1	Modelo Conceptual.....	27
4.1.1	Limitações e Pressupostos do Modelo.....	28
4.2	Especificações do Modelo.....	30
4.2.1	Tratamento de Inputs.....	30
4.2.2	Outputs.....	32
4.3	Modelo Computacional.....	34
4.3.1	Software - Visual Components.....	34

4.3.2	Arquitetura do Modelo.....	34
4.4	Validação do Modelo.....	36
4.5	Análise de Cenários.....	37
4.5.1	Dimensionamento do Processo de Abastecimento.....	37
4.5.2	Análise dos Parâmetros de Carga .....	40
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>45</b>
5.1	Conclusões Principais .....	45
5.2	Limitações do Estudo.....	46
5.3	Trabalhos Futuros.....	46
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>47</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> - Evolução do Conceito de Supply Chain Management.....	7
<b>Figura 2.2</b> - Exemplo de um Closed Loop Supply Chain.....	9
<b>Figura 2.3</b> - Evolução da Indústria .....	10
<b>Figura 2.4</b> - Número de Publicações em IoT e Indústria 4.0.....	11
<b>Figura 2.5</b> - Perfil de Carga Típico de uma Bateria de íões de Lítio .....	17
<b>Figura 2.6</b> - Evolução do Número de Publicações Relacionadas Com a Tecnologia da Simulação .....	18
<b>Figura 2.7</b> - A Evolução da Ferramenta Simulação na Indústria .....	19
<b>Figura 3.1</b> - Exemplo de um Supermercado.....	22
<b>Figura 3.2</b> - Exemplo de uma Rack de Sequência Numerada de 1 a 12.....	23
<b>Figura 4.1</b> - Diagrama do Fluxo do Processo .....	29
<b>Figura 4.2</b> - Painel de Controlo de AGV's .....	35
<b>Figura 4.3</b> - Painel de Configuração de AGV.....	35
<b>Figura 4.4</b> - Relação entre a Amplitude dos Limites de Carga e Taxa Média de Tempo de Carga .....	42
<b>Figura 4.5</b> - Correlação entre Diferença Entre Limites de Carga e Taxa de Tempo de Trabalho.....	43



## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 4.1</b> - Combinações Possíveis da Família Cablagens .....	31
<b>Tabela 4.2</b> - Combinações Possíveis da Família de Tubos .....	32
<b>Tabela 4.3</b> - Listagem de Veículos a Processar pelo Modelo .....	33
<b>Tabela 4.4</b> - Comparação do Modelo Real do Simulado .....	37
<b>Tabela 4.5</b> - Resultados de Simulação - Método de Carga por Oportunidade.....	38
<b>Tabela 4.6</b> - Resultados de Simulação - Método de Carga Automática .....	40
<b>Tabela 4.7</b> - Taxa Média de Tempo de Trabalho por Cenário Simulado .....	42



# INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento e Âmbito

Desde a primeira implementação de um modelo de produção em série, executado por Henry Ford no século XX, o objetivo primário das indústrias com este modelo de produção visa a redução do custo operacional através do uso de máquinas e de trabalho padronizado para a produção em massa de um determinado produto. Nos dias correntes, apesar do facto de qualquer indústria de produção em larga escala recorrer a este modelo de produção, existe uma elevada competição nos mercados, fruto da globalização dos mercados e da existência de várias alternativas para um mesmo produto. Desta feita, a redução do custo operacional tem um papel fundamental para as empresas que se querem manter competitivas nos mercados, forçando assim a adoção e implementação do conceito de automação e de indústria 4.0.

O investimento na automação de determinados processos possibilita a redução da necessidade de mão de obra humana e os custos associados. Por outro lado, permite operar de forma contínua, sem necessidade de paragens obrigatórias para satisfazer as necessidades de um operador, como descanso ou refeições, e ainda permite operar a qualquer hora e qualquer dia, como à noite ou em feriados, sem representar qualquer custo extra. Um outro aspeto significativo prende-se com a qualidade da produção por meios automatizados, que por este meio permite atingir níveis elevados de consistência e precisão, facilitando o cumprimento dos altos padrões de qualidade atualmente exigidos.

A construção de um modelo de simulação na fase de desenho e projeto de um processo automatizado permite obter dados de elevado valor, que irão impactar no processo de tomada de decisão. Para o efeito existem diversos softwares de simulação que podem ser utilizados consoante a necessidade e o enfoque do estudo, apesar do objetivo final ser sempre reproduzir o comportamento do sistema a projetar, com base nas alterações que são propostas, por forma

a identificar as melhores opções e combinações que permitem a sua implementação e um funcionamento eficiente do processo ou operação em estudo.

O processo que será alvo deste estudo corresponde a uma operação manual de abastecimento de peças de uma linha de montagem, realizada numa fábrica de automóveis. Estes procedimentos serão alvos de análise de modo a determinar a viabilidade da implementação de uma automação, objetivando melhorar a produtividade, a qualidade e a flexibilidade. A designação da organização em estudo foi omitida por motivos de confidencialidade.

## 1.2 Objetivo do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo determinar o número adequado de Veículos Autonomamente Guiados (AGV's) a implementar num conjunto de processos de sequência e abastecimento de uma linha de montagem. Serão consequentemente estudados dois processos de *picking* com diferentes níveis de interação robótica, onde será feita uma análise dos diferentes métodos de carga de baterias existentes e seus parâmetros, e consequentemente determinar-se-á o número de AGV's necessários.

Através da simulação, pretende-se construir um modelo que permita identificar o cenário mais vantajoso para cada análise efetuada, permitindo, assim, balancear os processos e tomar decisões fundamentadas de modo a automatizar estes processos da forma mais eficiente e eficaz.

## 1.3 Metodologia do Estudo

O ponto de partida para a realização deste estudo centrou-se na definição do objetivo, onde se identificou tanto o problema que se pretende endereçar como o processo e a operação que beneficiará desta implementação. A análise apresentada diz respeito apenas à operação de abastecimento de peças à linha de montagem de uma fábrica automóvel, representando assim os seus limites a fronteira deste estudo.

Após a etapa inicial, foi necessário aprofundar o conhecimento sobre a tecnologia a ser implementada e as ferramentas adequadas que irão contribuir para o processo de tomada de decisão final. Para tal procedeu-se à análise de estudos e pesquisas realizados, relacionados com os AGV's e a utilização da ferramenta de simulação no processo de planeamento e dimensionamento de automação de um processo.

A etapa seguinte do estudo consistiu numa análise mais aprofundada do processo que decorre atualmente na fábrica, com o intuito de recolher dados iniciais, como tempos de ciclo, frequência dos abastecimentos, tempos de sequenciação e de entrega, entre outros. Também nesta etapa foram identificados possíveis estrangulamentos do fluxo de abastecimento, tais como congestionamentos dos corredores ou limitações de espaço, fatores que influenciam o processo de tomada de decisão.

Após a análise inicial, partiu-se para a construção do modelo de simulação, que constitui a base da análise apresentada e, após a sua elaboração, foi submetido a testes de validação para garantir uma estreita proximidade com o sistema real, onde o comportamento de cada processo simulado foi comparado com o processo real e posteriormente analisado pelo autor. Por forma a conseguir simular diferentes variantes de processo e diferentes aspetos, este modelo sofreu algumas adaptações ao longo da fase de análise de dados.

Com o modelo construído e validado, foi possível iniciar a etapa de recolha de dados através da simulação dos cenários em estudo. Numa primeira fase foram simulados cenários relativos ao processo de abastecimento, de forma a aferir a melhor tipologia de fornecimento e o respetivo dimensionamento, identificando o número de AGV's e estações de carga necessárias. Posteriormente, foram realizadas outras simulações com um modelo adaptado, com o intuito de aferir quais os parâmetros de carga mais eficientes para os AGV's em análise.

A última etapa do estudo consistiu no resumo das conclusões obtidas na fase acima descrita, onde foram novamente tidos em conta os resultados obtidos com as diversas simulações realizadas. Foram também enumeradas as limitações presentes no estudo, e também sugestões de desenvolvimento de trabalhos futuros.

## **1.4 Estrutura da Dissertação**

A dissertação apresentada está organizada em 5 capítulos. Em seguida é apresentada uma breve descrição relativa ao conteúdo de cada capítulo.

O primeiro capítulo começa com um pequeno enquadramento do tema em estudo onde é retratada a evolução das indústrias do setor e a importância da ferramenta de simulação no contexto da indústria 4.0. Ainda neste capítulo é clarificado o objetivo primário deste estudo, assim como a metodologia adotada na elaboração desta dissertação.

No segundo capítulo é apresentado um enquadramento de cariz teórico, que resulta da análise de trabalhos e de artigos científicos no âmbito do que é pretendido nesta dissertação. Neste capítulo é abordado o conceito de logística, o conceito de evolução da indústria, onde está presente a introdução de AGV's no transporte de material e, por último, é abordada a

relevância e o impacto da ferramenta de simulação na alteração e implementação de automatismos em operações industriais.

O terceiro capítulo referencia os processos que atualmente são utilizados na fábrica onde o estudo foi realizado, identificando os conceitos e terminologias utilizados, assim como os processos logísticos em vigor. Neste capítulo ainda são apresentados os futuros cenários a serem analisados, explicitando para cada um as particularidades e diferenças processuais, assim como os respectivos impactos.

No quarto capítulo é apresentado o modelo de simulação, onde inicialmente é apresentado o modelo conceptual e as limitações associadas. Seguidamente são explicitadas as especificações do modelo onde são identificados os inputs necessários para alimentar o modelo e outputs que este retribui no final de cada simulação. É ainda apresentado o modelo computacional que aborda o software utilizado na simulação, a arquitetura empregada e os pressupostos de validação do modelo. Por último, são apresentados e analisados todos os dados obtidos fruto de cada simulação, dos vários cenários e processos em estudo.

O quinto capítulo faz referência à conclusão da dissertação. Aqui é apresentado o resumo das principais conclusões obtidas na análise apresentada no capítulo 4. São ainda identificadas as limitações do estudo, os possíveis impactos que estas podem ter no resultado final e, por fim, são identificados possíveis trabalhos futuros a desenvolver que complementam o trabalho desta dissertação.

# ENQUADRAMENTO TEÓRICO

## 2.1 Logística

Atualmente, a definição conceitual de Logística pode diferir ligeiramente consoante a perspetiva e/ou área de aplicação (Carvalho, 2017, p. 25). O Council of Supply Chain Management Professionals, a maior organização que aborda a área da gestão de cadeias de abastecimento, define logística como «a parte da Cadeia de Abastecimento que é responsável por planear, implementar e controlar o eficiente e eficaz fluxo direto e inverso e as operações de armazenagem de bens, serviços e informação relacionada entre o ponto de origem e o ponto de consumo de forma a ir ao encontro dos requisitos/necessidades dos clientes» (CSCMP, 2013).

Uma gestão logística eficiente, não contribui para melhorar o produto final, no entanto contribui para uma redução de custos indiretos e um expetável aumento de satisfação por parte dos clientes, o que contribui para o sucesso e crescimento do negócio (Casper & Sundin, 2018). Como tal, desde o seu surgimento, a gestão logística tem se revelado cada vez mais um fator crítico de sucesso e de sustentabilidade das diversas organizações (Werner-Lewandowska & Kosacka-Olejnik, 2018).

### 2.1.1 Evolução do Conceito

A Logística ou Gestão Logística resulta da combinação de algumas áreas de influência como a área das tecnologias ou a área dos sistemas de informação, por exemplo, no entanto um dos principais impulsionadores do seu desenvolvimento e surgimento é a área militar. A necessidade constante de uma elevada organização tanto no abastecimento de bens, como no transporte, manutenção entre outros, obrigou ao desenvolvimento de uma área responsável por toda esta gestão de forma a garantir o sucesso de todas estas operações (Carvalho, 2017,

p. 23). Jomini (2018) refere-se à Logística militar como «a aplicação prática da arte de movimentar os exércitos».

A criação do conceito de Logística permitiu eliminar a fragmentação entre as diversas áreas e atividades acima mencionadas, como o transporte ou a manutenção, acarretando principalmente três benefícios: o incentivo à realização de *trade-offs* importantes que permitem a redução de custos numa perspetiva global, concentra estas atividades apenas em uma área de relevância elevada para os gestores de empresas, e por último, cria uma estrutura bem definida que contém as diversas áreas de controlo (Ballou, 2007).

Numa perspetiva mais atual, Mangan, et al. (2008) abordam a logística segundo a lógica dos 7 R's, na qual defendem o seu sucesso quando garantidos os seguintes fatores:

- Right product (Produto certo);
- Right way (Maneira certa);
- Right quantity (Quantidade certa);
- Right quality (Qualidade certa);
- Right place (Local certo);
- Right time (Hora certa);
- Right client (Cliente certo);
- Right cost (Custo certo).

O aparecimento do conceito de Supply Chain Management pode suscitar alguma confusão quando comparado com o conceito de Logística. Kain & Verma (2018) definem Supply Chain como o «sistema de organizações, pessoas, atividades, informação, e recursos envolvidos na movimentação de um produto ou serviço desde o fornecedor até ao cliente». A diferença do racional entre estes dois conceitos é explicada por Carvalho (2017) como sendo «praticamente nula» pois estas apenas diferem no nível de abrangência.(Boysen et al., 2015) Segundo o autor, o Supply Chain Management resulta do envolvimento do planeamento e gestão de todas as atividades de sourcing e procurement na gestão logística, observando-se assim a definição de Supply Chain Management como conceito mais abrangente no qual a gestão logística está inserida (Figura 2.1).

Atividades Fragmentadas - 1960

Integração das Diferentes Atividades - 1960 até 2000

2000 até Presente

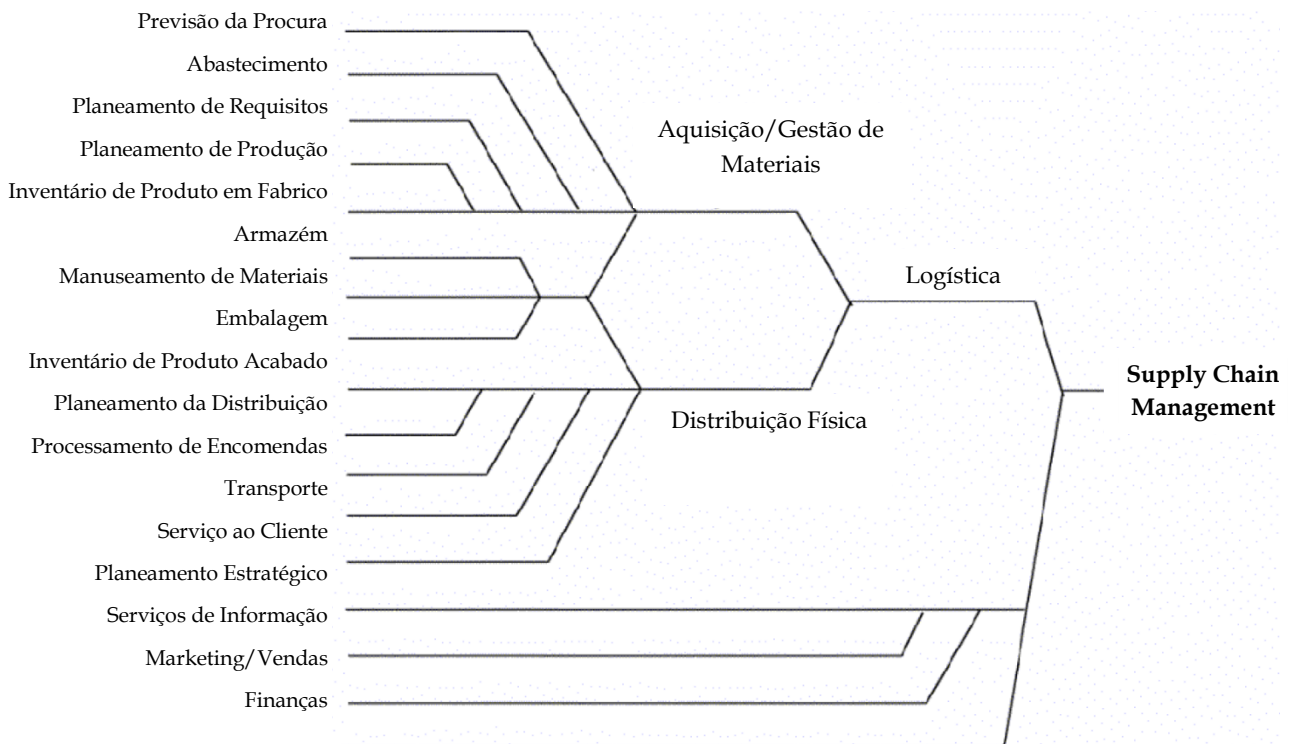


Figura 2.1 - Evolução do Conceito de Supply Chain Management

Adaptado de: Ballou (2007)

## 2.1.2 Logística Externa, Logística In-House e Logística Inversa

Num ambiente industrial, por exemplo, é comum dividir a gestão logística em dois grandes grupos: a logística *in-house* e a logística externa. Outra diferenciação que é comumente utilizada é a distinção entre logística direta e logística inversa.

A logística externa resulta do combinar de todas as atividades necessárias para garantir o abastecimento de produtos ou matérias ao processo ou fábrica em questão, sendo que a proveniência dos mesmos advém de fornecedores externos às instalações. Os processos Just-In-Time (JIT) são um exemplo de um processo de logística externa em que a peça em questão é entregue por um fornecedor externo diretamente à fábrica pouco tempo antes de esta ser utilizada no processo produtivo (Boysen et al., 2015).

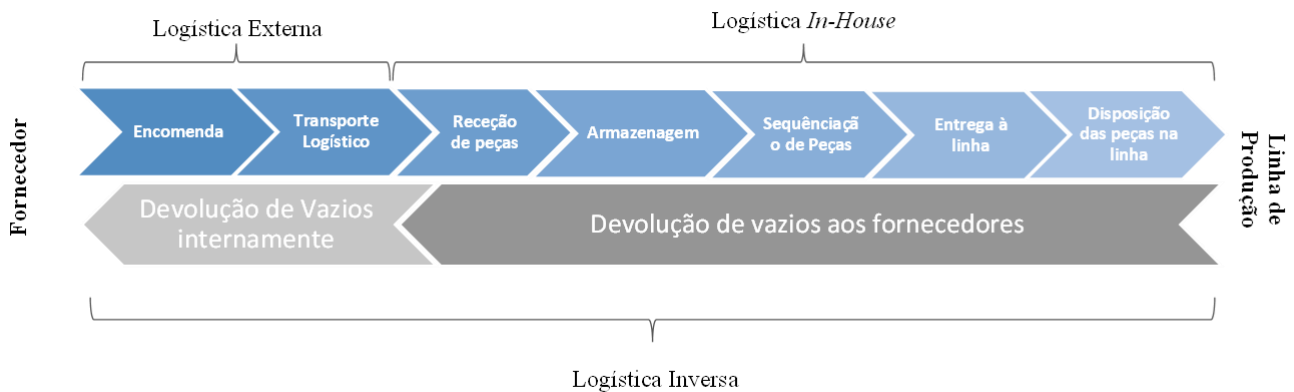
Numa lógica complementar, a logística In-House está compreendida entre duas fronteiras, sendo a primeira o momento em que uma peça ou produto é recebido nas

instalações e a segunda, o momento em que é disponibilizado na linha de produção/montagem (Boysen et al., 2015). O conceito de logística In-House pode se repartir em três grandes pilares, sendo um deles o transporte interno, o segundo a disposição das peças na linha de Produção e por último a armazenagem (Battini et al., 2013). Este último pilar pode consistir na disposição dos materiais/produtos num único armazém central ou em vários armazéns e até em pequenos locais situados em zonas estratégicas entre o armazém principal e a linha de produção (Battini et al., 2013).

O esforço constante para atingir o máximo de satisfação por parte dos clientes levou a introdução de um número maior de configurações possíveis para um determinado produto, aumentando conseqüentemente o número de peças necessárias para satisfazer todas as combinações possíveis. De forma espectacular, a complexidade da gestão logística In-House aumenta de forma considerável (Pil & Holweg, 2004). No entanto, a garantia do bom funcionamento de todo este processo logístico é de extrema importância pois um simples falha neste sistema poderá facilmente comprometer toda a operação restante e até implicar em deficiências na produção (Kilic & Durmusoglu, 2015).

O conceito de logística inversa é referente ao fluxo logístico contrário ao fluxo normal (direto), ou seja, o fluxo de bens e de informação desde o consumidor final até à origem do processo produtivo (figura 2.2). Uma vantagem possível deste processo pode consistir no reaproveitamento de produtos em fim de vida para matéria prima no entanto é importante notar que este processo normalmente representa uma complexidade superior ao processo direto e conseqüentemente custos superiores (Silva et al., 2013). O conjunto dos dois processos logísticos, direto e inverso, é denominado por *closed loop supply chain* (Govindan et al., 2015).

Este novo conceito acarreta benefícios notáveis na economia e sustentabilidade das empresas e na redução da pegada ambiental cumprindo com a responsabilidade social de cada organização. O seu princípio consiste na recuperação de peças/produtos em fim de vida provenientes do cliente final, com o objetivo de reciclar, reaproveitar, reconstruir ou simplesmente descartar de forma responsável e cuidada. Atualmente, a legislação tem evoluído bastante neste sentido, forçando as empresas a adotar a logística inversa, no entanto nem todos os países acompanharam esta tendência (Beiler et al., 2020).



**Figura 2.2** - Exemplo de um *Closed Loop Supply Chain*

Adaptado de: Boysen et al. (2015)

### 2.1.3 Eficiência e Custos Logísticos

Segundo Casper & Sundin (2018), a eficiência dos processos logísticos não se traduz numa melhoria do produto final, no entanto é um fator chave para determinar o sucesso ou insucesso do mesmo. Um processo, ou um conjunto de processos logísticos eficiente, para além de garantir a satisfação do cliente, normalmente traduz-se numa redução significativa dos custos indiretos. Dado à crescente tendência competitiva dos mercados atuais, tantos os fornecedores como os produtores de um determinado produto reúnem esforços no sentido de reduzirem os custos logísticos inerentes ao processo de forma a posicionarem o seu produto no mercado de uma forma competitiva com um preço de compra aliciante para o consumidor final (Makarova et al., 2017).

Dos custos logísticos fazem parte uma panóplia de custos associados, no entanto destacam-se principalmente os custos relativos ao serviço a clientes, transporte, armazenagem, informação, processamento de encomendas, tamanho dos lotes e posse de existências (Lambert et al., 1998). Certos autores como Gudehus & Kotzab (2010) distinguem os diferentes custos agrupando-os em uma de três categorias, denominadas de custos logísticos específicos, adicionais e administrativos sendo que nos custos logísticos específicos estão compreendidos os custos com transporte, movimentação, armazenagem e subcontratação. Dos custos logísticos adicionais fazem parte os custos resultantes de tarefas operativas adicionais como o embalamento, rotulagem, carga e descarga, controlo de qualidade e manuseamento, e por fim todos os custos associados à programação, gestão da qualidade e controlo fazem parte dos custos logísticos administrativos.

Um dos pilares fundamentais da eficiência logística é a tecnologia que ao longo dos anos se tem vindo a intensificar e a revelar como uma ferramenta indispensável à prática de uma boa gestão ao longo da cadeia de abastecimento. Uma das principais vantagens da aplicação da tecnologia consiste no eficaz fluxo de informação ao longo de toda a cadeia, integrando todos elementos, permitindo uma gestão de encomendas e de necessidades melhorada, assegurando assim a disponibilidade dos produtos e reduzindo a redundância ao longo da cadeia de abastecimento que por fim se traduz numa redução significativa dos custos (Kain & Verma, 2018).

## 2.2 A Evolução da Indústria - Indústria 4.0

A evolução tecnológica, as diferentes necessidades de produtos e bens e a competitividade crescente tem provocado constantes alterações na indústria desde o começo. Os acontecimentos mais marcantes no passado que provocaram fortes alterações e consequentemente melhorias na indústria, foram apelidados de Revoluções Industriais (figura 2.3). A revolução que atualmente estamos a experienciar é apresentada como a era da indústria 4.0, também conhecida pela quarta revolução industrial, que advém do culminar de diversas tecnologias atuais e da sua interligação direta através da *Internet of Things* (IoT) (Henao-Hernández et al., 2019).

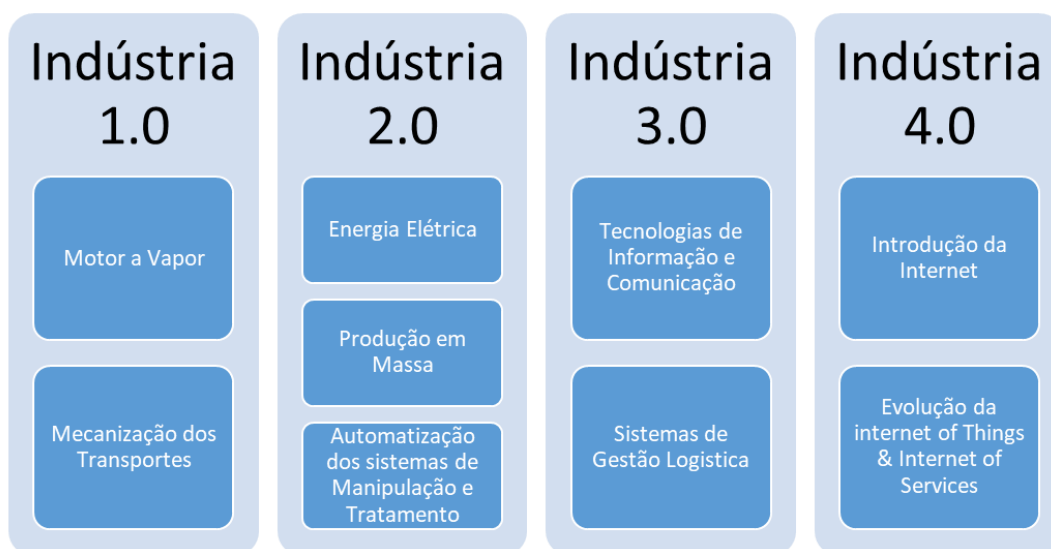


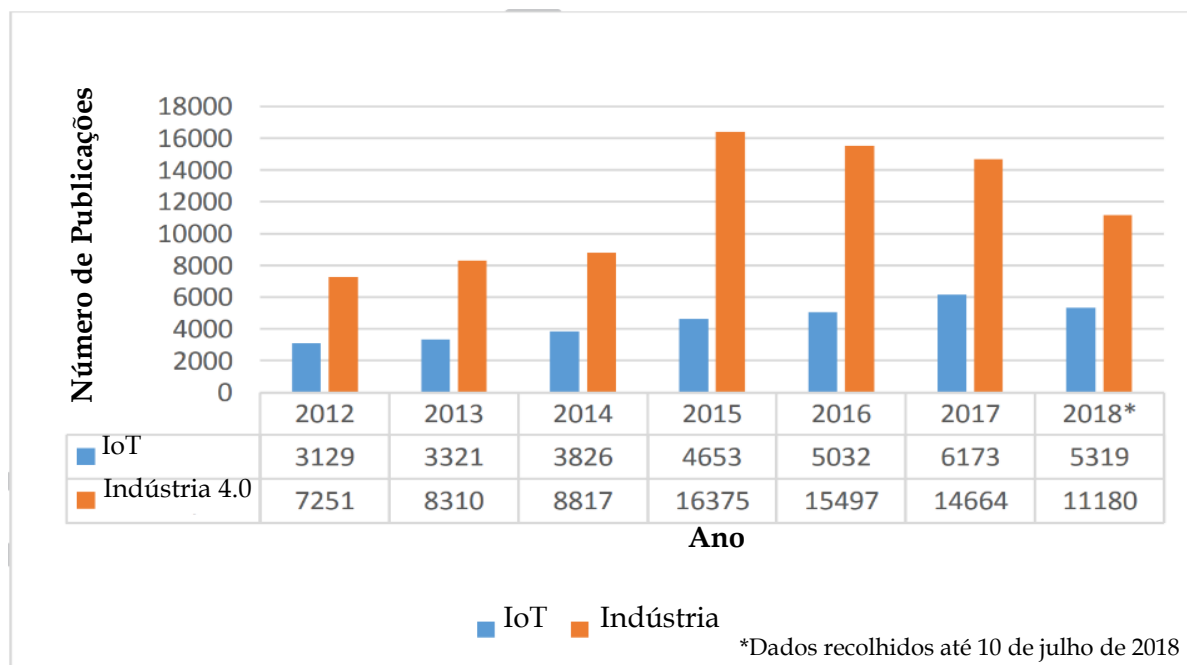
Figura 2.3 - Evolução da Indústria

Adaptado de Yavas & Ozkan-Ozen (2020)

Embora o termo de indústria 4.0 tenha surgido em 2011, o aparecimento de artigos a respeito deste tema, de forma significativa, surge em 2012, sendo que têm vindo a desenvolver-se estudos mais aprofundados nesta matéria desde então. Na figura 2.4 é possível observar a evolução do número de publicações relacionadas com o tema da indústria 4.0 nos últimos anos, o que de certa forma traduz evolução do conceito ao longo destes mesmos anos (Manavalan & Jayakrishna, 2019).

Uma particularidade desta revolução é o fato de, pela primeira vez, ter sido prevista numa primeira instância e não relatada apenas depois de começadas as suas implementações (Drath & Horch, 2014). Desta forma foi possível preparar bem esta mudança, e modelá-la de forma a permitir a sua maior eficiência, o que consequentemente irá resultar num ganho monetário a grande escala.

Apesar de já existir bastante informação a respeito desta revolução, ainda é bastante difícil explicitar este assunto de forma resumida devido à sua elevada complexidade tanto a nível de vertentes como de especificidade do próprio conteúdo. Muitos se deparam com esta dificuldade, inclusive o responsável de produção de uma grande construtora automóvel, Audi, que afirma que apesar de se tratar de um assunto da atualidade, não é capaz de explicar ao seu filho o que é que significa (Hermann et al., 2015).



**Figura 2.4** - Número de Publicações em IoT e Indústria 4.0

Adaptado de Manavalan & Jayakrishna (2019)

## 2.2.1 Veículos Autonomamente Guiados - AGV's

A nova revolução arrasta com ela novas necessidades, nomeadamente a nível do transporte de matérias e produtos. O fato do espaço disponível na linha de produção para receber material a aplicar nos produtos em fabrico ser reduzido obriga a constantes fornecimentos à linha de matéria ou subprodutos, o que resulta num volume de mão de obra elevado e mais relevante ainda, numa probabilidade de falha alta, provocando paragens não programadas na linha de produção (Qi et al., 2018).

Também o aumento da quantidade de produção obriga ao abandono dos métodos tradicionais de movimentação de produtos, e à adoção da tecnologia de ponta, os AGV's (Vavřík et al., 2017). Esta tecnologia é atualmente utilizada em várias instalações, sendo considerada a mais eficiente e adequada para este tipo de aplicações (Mehami et al., 2018). No entanto, apesar destas considerações, muitas organizações ainda se mostram relutantes a esta mudança, por acarretar um investimento inicial considerável e por representar uma mudança radical na cadeia de abastecimento (Cheong & Lee, 2018b).

Este sistema autónomo reduz significativamente o tempo dispensado nas operações de transporte, assim como o número de acidentes resultantes desta atividade. Por outro lado, acarreta uma maior flexibilidade de adaptação ao material a transportar, e lida com toda a informação de forma autónoma (Rocha et al., 2010). Espera-se que a operação levada a cabo por estes robots não necessite da intervenção humana exceto em casos pontuais de falha (Viharos & Németh, 2018).

Estes sistemas são vulgarmente comparados aos tradicionais conveyors, um sistema que até há relativamente pouco tempo era o mais eficiente da sua área de aplicação. Em 2010, ainda na fase primordial, foi conduzido um estudo que propôs a atualização de uma linha de abastecimento por conveyors para AGV's, algo bastante inovador para a altura. Com a tecnologia disponível na altura já foi possível notar aumentos significativos de produção, devido à elevada eficiência dos processos logísticos do chão de fábrica (Rocha et al., 2010).

Muitos estudos de caso surgiram depois do mencionado atrás, e com resultados ainda mais significativos. Estes já recorreram a esta tecnologia numa fase mais evoluída, em que a variedade de AGV's disponíveis era superior, permitindo a seleção de AGV's que melhor se adequavam a cada processo logístico. Existem três grandes grupos de AGV's, os single-load e os multi-load com capacidade de transporte de uma e várias unidades respetivamente. Por último e mais recentemente, surgiu também os hybrid-load AGV's que serão abordados num tópico mais à frente (Zhang et al., 2019).

Uma Etapa muito importante na adoção desta tecnologia é o planeamento das estações e do número de robots necessário. Para tal é importante ter em consideração um grande

conjunto de nuances como o número e as características físicas dos artigos a movimentar, a duração das baterias e o respetivo tempo de carga, as distâncias a percorrer, entre muitas outras. Uma consideração importante que às vezes não é tida em conta é o fato de os veículos circularem vazios em algumas instâncias. A desconsideração desta possibilidade leva a um valor estimado erróneo de robots necessários (Yan et al., 2018).

A tecnologia presente nos veículos autónomos de uso industrial abordados ainda está numa fase de aplicação primordial, pelo que se estima que virá a evoluir bastante dentro dos próximos anos. Um fator a ter em conta será a velocidade de operação e de deslocação dos robots. Ao reunir as condições necessárias, tanto de segurança, como de viabilidade operacional, seria possível utilizar velocidades mais elevadas, resultando consequentemente em tempos de entrega menores e uma redução do número de robots necessário (Rocha et al., 2010).

#### **2.2.1.1 Características técnicas de um AGV**

De um modo generalizado, um AGV pode ser analisado em dois conjuntos, o hardware que engloba a parte mecânica/elétrica e o Software, ao qual corresponde toda a programação necessária ao seu bom funcionamento. Do conjunto Hardware faz parte o motor, as baterias, os sensores, as antenas e todo o restante envolvente mecânico que permite ao AGV deslocar-se e efetuar as suas funções de *picking* e de *delivering*. A parte computacional, Software, é a parte responsável pela localização dos produtos/matérias a recolher, pela gestão da navegação e pela gestão logística autónoma. Com a evolução dos AGV's, o software destes veículos tem um papel fundamental pois para além das funções básicas já referidas, tem a capacidade de processar mais informações e de tomar mais decisões, baseadas em fatores como a capacidade das baterias de cada AGV, a sua distância, a sua necessidade de manutenção, entre outros.

Relativamente a navegação dentro de uma fábrica, os AGV's mais comumente utilizados são os *line-guided* por serem os menos dispendiosos de implementar. Este sistema utiliza um mecanismo de orientação instalado nas próprias instalações, como uma rede de linhas magnética capazes de ser lidas pelo robot, ou até um carril (Lee & Yang, 2012). No entanto este sistema não tem possibilidade de fazer atalhos, cingindo-se apenas à rede disponível de rotas e também é de certa forma rígido à alteração de layout, pois implica sempre um investimento e um esforço físico. Assim surgem os AGV's orientados por imagem, ou de navegação livre, que se baseiam nas imagens recolhidas por uma câmara, permitindo assim a deteção de

obstáculos na sua rota. Estes AGV's não estão assim limitados a uma certa rota, pois desta forma podem circular com alguma liberdade pelo chão de fábrica (Cheong & Lee, 2018).

Como forma de localização dos artigos a recolher, estes equipamentos utilizam por norma a tecnologia RFID – Identificação por rádio frequência. Esta tecnologia é baseada num conjunto de etiquetas eletrónicas e em antenas permitindo emitir e receber ondas rádio, facultando informação sobre a localização precisa e em tempo real das matérias e produtos, possibilitando ao robot o cálculo da rota mais eficiente e a recolha eficiente dos artigos (Lu et al., 2017, 2018).

### **2.2.1.2 Software de Gestão de AGV's – Planeamento de Rotas**

Como já foi referido, o principal valor acrescentado que um AGV acarreta advém do fato de não necessitar da intervenção humana, assim o planeamento e o processo de tomada de decisão autónomo têm um papel fundamental. Neste campo não existe nenhum modelo ideal de programação, mas sim modelos mais adequados a cada situação (Viharos & Németh, 2018).

O planeamento das rotas a percorrer depende do tipo de veículo autónomo e das suas heurísticas/ algoritmos de cálculo. Um exemplo mais básico pode ser AGV single-load que se baseia numa heurística do caminho mais curto a percorrer no processo de picking de um artigo. No extremo oposto existem sistemas com modelos de programação e tecnologia fortemente avançada, como mixed-integer linear programming ou ant colony algorithms, que não serão abordados nesta revisão (Viharos & Németh, 2018).

Os algoritmos mais avançados de planeamento de rotas têm a facilidade de resolver conflitos e problemas de congestionamento e de capacidade de forma a adaptar-se às diferentes necessidades. Por norma, quanto maior o poder computacional e mais desenvolvido o modelo de programação, mais independente e mais eficiente será o robot (Yang et al., 2018).

Uma técnica bastante utilizada para a seleção e a construção de um bom modelo para um processo produtivo em específico é o recurso à ferramentas de simulação que permitem prever e comparar resultados de vários modelos possíveis de planeamento (Chawla et al., 2018), (Neradilova & Fedorko, 2017). Esta ferramenta é também fortemente utilizada noutros setores onde consta a presença de AGV's (Kesen & Baykoç, 2007).

### **2.2.1.3 AGV's aplicados a Short-Runs**

Nas linhas de produção modernas existe um desafio crescente na logística devido à variedade de artigos a fornecer. A indústria automóvel é um forte exemplo devido às inúmeras configurações disponíveis para um automóvel novo, fomentando assim a diferença entre os

processos, reduzindo a semelhança e a periodicidade dos mesmos, conseqüentemente diminuindo a standardização. Estes processos que se observam um número reduzido de vezes são denominados por Short-Runs.

A existência destes casos vem complicar os modelos de planeamento anteriormente mencionados pois vai aumentar drasticamente as diferenças entre artigos a transportar, como as dimensões, o tamanho, entre outros, no entanto, o uso de AGV's como sistema de abastecimento e de transporte de matérias continua a ser considerado o método mais eficiente para este cenário também. Existem modelos de programação avançados que melhor se adequam a este caso, e até a casos em que a própria linha de produção está em constante alteração (Heger & Voß, 2019).

Apesar de todas as possibilidades apresentadas, existe ainda uma solução mais técnica que pode ser tomada numa produção deste género, a utilização de AGV's do tipo hybrid-load. Esta opção consiste na adoção de uma *pool* de equipamentos do tipo single-load e multi-load, e seguidamente da atribuição das tarefas de recolha de forma eficiente a cada robot. Esta atribuição é feita tendo em conta que os multi-load AGV's podem transportar vários artigos de pequena dimensão, enquanto os primeiros mencionados apenas podem transportar um artigo, levando assim a uma atribuição de tarefas aos veículos com base nas suas dimensões. Este método por norma traz melhores resultados do que qualquer uma das outras quando utilizadas em exclusivo (Zhang et al., 2019).

#### **2.2.1.4 Baterias e Gestão de Carga**

Os AGV's atuais utilizam maioritariamente baterias de iões de lítio como fonte de energia devido à sua alta energia e densidade de carga, ao seu longo ciclo de vida e à sua baixa taxa de descarga. A principal limitação desta solução são os métodos existentes de reposição de carga, fomentando o desenvolvimento de estudos relacionados com novos métodos de carga mais eficientes, assim como métodos de gestão de energia capazes de minimizar o tempo de inatividade destes equipamentos (Lin et al., 2019). Um bom sistema de gestão de carga aplicado a uma frota de AGV's viabiliza o funcionamento correto de um determinado processo, com um número mínimo de equipamentos, reduzindo o investimento em veículos e em manutenção e gestão dos mesmos (Kabir & Suzuki, 2018).

Os principais métodos de recarga de bateria utilizados na indústria atualmente, são apresentados por De Ryck, Versteyhe & Debrouwere (2020) como:

- Método de carga por oportunidade, no qual são aproveitados os tempos de inatividade do equipamento, como tempos de espera, para restabelecer alguma energia às baterias;

- Método automático de carga, em que o equipamento trabalha dentro de um determinado intervalo de carga disponível, dirigindo-se à estação de carga a partir do momento em que a sua carga é inferior a um valor mínimo estabelecido;
- Método da carga combinado que, tal como o nome indica, resulta da combinação dos dois métodos referidos anteriormente.

Ainda relativamente aos métodos de carga, existem dois procedimentos diferentes que são bastante utilizados com os métodos acima referidos. O primeiro consiste na substituição das baterias, um processo que pode ser feito de forma manual ou automática. O segundo consiste num processo de carga automático em que a carga é transmitida à bateria sem esta ser retirada do equipamento. A atribuição das estações de carga aos AGV's pode ser feita segundo uma panóplia de heurísticas possíveis, no entanto as mais comuns são as apresentadas a seguir (De Ryck et al., 2020):

- A heurística da estação mais próxima;
- A hipótese da primeira estação de carga inserida na rota atual do equipamento;
- O modelo da estação de carga mais longe, inserida na rota atribuída, que é possível alcançar com a carga do equipamento;
- A heurística do mínimo tempo perdido, baseado no tempo de deslocação até à estação e o possível tempo de espera em fila.

Relativamente ao tempo de carregamento e à definição dos limites mínimos segundo os quais os AGV's se dirigem às estações de carga, é necessário ter em conta a relação entre a carga da bateria e o tempo necessário para atingir uma determinada percentagem dessa mesma carga pois este processo de carga é definido como um processo não linear (Zhan et al., 2019). Neste caso, a taxa de carga é inversamente proporcional à percentagem de energia acumulada (Kabir & Suzuki, 2018). Desta forma, e tal como indica a figura 2.5, quanto mais carregada a bateria estiver, mais tempo é necessário para aumentar um por cento da sua energia armazenada. É importante ter em conta que apesar de o total de tempo que o robot está inutilizado ser inferior com a adoção deste método, o número de recargas irá aumentar substancialmente, o que pode levar a uma redução da vida útil das baterias ou até das estações de carga (Zhan et al., 2019).

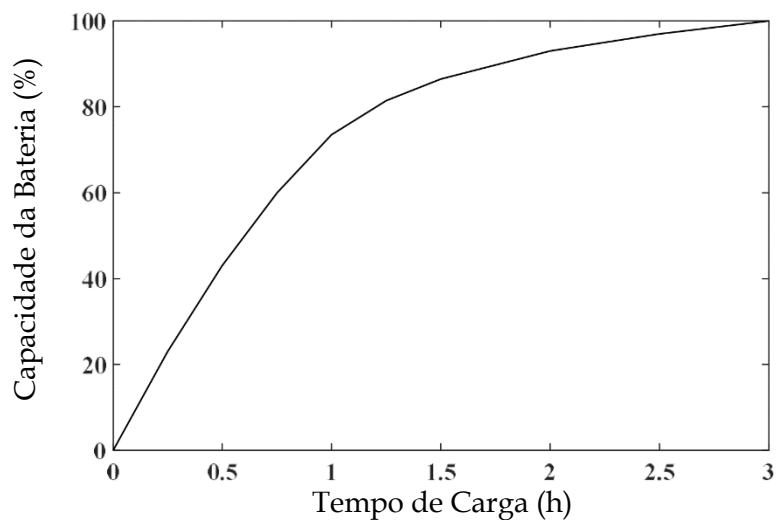


Figura 2.5 - Perfil de Carga Típico de uma Bateria de íons de Lítio

Adaptado de Zhan et al. (2019)

## 2.3 Simulação e o Conceito de Digital Twin

A elevada competição e a forte pressão para garantir o máximo de eficiência, enquanto o ciclo de vida dos produtos se torna cada vez mais reduzido, obriga a um forte dinamismo e capacidade de adaptação constante por parte das organizações. A introdução da ferramenta de simulação no planeamento e projeto de processos industriais constitui assim um fator chave para as empresas que lutam constantemente para se manterem ativas no mercado. Esta ferramenta possibilita desenvolver e testar novos conceitos e processos e consequentemente recolher toda a informação associada sem perturbar o sistema real, resultando assim numa poupança significativa com possíveis testes físicos necessários ou até com falhas resultantes de mau planeamento, e ainda numa aceleração do projeto e da sua implementação (Mourtzis et al., 2014).

Através da transição de um sistema real para um modelo simulado é possível testar e confirmar um conjunto ilimitado de configurações, antes de as implementar no ambiente industrial real, realçando assim todo um conjunto de detalhes e informações cruciais que, sem o auxílio desta ferramenta, dificilmente seriam analisadas ou detetadas antes da implementação do projeto (Mourtzis et al., 2014). Alguns autores defendem que o aparecimento e o bom uso da simulação permitiram atingir um nível de produção completamente novo (Rosen et al., 2015).

À semelhança do observado no tópico relativo à indústria 4.0, não existe uma data específica para a introdução da ferramenta de simulação na indústria, no entanto, através da análise do número de publicações de artigos relacionados com o tema, é possível extrair uma noção da sua evolução ao longo do tempo. Na figura 2.6 podemos observar que até à data de 1970 o número de estudos relacionados com simulação era praticamente nulo. A partir dessa data, o número de artigos tem vindo sucessivamente a aumentar de forma considerável.

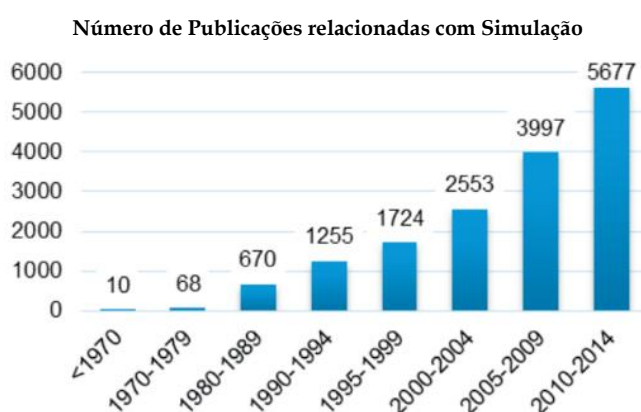


Figura 2.6 - Evolução do Número de Publicações Relacionadas Com a Tecnologia da Simulação

Adaptado de: Mourtzis et al. (2014)

É importante ter em conta que dada a elevada complexidade dos sistemas reais atuais, frequentemente é necessário proceder a simplificações e pressupostos no momento da modelação da simulação. Embora seja feito o esforço para estas aproximações não se distanciarem de forma significativa da realidade, é sempre importante ter em conta estes fatores no momento da implementação no ambiente de produção real. Nos casos em que a simulação é desenhada com o intuito de projetar um novo sistema, o desafio, por norma, revela-se superior dado a limitação de acesso a dados reais, obrigando muitas vezes à elaboração de pressupostos.

Nos primórdios do desenvolvimento e integração dos softwares de simulação na indústria, a principal função desta tecnologia era responder a questões específicas relacionadas com engenharia ou design. Atualmente, esta ferramenta é considerada um pilar do processo de tomada de decisão de sistemas bastante complexos (Rosen et al., 2015). Dada o valor que a simulação representa e as provas de sucesso que tem dado na indústria, que existe um esforço constante para evoluir e melhorar a tecnologia existente. Neste âmbito surge um novo conceito, o conceito de Digital Twin (figura 2.7).

Este novo termo foi pela primeira vez trazido a público pela NASA, a qual se referia ao conceito de Digital Twin como um sistema que utiliza os melhores modelos físicos disponíveis, a informação mais recente de sensores, dados históricos, entre outros, com o objetivo de espelhar o comportamento do seu gêmeo real. Este conceito foi adotado e adaptado pela indústria em geral com o objetivo de permitir a reprodução digital de todo o ciclo de vida de um produto, apresentando se, tal como o nome indica, como um gêmeo do processo ou sistema real com a capacidade de reproduzir resultados praticamente iguais aos que se esperaria no mundo real (Rosen et al., 2015).

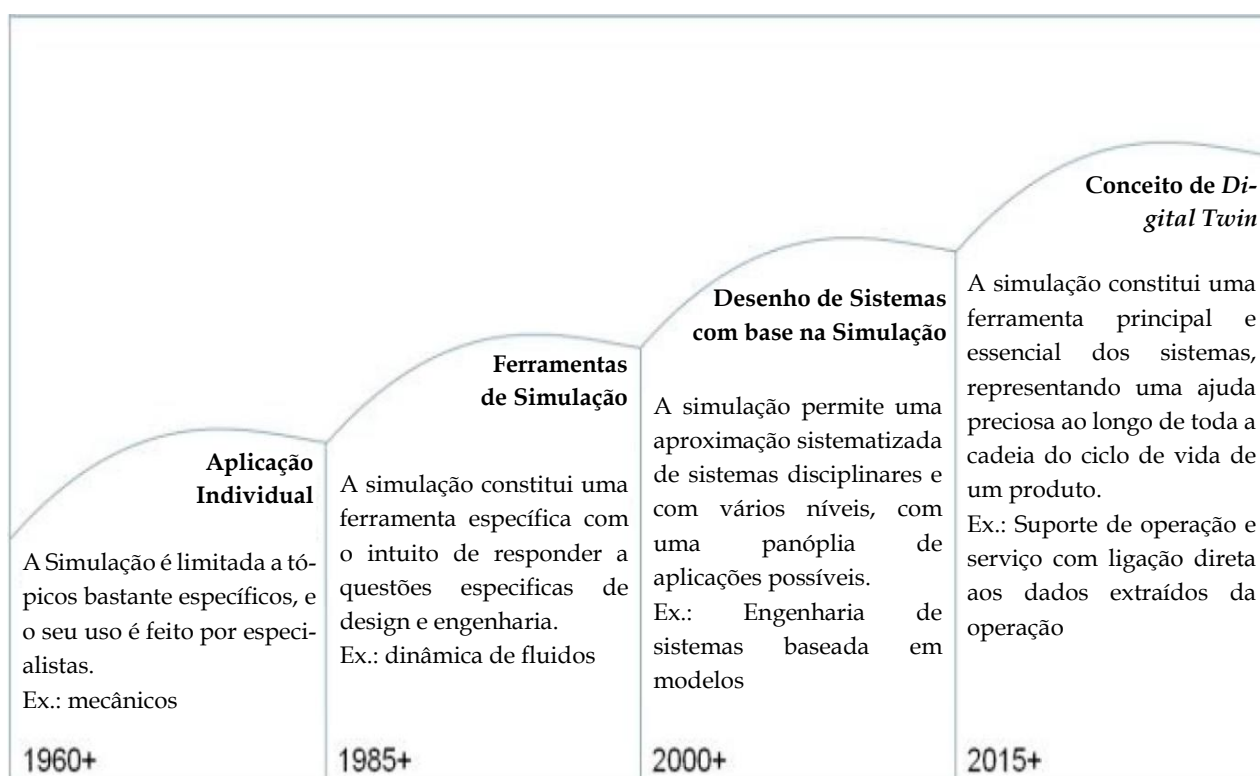


Figura 2.7 - A Evolução da Ferramenta Simulação na Indústria

Adaptado de: Rosen et al. (2015)



## ESTUDO DE CASO

Neste capítulo é apresentado o modelo de abastecimento de peças atualmente utilizado para o processo em estudo. São descritos os fluxos de peças e de suportes ao longo do processo e também as operações que fazem parte desta cadeia. Por último, é descrita a introdução dos AGV's nos processos de abastecimento de linha, onde são explicitados os dois processos em análise compatíveis com esta implementação.

### 3.1 Descrição do Processo de Abastecimento Interno

O processo interno de abastecimento de peças tem início no cais de descarga de caminhões, no armazém principal, onde são majoritariamente armazenados contentores de peças, contentores vazios e peças novas em fase de teste. Também neste local são efetuadas operações de decantação, em que as peças são movimentadas para um contentor diferente caso o primeiro não cumpra os requisitos da fábrica, e também operações de inspeção de contentores com o objetivo de garantir o bom estado dos mesmos.

Quando os contentores de peças estão prontos para ser abastecidos, estes ficam armazenados em áreas específicas, a aguardar que surja uma ordem de transporte de um determinado contentor para um supermercado ou para uma estação da linha de montagem que necessite daquele lote de peças. Após as operações levadas a cabo nos supermercados pelos respectivos colaboradores, as peças são então transportadas para a linha de montagem em racks móveis e os contentores que, entretanto, ficam vazios, são levados de volta para a zona de contentores vazios do armazém principal.

Na linha de montagem as peças podem provir de três formas diferentes: i) podem ser pedidas aos supermercados, ii) podem ser pedidas diretamente ao armazém principal, tal como referido anteriormente, iii) podem ser abastecidas por processos Just-In-Time, conforme

o estipulado para cada processo específico. No entanto, esta dissertação apenas irá abordar os processos de transporte de peças dos supermercados para a linha de montagem. Estes processos são sincronizados de forma que o abastecimento de peças flua, verificando-se a disponibilidade de *racks* de peças e de motas de transporte quando necessário, sem comprometer assim o funcionamento da linha de montagem.

### 3.1.1 Supermercados

Os supermercados são zonas delimitadas, localizadas dentro da área da montagem de forma a assegurar a sua proximidade com a linha de montagem (figura 3.1). Nestes locais, um operador é responsável por efetuar ciclicamente os processos de sequência ou de decantação consoante a família atribuída a este operador, recebendo assim as *racks* vazias provenientes da linha de montagem e devolvendo estas mesmas *racks* cheias com peças prontas a ser montadas.



Um processo de sequência consiste na disposição sequencial das peças de uma determinada família de peças numa *rack* amovível, com alvéolos numerados por ordem crescente. Para tal, um operador, após recolher uma *rack* vazia deixada por um transportador, recorre à ajuda de uma *picklist* para recolher e colocar nos alvéolos corretos as peças necessárias para montar a próxima sequência de veículos. Consoante as famílias de peças, os *racks* podem ter diferentes capacidades, no entanto as sequências mais comuns utilizam *racks* com capacidade, para 12, 24 ou 48 peças. A figura 3.2 ilustra um exemplo de uma *rack* com uma dimensão para 12 peças.



**Figura 3.2** - Exemplo de uma *rack* de sequência numerada de 1 a 12

Este processo apenas exige que os colaboradores da linha de montagem recolham as peças da *rack* pela ordem correta para que a montagem seja efetuada com a peça ou peças corretas para aquela configuração de veículo. Desta forma, não é necessário dispor todos os contentores de peças na linha e ainda evita que os operadores da linha de montagem tenham a necessidade de selecionar as peças corretas dentro do tempo de ciclo produtivo, sujeitos a perdas de tempo e a falhas.

### **3.1.2 Linha de Montagem**

A linha de montagem dispõe de várias estações sequenciais, caracterizando-se cada uma delas por um determinado conjunto de processos que podem ser realizados por um ou mais operadores dentro de um intervalo de tempo definido, o tempo de ciclo. Nesta linha de montagem o progresso dos veículos em fase fabríco pode ser contínuo, através do andamento sem interrupção do transportador dos veículos, ou Start & Stop, no caso das estações onde o trabalho tem de ser realizado com o veículo imobilizado.

Os processos realizados nesta zona da fábrica consistem maioritariamente em operações de montagem de peças, no entanto também são realizados processos de garantia de qualidade, abastecimento de fluídos, afinações, configurações, entre outros. Para os processos de montagem, é necessário que seja constantemente garantida a disponibilidade das referências de peças a aplicar em cada estação, para que o funcionamento da linha não seja atrasado nem interrompido.

A disponibilidade das peças nas estações de montagem é assegurada de acordo com dois métodos. No primeiro método são disponibilizadas na estação de montagem todas as

referências de peças que poderão ser necessárias, competindo assim aos operadores, a responsabilidade de selecionar a peça ou as peças corretas a montar em cada veículo. Este modelo é eficaz quando existem poucas referências numa determinada família de peças. No entanto, normalmente consome mais espaço na estação de montagem e eleva a carga de esforço dos operadores de linha, conferindo-lhes a responsabilidade de seleção das peças adequadas.

O segundo método de abastecimento de peças à linha advém do processo de sequência já mencionado previamente. Desta forma, as peças são disponibilizadas em *racks* que contém várias referências de peça de uma família. Este método permite reduzir significativamente o espaço ocupado na estação e por outro lado, reduz a carga de esforço de um operador e a probabilidade de montar uma referência de peça incorreta. No entanto, de uma forma geral, este processo requer uma maior periodicidade na manutenção do stock de peças na linha, além de requerer um processo extra, o processo de sequência. Este método requer ainda a garantia do sincronismo entre as duas operações, para assegurar a constante disponibilidade de peças no momento da sua aplicação no veículo.

## **3.2 Introdução de AGV's no Abastecimento da Linha**

Com este estudo pretende-se substituir o atual método manual de transporte de peças entre os supermercados e a linha de montagem, por um processo totalmente automatizado baseado no uso de equipamentos autónomos de transporte ou AGV's. Desta forma é possível reduzir o esforço manual envolvido e garantir, de forma automática, o sincronismo dos abastecimentos com a progressão da linha de montagem, assegurando a continuidade da operação.

Adicionalmente, os AGV's têm a possibilidade de serem introduzidos no processo de sequência dentro do supermercado, denominando-se este processo por sequenciação com assistência de AGV. Esta implementação permite reduzir o tempo de ciclo do processo de sequência, no entanto, requer a utilização de mais AGV's para assegurar o abastecimento correto da linha de montagem.

## **3.3 Síntese do Capítulo**

O fluxo de peças na operação em estudo, tem início no armazém principal, no cais de descarga dos camiões. Aqui, as peças são descarregadas e armazenadas nas *racks* do armazém

e posteriormente, quando solicitado, são fornecidas à zona de produção da fábrica, possibilitando o abastecimento direto da linha de montagem, ou para repor o stock dos supermercados, onde é realizado o processo de sequência.

O processo de sequência consiste na seleção e disposição das diferentes referências de peças numa *rack* de sequência, de forma ordenada e de acordo as necessidades de produção, com o objetivo de disponibilizar a peça correta para cada veículo que percorre a linha de montagem. Desta forma, o operador da linha de montagem apenas necessita de retirar as peças da *rack* de sequência de forma ordenada, sem necessitar de verificar as referências que cada veículo necessita.

A introdução de AGV's nesta operação, possibilita a redução da mão de obra envolvida e o aumento da consistência dos tempos de ciclo, garantindo o sincronismo das etapas da cadeia de abastecimento. Adicionalmente, os AGV's podem ainda auxiliar o processo de sequência, assegurando o transporte da *rack* dentro do supermercado. Posteriormente na análise de dados, vão ser comparados os dois métodos de sequenciação, o tradicional feito de forma manual e o processo auxiliado por AGV, denominando-se respetivamente por variante 1 e variante 2.

A vantagem que a variante 2 apresenta, prende-se com a eliminação da necessidade de o operador empurrar a *rack* de sequência, permitindo reduzir assim a carga de esforço física envolvida e também o tempo de ciclo do processo. Por outro lado, este método requer uma maior ocupação relativa dos AGV's, o que resulta conseqüentemente na necessidade de adquirir mais unidades de AGV's. Outra preocupação é o facto de apenas existir um ponto de descarga/carga, situado na linha de montagem, que pode conter um ponto de recarga de baterias por oportunidade, visto que no supermercado não é viável. Tal facto dificulta a utilização deste processo de recarga de baterias.



# CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA - DIGITAL TWIN

O estudo realizado e apresentado neste capítulo tem como finalidade dimensionar uma operação de sequência e de abastecimento automático de uma linha de montagem, com o objetivo de determinar o número de equipamentos necessários, o número de estações de carga e os melhores parâmetros de definição de limites de carga que possibilitam a utilização eficiente dos recursos em estudo.

## 4.1 Modelo Conceptual

O modelo construído irá permitir analisar o sucesso ou insucesso de um cenário, com base na disponibilidade dos componentes nas estações de produção no momento em que são necessárias. Quando o número de peças disponíveis na estação é reduzido, é emitido um alerta de poucas peças, no entanto, caso as peças se esgotem numa determinada estação, o cenário é suspenso e reprovado. Este indicador constitui uma variável de estado do modelo.

O processo em estudo resulta da interação de duas operações distintas, o processo de sequência de peças e o processo de montagem na linha de produção. Contrariamente ao processo atual, explicitado no capítulo anterior, pretende-se que todos os transportes efetuados neste fluxo sejam efetuados de AGV, obrigando a alterações no processo de sequência e de abastecimento de linha de produção que atualmente decorre.

O novo processo que se pretende implementar, tem um funcionamento cíclico, operando de forma contínua ao longo do dia, todos os dias do ano. Neste novo modelo, uma *rack* que termine o circuito do processo de sequência realizado no supermercado, aguarda que um AGV

seja atribuído e que faça a recolha da *rack* para a transportar para a estação de montagem destinada. Neste local a *rack* é descarregada e o AGV fica disponível para realizar outras tarefas. No momento em que a *rack* fica vazia, um AGV é novamente solicitado para realizar o transporte desta *rack* para o supermercado. Esta nova sequência de atividades está representada na figura 4.1, num diagrama de fluxo do processo.

### 4.1.1 Limitações e Pressupostos do Modelo

Embora o modelo de simulação criado reproduza o ambiente produtivo em estudo de forma próxima da realidade, existem certas dificuldades em replicar alguns processos ou comportamentos por meios matemáticos ou por meio da própria linguagem usada na simulação. Para uma correta análise de cenários e posterior tomada de decisão, é fulcral ter bem identificadas as limitações do modelo simulado.

No modelo em estudo, um dos pressupostos assumidos é a produtividade idêntica dentro de cada família de recursos. Um exemplo é o facto de todos os operadores se comportarem da mesma forma, com a mesma performance, o que não é concordante com a realidade Industrial, pois, para além de se diferenciarem fisicamente, também o fator cansaço influencia a produção ao longo do turno. Estas divergências podem levar a um subdimensionamento pelo facto de não retratarem possíveis dessincronizações ou por se assumir que um determinado posto de trabalho tem uma eficiência que na realidade pode ser inferior.

Por outra via, também os AGV's são retratados de forma homogénea, não tendo em conta o fator de falha e de desgaste mecânico, algo que com o uso continuado vai afetando a performance de cada equipamento e que pode levar à inutilização pontual dos AGV's. No caso das baterias, a degradação tem um grande peso no tempo que cada AGV despende em carga, o que deveria afetar o tempo de carga, no entanto este fator também não é tido em conta.

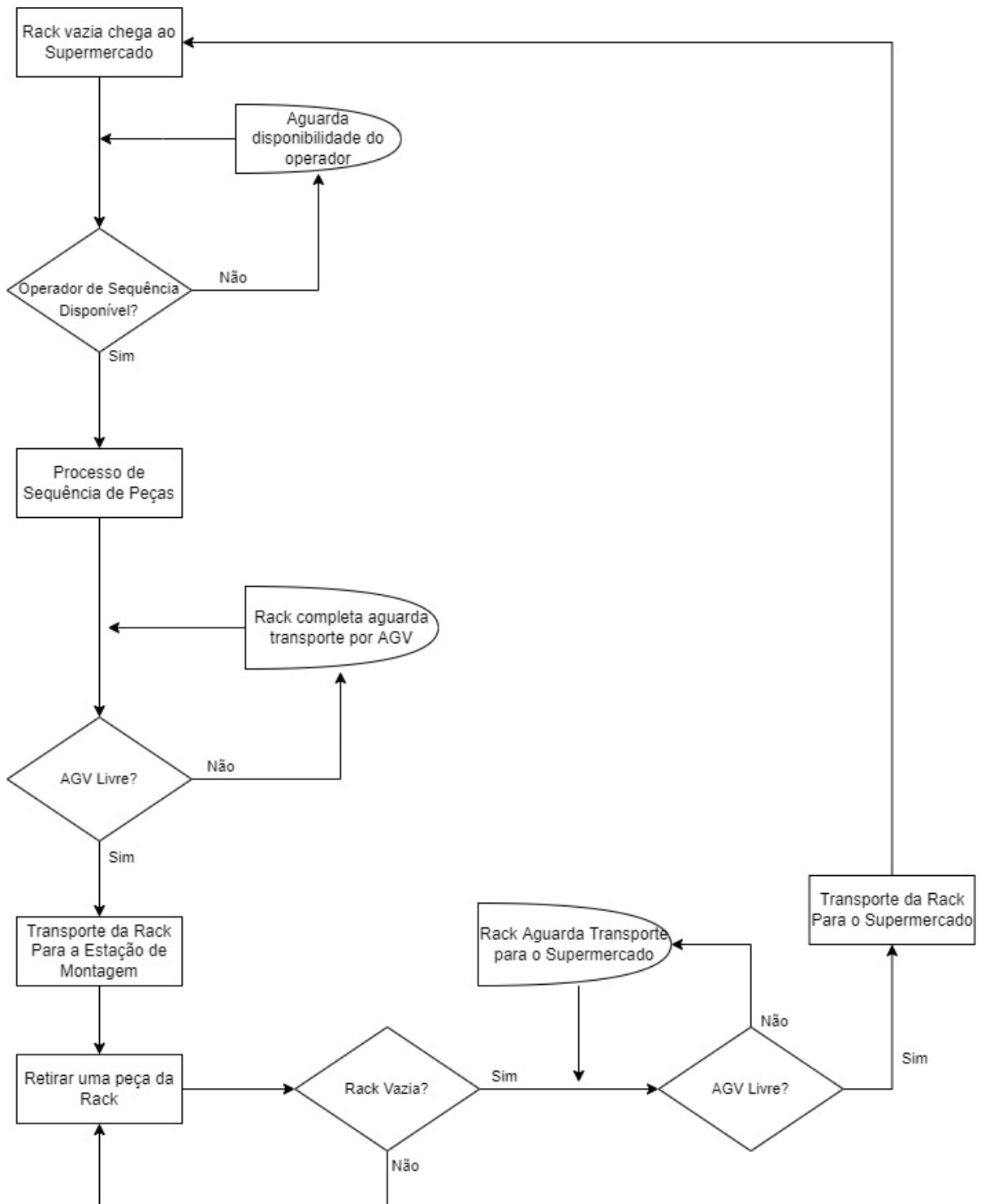


Figura 4.1 - Diagrama do Fluxo do Processo

Relativamente ao método de recarga das baterias no modelo de simulação, a percentagem de energia das baterias aumenta de forma uniforme. No entanto, na prática, este processo descrito por uma curva que, em baixas percentagens tem uma taxa de transferência de energia maior do que quando a bateria está mais próxima da sua capacidade máxima. Este fator pode influenciar o tempo de carga de um AGV, caso este não receba uma carga integral. Também a descarga das baterias, na realidade, é influenciada pelo tipo de pavimento, inclinação, ou peso que os AGV's transportam, o que no modelo é definido de forma simplificado, assumindo um peso constante para todas as *racks*.

Além destes fatores mencionados, existe um conjunto de acontecimentos relacionados com erros ou falhas, como um mau acoplamento de um AGV com uma *rack*, ou um erro de sequenciação ou montagem por parte de um operador, que são desconsiderados nestes cenários. Outro segmento que não é tido em conta são as possíveis dificuldades que podem surgir no trajeto dos AGV's, que são frequentes num ambiente dinâmico de produção, levando a atrasos e até bloqueio dos veículos.

## **4.2 Especificações do Modelo**

O modelo de simulação construído reflete quatro processos de sequência, realizados em dois supermercados e respetivas estações da linha de montagem, onde os artigos sequenciados são montados nos automóveis. Este modelo foi utilizado para o dimensionamento destes processos, tendo em conta duas variantes de sequenciação e também permitiu o estudo de parâmetros de carga de baterias dos AGV's para alcançar uma gestão eficiente de energia dos AGV's.

### **4.2.1 Tratamento de Inputs**

A recolha e o tratamento de dados necessários para gerar os inputs do modelo construído revelou-se um processo relativamente complexo. Foi necessário considerar um grande e diversificado volume de informação e posteriormente processá-la de forma a condensá-la numa única listagem, a qual continha toda a informação da composição de cada automóvel que percorria a linha de montagem, assim como o instante temporal a que este surgia no sistema.

A primeira etapa foi a recolha do histórico de produção que continha a informação de todas as referências de peças que foram montadas em cada veículo que foi produzido,

identificadas por categoria de peça, e também o momento em que foram sequenciadas nos supermercados. Foram considerados cerca de 10.000 veículos no histórico de produção.

A análise desta informação passou inicialmente por selecionar apenas as famílias que eram objeto do estudo e determinar o número de variantes possíveis para cada categoria de peças. Seguidamente foi determinada a frequência com que cada referência era utilizada relativamente às restantes da mesma família. A título de exemplo, considera-se a família das cablagens na tabela 4.1.

**Tabela 4.1** - Combinações Possíveis da Família Cablagens

<b>Combinação</b>	<b>Referência</b>	<b>Freq. Relativa</b>
Cablagem_1	A	8,6%
Cablagem_2	B	7,7%
Cablagem_3	C	10,9%
Cablagem_4	D	3,4%
Cablagem_5	E	17,0%
Cablagem_6	F	1,7%
Cablagem_7	G	0,7%
Cablagem_8	H	0,8%
Cablagem_9	I	0,9%
Cablagem_10	J	25,2%
Cablagem_11	K	5,1%
Cablagem_12	L	2,1%
Cablagem_13	M	0,1%
Cablagem_14	N	0,4%
Cablagem_15	O	5,9%
Cablagem_16	P	0,5%
Cablagem_17	R	3,5%
Cablagem_18	S	5,1%
Cablagem_19	T	0,1%
Cablagem_20	U	0,2%

Certas famílias de peças tinham a particularidade de equiparem os automóveis com mais do que uma referência. Nesses casos foram analisadas todas as combinações utilizadas e determinada a frequência relativa com base no número de observações de cada combinação, no histórico de produção em análise. Como exemplo, é considerada a família dos tubos na tabela 4.2.

**Tabela 4.2 - Combinações Possíveis da Família de Tubos**

Combinação	Referências	Freq. Relativa
Tubos_1	AAA ; BBB ; CCC	0,30%
Tubos_2	DDD ; EEE ; CCC	31,90%
Tubos_3	FFF ; GGG	15,10%
Tubos_4	HHH ; III ; CCC	12,40%
Tubos_5	JJJ ; KKK ; LLL	2,50%
Tubos_6	DDD ; MMM ; CCC	12,10%
Tubos_7	FFF ; NNN	1,50%
Tubos_8	AAA ; MMM ; CCC	9,90%
Tubos_9	OOO ; PPP ; LLL	0,40%
Tubos_10	DDD ; EEE ; QQQ	2,80%
Tubos_11	AAA ; RRR ; CCC	3,80%
Tubos_12	DDD ; MMM ; QQQ	0,60%
Tubos_13	AAA ; MMM ; QQQ	0,30%
Tubos_14	JJJ ; SSS ; LLL	4,50%
Tubos_15	AAA ; RRR ; QQQ	0,20%
Tubos_16	HHH ; III ; QQQ	1,40%
Tubos_17	TTT ; UUU	0,20%
Tubos_18	VVV ; WWW	0,20%

De seguida, e com base nas frequências relativas determinadas, foi gerada uma listagem por cada família de peças, com a referência, ou conjunto de referências a ser sequenciada em cada momento de simulação. Por último, todas as listagens foram combinadas numa única, representando assim a composição de cada automóvel que percorre a linha de montagem num determinado momento. A tabela 4.3 é um exemplo de uma listagem de Input do modelo.

## 4.2.2 Outputs

Um dos principais indicadores de sucesso de um cenário neste modelo é a disponibilidade dos componentes nas estações de produção no momento em que são necessárias. Para que estes casos não passem por detetar, foi criado um sistema de alertas que interrompe a simulação e notifica cada vez que esta situação ocorre. Para um maior controlo e noção da proximidade de ocorrência destas situações, foi também adicionado um alerta que notifica sempre que uma estação tem menos de 5 peças disponíveis. Neste estudo, este é o número mínimo a partir do qual é considerado que a estação está em risco de parar a linha.

**Tabela 4.3 - Listagem de Veículos a Processar pelo Modelo**

Instante (s)	Carro	Cablagem	Tubo	Radiador	Ótica	Farolim
800	Carro 1	Cablagem_10	Tubos_3	Radiador_5	Ótica_2	Farolim_1
880	Carro 2	Cablagem_5	Tubos_2	Radiador_2	Ótica_1	Farolim_4
960	Carro 3	Cablagem_2	Tubos_3	Radiador_2	Ótica_2	Farolim_7
1040	Carro 4	Cablagem_11	Tubos_2	Radiador_2	Ótica_2	Farolim_1
1120	Carro 5	Cablagem_5	Tubos_4	Radiador_4	Ótica_2	Farolim_1
1200	Carro 6	Cablagem_3	Tubos_6	Radiador_2	Ótica_2	Farolim_2
1280	Carro 7	Cablagem_3	Tubos_2	Radiador_4	Ótica_2	Farolim_1
1360	Carro 8	Cablagem_10	Tubos_10	Radiador_4	Ótica_1	Farolim_2
1440	Carro 9	Cablagem_5	Tubos_2	Radiador_2	Ótica_1	Farolim_2
1520	Carro 10	Cablagem_6	Tubos_3	Radiador_5	Ótica_1	Farolim_2
1600	Carro 11	Cablagem_10	Tubos_6	Radiador_2	Ótica_2	Farolim_4
1680	Carro 12	Cablagem_5	Tubos_2	Radiador_2	Ótica_1	Farolim_1
1760	Carro 13	Cablagem_10	Tubos_8	Radiador_7	Ótica_1	Farolim_1
1840	Carro 14	Cablagem_3	Tubos_2	Radiador_2	Ótica_1	Farolim_1
1920	Carro 15	Cablagem_3	Tubos_3	Radiador_7	Ótica_2	Farolim_2
2000	Carro 16	Cablagem_2	Tubos_6	Radiador_7	Ótica_1	Farolim_2
2080	Carro 17	Cablagem_5	Tubos_2	Radiador_2	Ótica_2	Farolim_5
2160	Carro 18	Cablagem_2	Tubos_2	Radiador_1	Ótica_1	Farolim_4
2240	Carro 19	Cablagem_1	Tubos_6	Radiador_2	Ótica_1	Farolim_1
2320	Carro 20	Cablagem_15	Tubos_3	Radiador_4	Ótica_1	Farolim_2
2400	Carro 21	Cablagem_3	Tubos_2	Radiador_4	Ótica_1	Farolim_1
...						

Outro fator pertinente na análise de cenários é a carga e a descarga das baterias dos veículos autónomos. Para este ponto, foi configurada uma mensagem de alerta que indicava sempre que um AGV ficava inutilizado por falta de bateria, e conseqüentemente, a simulação era suspensa. Estas mensagens, assim como as mencionadas no parágrafo anterior, constituem o principal indicador sobre a viabilidade do cenário a ser testado.

Adicionalmente, para uma análise mais detalhada do comportamento dos AGV's, é possível extrair os dados de performance, nomeadamente:

- Distância total percorrida – Corresponde à soma das distâncias que cada AGV percorre por simulação efetuada;
- Taxa de trabalho – Indica a percentagem média de tempo despendido a realizar tarefas por AGV;
- Taxa de ocupação – Refere-se ao tempo médio que cada AGV despende em tarefas ou em carga, relativamente ao tempo total de atividade;

- Taxa de inatividade – Reflete a percentagem de tempo que os AGV's aguardavam instruções;
- Taxa de carga – Refere-se à percentagem média de tempo dos AGV's despendida em recarga de baterias;
- Consumo energético – Reflete o dispêndio total de energia consumida pelo total dos AGV's.

## **4.3 Modelo Computacional**

### **4.3.1 Software - Visual Components**

Visual Components é um software de simulação 3D direcionado para a indústria e para simulação de processos ou fluxos industriais. Uma componente de destaque deste software é a vertente gráfica que concede às simulações uma noção mais realista dos processos a estudar.

Para o caso de estudo em análise, a escolha do software revelou-se uma etapa determinante para garantir a obtenção de um modelo capaz de fornecer todos os dados necessários à análise. Parte destes dados podem ser extraídos num modelo tradicional de simulação a duas dimensões, no entanto, a necessidade de espelhar um ambiente fabril dinâmico, em que a ocupação do espaço e a definição do layout é fundamental, sugere a utilização de um modelo de simulação a três dimensões.

Tendo este fator em vista, determinou-se que o software Visual Components garante todas as potencialidades necessárias ao estudo, garantindo as funcionalidades básicas para a determinação de taxas de ocupação, tempos de ciclo, balanceamento de processos e outras métricas processuais e, paralelamente, assegura que os processos estudados são viáveis do ponto de vista produtivo, refletindo eventuais problemas de falta de espaço operacional ou problemas de congestionamento de corredores, por exemplo. Tem ainda em conta o fator de risco humano, possibilitando a identificação e previsão de eventuais riscos ergonómicos para um operador a realizar o processo.

### **4.3.2 Arquitetura do Modelo**

Para que o modelo de simulação construído se consiga assemelhar o mais possível ao ambiente real de produção, surge a necessidade de garantir o sincronismo de todos os

processos que descreve, quer os cinco processos de sequência, realizados nos supermercados, quer nos processos de montagem correspondentes, realizados na linha de produção. O desvio de 1 segundo no ciclo de um dos processos, refletir-se-á numa dessincronização ao fim de poucas horas de simulação, o que na prática real resultaria numa paragem indesejada da linha de montagem. Por outro lado, a falta ou a troca de um componente poderia levar ao mesmo fim.

Para garantir assim o necessário sincronismo e rigor, é essencial que todos estes processos sejam comandados de uma forma centralizada, tal como é feito no cenário real de produção. Para este efeito, toda a informação é consumida a partir de uma única listagem, que contempla as necessidades de cada veículo que passa na linha de produção. De forma prática, cada veículo comunica as referências de peças que vai necessitar, e o momento em que este vai entrar na linha de produção.

O modelo gera assim as tarefas de sequenciação necessárias, de forma ordenada, para garantir o rigor no momento da montagem, e garante, com base no instante de entrada, que os componentes estão disponíveis e são montados no momento pretendido. Desta forma, só surgirá uma paragem de linha caso surja um atraso em algum processo, algo que só pode ser provocado pela falta de recursos, neste caso seria a falta de AGV's, de racks ou de operadores.

Embora toda a informação responsável por despoletar os processos produtivos estar concentrada numa listagem que é importada para o modelo, existem fatores que podem ser controlados diretamente no software, permitindo diferenciar cenários e recolher diferentes outputs com base na mesma lista de veículos a produzir. São estas variáveis que nos permitirão analisar as necessidades de recursos e a forma mais eficiente de operar com o dimensionamento recomendado.

Relativamente aos AGV's, tal como ilustra a figura 4.2, é possível configurar o número de AGV's a operar, assim como o tipo de alocação, quer seja dedicada ou partilhada. É também possível parametrizar, tal como reflete a figura 4.3, outros fatores mais técnicos como as velocidades máximas, de arranque, em vazio, entre outras, ou os parâmetros de carga, nomeadamente a capacidade da bateria, a rapidez de carga e descarga, ou o valor mínimo e máximo para se colocar à carga ou sair de carga.

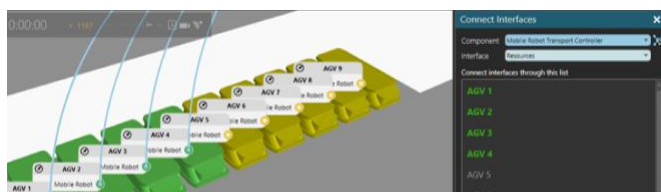


Figura 4.2 - Painel de Controlo de AGV's

Energia	Capacidade Max.	40	Ah
	Consumo Busy	10	Ah/h
	Consumo Idle	1	Ah/h
	ReCharge Rate	15	Ah/h
	ToCharge Limit	35	%
Performance	ChargeUntil	90	%
	MoveSpeed	1500	mm/s
	MoveSpeedLoaded	1000	mm/s
	TurnSpeed	75	º/s
	MoveSpeedAppr. On Axis Rotation	300	mm/s
		Yes	-

Ao nível da interface, é ainda possível alterar o layout do modelo, permitindo alterar o local de carga das baterias dos AGV's, o percurso por eles percorrido, as restrições de espaço dos corredores, entre outros fatores que possam ser pertinentes para o estudo. Também é possível modificar os processos de forma rápida e prática, por forma a ser possível estudar diferentes variantes e analisar o modelo de processo mais eficiente.

## **4.4 Validação do Modelo**

Para garantir que o modelo espelha a operação em análise e retrata os processos da forma mais aproximada à realidade, é necessário criar e reproduzir cenários que posteriormente são comparados com o comportamento real da operação para aferir o grau de consistência dos resultados e as diferenças entre o output real e o da simulação.

No modelo em causa, as deslocações dos equipamentos atuais não podem ser comparadas com as deslocações dos equipamentos que se pretende estudar, os AGV's, pois ambos possuem diferentes características, impactando de forma diferente no processo. No entanto, o comportamento dos AGV's no modelo foi configurado com base nas especificações técnicas do fabricante, e comprovou-se que estes apresentavam um tempo de arranque, de paragem, de acoplamento, entre outros, coerente com as métricas fornecidas.

Relativamente aos processos de sequência, estes são realizados de forma idêntica no modelo, pelo que podem ser diretamente comparados com os tempos de ciclo reais. Para tal, foi feita uma análise dos processos em ambiente produtivo recorrendo à base de dados, e extraiu-se a média dos tempos de ciclo de cada atividade em estudo para posteriormente se comparar com o cenário simulado. A comparação destes dados com os obtidos por simulação revelou uma aproximação relativa de 96,2% com base nas diferenças entre os dois tempos totais de sequência. Esta informação pode ser consultada na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Comparação do Modelo Real do Simulado

	Tempo Real (Decimal)	Tempo Simulação (Decimal)	% Aproximação
<b>Tubos AC</b>	4,992	5,417	91,5%
<b>Linhas AC</b>	4,017	3,946	98,2%
<b>Cablagens</b>	3,950	3,983	99,2%
<b>Pilar C</b>	1,792	1,790	99,9%
<b>Total Sequência</b>	21,533	22,343	96,2%

## 4.5 Análise de Cenários

### 4.5.1 Dimensionamento do Processo de Abastecimento

A determinação do número de recursos necessários para os processos em estudo, foi realizada tendo em conta as duas variantes de processo de sequência já mencionados, a variante 1, sequenciação tradicional, e a variante 2, sequenciação com assistência de AGV. O dimensionamento foi estudado em paralelo para os dois processos. A cada variante, corresponde um modelo adaptado do modelo de simulação principal. Para cada simulação realizada foram realizadas 3 replicações de 24 horas, o que corresponde a um total aproximado de 3240 ciclos de produção.

Inicialmente foi realizado o estudo utilizando o método de carga por oportunidade, sem requerer assim a paragem dos AGV's para recarga de baterias. Nesta etapa, foram simulados vários cenários com diferentes quantidades de AGV's a operar, com o intuito de comparar a eficiência do fornecimento de peças para as duas variantes. Também os dados de eficiência dos AGV's, como a distância total percorrida, a taxa de tempo de trabalho e a taxa de tempo livre são tidos em conta. Nesta simulação, a ocorrência de falta de peças terminou a replicação que decorria nesse exato momento. Na tabela 4.5 são apresentados os resultados para as variantes 1 e 2 com mais pontuação.

**Tabela 4.5** - Resultados de Simulação - Método de Carga por Oportunidade

Nº AGV's	Variante 1		Variante 2	
	2	3	5	6
Nº avisos de <u>poucas</u> peças	48	0	3	0
Nº avisos de <u>falta</u> de peças	0	0	0	0
Total distância percorrida AGV's	357,470 Km	369,430 Km	404,760 Km	377,160 Km
Taxa de tempo de trabalho	65,5%	48,3%	75,0%	60,5%
Taxa de inatividade	34,5%	51,7%	25,0%	39,5%

Amarelo: Risco de comprometer a operação  
Vermelho: Valor não aceitável

Relativamente à variante 1, a análise dos resultados obtidos permite concluir que neste cenário são necessários no mínimo 3 AGV's para garantir a viabilidade do processo, pois embora não tenha ocorrido escassez de peças na linha de produção, por 48 vezes a substituição das racks nas estações de produção foi realizada com atraso, colocando a produção em risco de paragem. Verifica-se que com o aumento da quantidade de AGV's, a taxa de tempo de trabalho reduz dado que o número de tarefas a realizar será agora repartida por mais AGV's. Esta tendência provoca o aumento da taxa de inatividade.

As simulações da variante 2 revelaram que é possível realizar os processos com pelo menos 5 AGV's, no entanto, neste caso, ainda existe risco de paragem da linha de montagem pois ocorreram 3 atrasos no abastecimento das estações. As taxas de tempo livre e de trabalho aumentaram e diminuíram respetivamente, com uma quantidade superior de AGV's, comportamento que também se verifica na variante 1.

A distância total percorrida tem um comportamento análogo nas duas variantes de simulação. Na variante 1 este valor aumenta com o número de AGV's, enquanto na variante 2, o valor reduz consideravelmente. Na primeira situação, e no cenário de 2 AGV's, o elevado número de atrasos provocou uma lista maior de tarefas em espera, o que permitiu aos AGV's uma maior opção de escolha, sempre que estavam libertos, que por heurística optam sempre pela localização mais próxima. Na variante 2, o cenário com 6 AGV's confere uma maior probabilidade de existir um AGV nas imediações próximas, sempre que necessário, reduzindo assim os deslocamentos em vazio.

Para analisar as duas variantes de processo num cenário de carregamento por método automático de carga, ou estação de carga, é necessário adaptar novamente o modelo de simulação para representar o processo de carga. Neste submodelo, as simulações baseiam-se

em cenários compostos por diferentes combinações de AGV's e postos de carga, permitindo aferir qual o dimensionamento recomendado para estes dois fatores.

Adicionalmente à informação comparada anteriormente, este novo submodelo permite identificar esgotamentos de bateria e também comparar taxas de tempo de carga, taxas de ocupação e consumo energético. Neste modelo de simulação, a ocorrência de falta de peças ou de esgotamento de bateria de um AGV, impede a continuação da replicação. Na tabela 4.6 é possível observar os resultados dos diferentes cenários simulados para ambas as variantes.

Na análise da variante 1, constata-se que são necessários pelo menos 6 AGV's e 4 pontos de carga para viabilizar um cenário, visto que nas simulações com menor número de recursos se verificou sempre a ocorrência de falta de peças ou de esgotamento de bateria, inviabilizando estes cenários. Importa notar que o aumento de estações de carga sem aumentar o número de AGV's, verificado entre o cenário D1 e E1, permite que, em dados momentos, o número de AGV's a operar seja inferior do que no cenário com menos postos de carga. Este fator torna mais suscetível a ocorrência de atrasos e falhas no abastecimento da linha. Por outro lado, como notado anteriormente, a sobrecarga dos AGV's permite reduzir as distâncias percorridas dado a maior opção de escolha no momento de selecionar tarefas.

A análise da variante 2 sugere que se recorra a 5 postos de carga. No entanto, relativamente ao número de AGV's, o cenário que recorre a 10 AGV's indica a ocorrência de um atraso numa das 3 replicações desta simulação. Dado que se trata de uma situação única, este facto não é considerado crítico neste estudo, surgindo então duas combinações viáveis, a D2 com maior risco e a E2 com mais segurança operacional. É relevante notar que o aumento de pontos de carga acabado de mencionar no parágrafo anterior, teve a implicação referida no cenário D2, levando a um atraso no abastecimento pela falta de AGV's disponíveis.

Em ambas as variantes, a taxa de tempo de trabalho diminui com o aumento do número de AGV's, fator expectável dado que o modelo pode recorrer a mais recursos para realizar o mesmo número de tarefas. Consequentemente, a taxa de tempo despendido em recarga de baterias por AGV também reduz. No entanto, o consumo energético total dos AGV's aumenta sempre que um AGV é adicionado e reduz cada vez que um ponto de carga é disponibilizado. Consequentemente, pode afirmar-se que a disponibilidade de um ponto de carga no momento em que um AGV o requer é determinante para uma utilização de energia eficiente por parte dos robots.

**Tabela 4.6 - Resultados de Simulação - Método de Carga Automática**

Cenário	Variante 1					Variante 2				
	A1	B1	C1	D1	E1	A2	B2	C2	D2	E2
Nº AGV's	4	5	5	6	6	8	9	10	10	11
Nº de Pontos Carga	2	2	3	3	4	4	4	4	5	5
Nº Avisos de POUCAS Peças	4	1	5	0	0	22	4	0	1	0
Nº Avisos de Falta de Peças	0	0	1	0	0	6	0	0	0	0
Nº Avisos de Esgotamento de Bateria	3	3	0	1	0	0	0	1	0	0
Total Distância percorrida AGV's (Km)	382,1	370,3	381,9	380,0	358,3	357,1	350,4	341,3	356,7	342,8
Taxa média de Tempo de Trabalho	34,3%	26,9%	30,2%	24,8%	21,8%	47,8%	41,5%	37,2%	37,8%	36,4%
Taxa média de Tempo Carga	25,8%	22,1%	20,2%	17,7%	15,6%	14,3%	13,4%	12,6%	12,5%	12,0%
Taxa média de ocupação	60,0%	49,1%	50,4%	42,5%	37,4%	62,1%	54,9%	49,7%	50,3%	48,4%
Taxa de Inatividade	40,0%	50,9%	49,6%	57,5%	62,6%	37,9%	45,1%	50,3%	49,7%	51,6%
Consumo Energético (KWh)	22,31	24,31	22,40	23,87	21,43	26,54	28,21	29,68	29,48	31,42

## 4.5.2 Análise dos Parâmetros de Carga

Para a determinação dos parâmetros de carga mais eficientes para o caso em estudo, foram realizadas novas simulações, baseadas em cenários que entre si apenas diferiam na gestão de energia dos AGV's, nomeadamente na quantidade máxima de carga que um AGV pode acumular e na quantidade mínima após a qual o AGV solicita um posto de carga para repor a energia nas suas baterias. Para a análise destes cenários foi utilizado o submodelo de simulação da variante 1, com o número de AGV's fixo em 6 AGV's e 3 postos de carregamento. Foi realizada uma replicação com 75 horas para cada cenário, correspondendo a um total de 3375 ciclos produtivos.

Os resultados obtidos relativos à percentagem de tempo média que os AGV's despenderam a recarregar as baterias durante cada cenário estão apresentados na tabela 4.7. Importa destacar que quanto menor a percentagem indicada, menor foi tempo que os AGV's despenderam para recarregar as suas baterias, e consequentemente menor energia consumiram durante a janela de simulação.

Em primeira instância, é possível identificar uma divergência de 21,46% entre o cenário mais eficiente e o cenário menos favorável, o que representa uma diferença de cerca de 16 horas por AGV, no intervalo de tempo simulado. Desta forma, é realçado o impacto dos limites superiores e inferiores de carga na gestão eficiente de energia, por forma a reduzir o consumo e o desgaste dos componentes inerentes à carga e armazenamento de baterias.

**Tabela 4.7 - Taxa Média de Tempo de Carga vs. Limites de Carga**

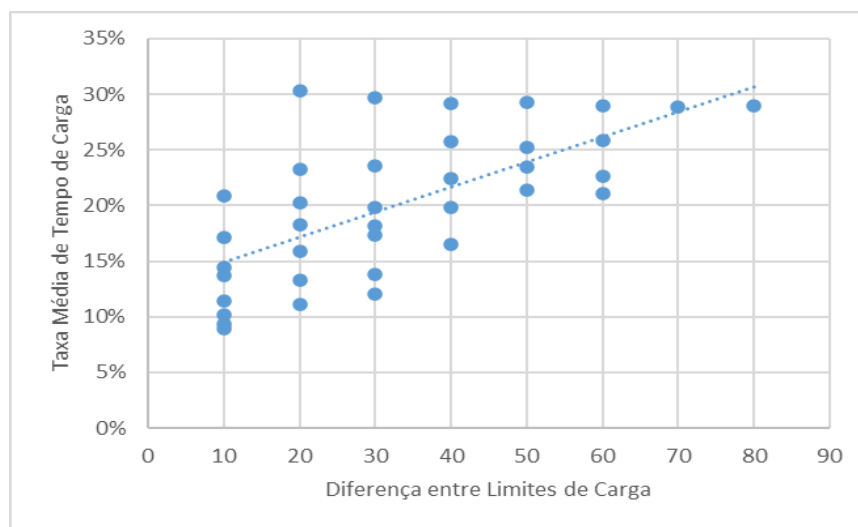
		Limite Máximo de Carga								
		20	30	40	50	60	70	80	90	100
Limite Mínimo de Carga	10	8,91%	*	12,05%	*	*	21,06%	*	*	*
	20		9,30%	11,07%	13,79%	16,53%	21,40%	22,60%	*	28,98%
	30			11,47%	13,34%	17,38%	19,83%	23,46%	25,81%	28,82%
	40				10,17%	15,91%	18,14%	22,41%	25,26%	29,02%
	50					13,74%	18,28%	19,88%	25,77%	29,27%
	60						14,40%	20,23%	23,53%	29,18%
	70							17,16%	23,21%	29,69%
	80								20,88%	30,37%
	90									*

\*Esgotamento de Bateria Verificado

Ao observar os resultados de uma forma geral, é possível comprovar a influência da curva do processo de recarga de baterias explicitado na secção 2. Desta forma, o processo de recarga tem uma maior taxa de transferência de energia quando as baterias estão mais próximas da sua capacidade mínima. Um outro padrão refletido pela tabela 4.7 prende-se com a amplitude da janela de operação dos AGV's, definida pela diferença entre limites. Para uma melhor perceção da influência deste fator, foi elaborado um gráfico de dispersão, representado pela figura 4.4 que agrega os vários cenários simulados consoante a amplitude da respetiva janela de operação.

A análise da linha de tendência permite-nos identificar que quanto menor é a janela de operação dos AGV's, menor é também o tempo despendido em recarga de baterias. Este facto está possivelmente relacionado com a disponibilidade dos pontos de carga que, com amplitudes de limites maiores, obriga a um maior tempo de permanência dos robots nas

estações de carga por cada carregamento efetuado. Desta forma, existem períodos mais prolongados de operação com todos os postos de carga ocupados e apenas 3 AGV's em funcionamento. Tal como verificado na secção 3, a redução no número de AGV's provoca um aumento na taxa de tempo médio despendido no processo de carga.



**Figura 4.4** - Relação entre a amplitude dos limites de carga e taxa média de tempo de carga

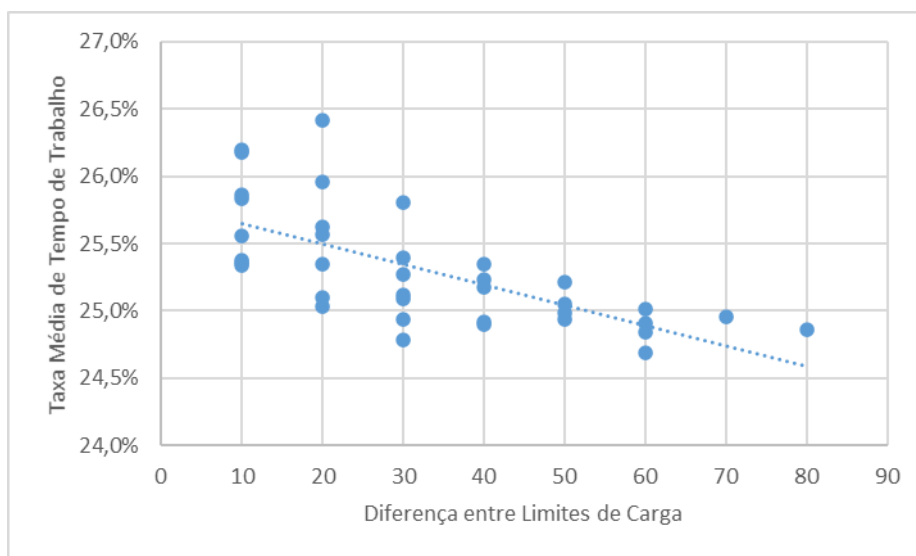
Outro indicador estudado foi a taxa média de tempo de trabalho dos AGV's, que é apresentado na tabela 4.8 abaixo. Nesta tabela é possível notar que o padrão de cenários favoráveis não corresponde diretamente ao padrão identificado na tabela 4.7. Importa reforçar também que neste indicador, a amplitude máxima registada entre cenários é de 1,73%, o que revela pouco impacto na tomada de decisão dado que esta divergência é pouco superior a 1 hora por AGV.

**Tabela 4.7** - Taxa Média de Tempo de Trabalho por Cenário Simulado

		Limite Superior								
		20	30	40	50	60	70	80	90	100
Limite Inferior	10	25,34%	*	24,78%	*	*	24,69%	*	*	*
	20		25,36%	25,04%	24,94%	24,90%	24,93%	24,84%	*	24,87%
	30			25,56%	25,10%	25,12%	24,92%	24,99%	24,91%	24,96%
	40				25,38%	25,35%	25,09%	25,18%	25,05%	25,02%
	50					25,84%	25,57%	25,27%	25,23%	25,22%
	60						25,87%	25,63%	25,40%	25,35%
	70							26,18%	25,96%	25,81%
	80								26,19%	26,42%
	90									*

\*Esgotamento de Bateria Verificado

Ao analisar o padrão refletido na tabela 4.8, é possível identificar uma tendência favorável quando a diferença entre limites de carga aumenta, visto que uma menor taxa de tempo de trabalho leva a uma maior disponibilidade dos AGV's para realizar tarefas e também a um menor consumo de energia. O gráfico apresentado na figura 4.5 mostra esta tendência através da comparação direta das taxas de tempo de trabalho em função da amplitude da janela de operação de cada cenário. A justificação apresentada para este facto prende-se maioritariamente com o número de deslocações realizadas para alcançar um posto de carga, o que com intervalos menores entre limites se traduz num maior impacto.



**Figura 4.5** - Correlação entre Diferença Entre Limites de Carga e Taxa de Tempo de Trabalho

Após a análise dos dois fatores descritos neste capítulo, é possível concluir que é favorável estabelecer limites de carga mais baixos dada a influência da curva de recarga de baterias. No entanto, é importante ter em conta o fator de risco associado, visto que ao circular com níveis baixos de bateria um AGV corre o risco de não conseguir alcançar um posto de carregamento. Relativamente à amplitude do intervalo entre limites, neste caso é necessário assumir um compromisso entre a taxa média de tempo em carga e a taxa média de trabalho visto que estas variam de forma inversa. No entanto, o fator carga tem um impacto consideravelmente superior ao impacto na ocupação dos AGV's.



## 5.1 Conclusões Principais

O estudo de caso apresentado resulta da necessidade de planejar eficazmente a implementação de um circuito de AGV's numa indústria automóvel. Desta feita, o primeiro grande contributo deste estudo resulta da resposta ao dimensionamento, facilitada pelo uso da simulação. Assim, através da simulação de cenários, foi possível determinar para as diferentes combinações, o comportamento do sistema, possibilitando a identificação do cenário que cumpre com as necessidades do sistema e, em simultâneo, necessita de menos recursos para executar a operação.

Adicionalmente, e com recurso ao modelo de simulação, foram analisados os impactos que uma nova variante do processo atual poderia acarretar. Nesta nova variante, os operadores que realizam o processo de sequência não têm a necessidade de transportar as *racks* com as peças, sendo que esta necessidade é satisfeita com recurso aos AGV's que, desta forma, aliviam a carga física associada e também reduz o tempo de ciclo do processo. Por outro lado, este método necessita de mais AGV's para assegurar o sincronismo da produção. Através da análise de cenários foi possível determinar o exato número de AGV's adicionais necessários para que este processo decorra de forma eficaz.

Em complemento ao estudo do dimensionamento do número de AGV's, foram simulados novos cenários com vista a determinar os melhores parâmetros de carga dos AGV's. Desta forma, é possível fazer uso dos AGV's de uma forma mais eficiente, garantindo maior tempo de utilização, economizando energia e reduzindo as distâncias percorridas que, por norma, reduz a periodicidade das intervenções de manutenção.

Em suma, o elevado número de horas simuladas permitiu recolher informação numa fase onde ainda não era possível recorrer aos AGV's para realizar testes de campo. Desta forma foi possível antecipar certos constrangimentos que poderiam surgir, assim como prever comportamentos e determinar as quantidades necessárias. Por último, a construção do modelo de simulação que está na base de todo o estudo, implica um elevado valor acrescentado para a organização que em análises futuras pode fazer uso do modelo para analisar o comportamento das implementações pretendidas.

## 5.2 Limitações do Estudo

A principal limitação deste estudo é resultante das limitações do modelo construído. Apesar do modelo virtual retratar a operação em estudo com bastante semelhança à realidade, neste não estão previstas falhas ou erros que possam resultar da atividade dos AGV's ou dos operadores, assumindo sempre que as operações são bem executadas. É também assumida uma produtividade média igual para todos os operadores, o que não se verifica em ambiente industrial. Também o desgaste das baterias e dos AGV's não é tido em conta no modelo, assumindo sempre o perfeito estado de conservação de todos os AGV's e componentes.

Um outro fator que influencia o resultado do estudo diz respeito ao número de replicações executado para cada cenário. Para a análise apresentada, foi simulado um número consistente de horas que permitiu garantir a solidez dos resultados obtidos, no entanto, e num cenário ideal, o número de replicações poderia ser superior, por forma a aumentar o grau de confiança dos resultados. Neste caso, dado se tratar de um modelo de simulação a três dimensões, as replicações necessitam de bastante tempo para correr e necessitam de bastante capacidade computacional, principalmente no arranque de cada cenário. Este fator constitui a principal desvantagem da utilização deste software, que de certa forma, dificultou a realização de um maior número de replicações e horas simuladas.

## 5.3 Trabalhos Futuros

Como continuação do trabalho apresentado nesta dissertação, seria relevante fazer uma análise comparativa entre um cenário de AGV's dedicados, onde cada processo recorre a um conjunto específico de AGV's, e um cenário onde os AGV's são partilhados em que, neste caso, sempre que surge a necessidade de um AGV para um determinado processo, é solicitado o AGV mais próximo para efetuar o transporte, sendo que este AGV pode efetuar qualquer um dos processos existentes na fábrica.

Um outro complemento ao estudo seria a introdução do fator congestionamento que é observado nos corredores da fábrica, fruto dos processos de transporte manual de peças que decorrem. Para tal será necessário incluir no modelo os processos de abastecimento manual, para que seja possível estudar o impacto destes nas viagens realizadas pelos AGV's, que certamente necessitarão de abrandar e até imobilizar-se em determinados instantes do processo de transporte.

# BIBLIOGRAFIA

- Ballou, R. H. (2007). The evolution and future of logistics and supply chain management. *European Business Review*, 19(4), 332–348. <https://doi.org/10.1108/09555340710760152>
- Battini, D., Boysen, N., & Emde, S. (2013). Just-in-Time supermarkets for part supply in the automobile industry. *Journal of Management Control*, 24(2), 209–217. <https://doi.org/10.1007/s00187-012-0154-y>
- Beiler, B. C., Ignácio, P. S. de A., Pacagnella Júnior, A. C., Anholon, R., & Rampasso, I. S. (2020). Reverse logistics system analysis of a Brazilian beverage company: An exploratory study. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122624. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122624>
- Boysen, N., Emde, S., Hoeck, M., & Kauderer, M. (2015). Part logistics in the automotive industry: Decision problems, literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research*, 242(1), 107–120. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.09.065>
- Carvalho, J. C. de. (2017). *Logística e gestão da cadeia de abastecimento*. Edições Sílabo. <https://novaresearch.unl.pt/en/publications/log%C3%ADstica-e-gest%C3%A3o-da-cadeia-de-abastecimento>
- Casper, R., & Sundin, E. (2018). Reverse Logistic Transportation and Packaging Concepts in Automotive Remanufacturing. *Procedia Manufacturing*, 25, 154–160. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.069>
- Chawla, V. K., Chanda, A. K., Angra, S., & Rani, S. (2018). Simultaneous Dispatching and Scheduling of Multi-Load AGV's in FMS-A Simulation Study. *Materials Today: Proceedings*, 5(11, Part 3), 25358–25367. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.339>
- Cheong, H.-W., & Lee, H. (2018a). Concept Design of AGV (Automated Guided Vehicle) Based on Image Detection and Positioning. *Procedia Computer Science*, 139, 104–107. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.224>
- Cheong, H.-W., & Lee, H. (2018b). Requirements of AGV (Automated Guided Vehicle) for SMEs (Small and Medium-sized Enterprises). *Procedia Computer Science*, 139, 91–94. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.222>
- CSCMP. (2013). *SCM Definitions and Glossary of Terms*. [https://cscmp.org/CSCMP/Academia/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms/CSCMP/Educate/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921](https://cscmp.org/CSCMP/Academia/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921)
- De Ryck, M., Versteyhe, M., & Debrouwere, F. (2020). Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques. *Journal of Manufacturing Systems*, 54, 152–173. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.12.002>
- Drath, R., & Horch, A. (2014). Industrie 4.0: Hit or Hype? [Industry Forum]. *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, 8, 56–58. <https://doi.org/10.1109/MIE.2014.2312079>
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603–626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>

- Gudehus, T., & Kotzab, H. (2010). *Comprehensive Logistics*. Springer Science & Business Media.
- Heger, J., & Voß, T. (2019). Dynamic priority based dispatching of AGV's in flexible job shops. *Procedia CIRP*, 79, 445–449. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.119>
- Henaó-Hernández, I., Solano-Charris, E. L., Muñoz-Villamizar, A., Santos, J., & Henríquez-Machado, R. (2019). Control and monitoring for sustainable manufacturing in the Industry 4.0: A literature review. *IFAC-PapersOnLine*, 52(10), 195–200. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.022>
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2015). *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29269.22248>
- Jomini, A. H. (2018). *Précis De L'art De La Guerre, Ou Nouveau Tableau Analytique Des Principales Combinaisons De La Stratégie: De La Grande Tactique Et De La Politique Militaire*. Wentworth Press.
- Kabir, Q. S., & Suzuki, Y. (2018). Increasing manufacturing flexibility through battery management of automated guided vehicles. *Computers & Industrial Engineering*, 117, 225–236. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.01.026>
- Kain, R., & Verma, A. (2018). Logistics Management in Supply Chain – An Overview. *Materials Today: Proceedings*, 5(2, Part 1), 3811–3816. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.634>
- Kesen, S. E., & Baykoç, Ö. F. (2007). Simulation of automated guided vehicle (AGV) systems based on just-in-time (JIT) philosophy in a job-shop environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(3), 272–284. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2006.11.002>
- Kilic, H. S., & Durmusoglu, M. B. (2015). Advances in assembly line parts feeding policies: A literature review. *Assembly Automation*, 35(1), 57–68. <https://doi.org/10.1108/AA-05-2014-047>
- Lambert, D. M., Stock, J. R., & Ellram, L. M. (1998). *Fundamentals of Logistics Management*. Irwin/McGraw-Hill.
- Lee, S.-Y., & Yang, H.-W. (2012). Navigation of automated guided vehicles using magnet spot guidance method. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(3), 425–436. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2011.11.005>
- Lin, Q., Wang, J., Xiong, R., Shen, W., & He, H. (2019). Towards a smarter battery management system: A critical review on optimal charging methods of lithium ion batteries. *Energy*, 183, 220–234. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.128>
- Lu, S., Xu, C., Zhong, R. Y., & Wang, L. (2017). A RFID-enabled positioning system in automated guided vehicle for smart factories. *Journal of Manufacturing Systems*, 44, 179–190. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.03.009>
- Lu, S., Xu, C., Zhong, R. Y., & Wang, L. (2018). A passive RFID tag-based locating and navigating approach for automated guided vehicle. *Computers & Industrial Engineering*, 125, 628–636. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.026>
- Makarova, I., Shubenkova, K., & Pashkevich, A. (2017). Logistical Costs Minimization for Delivery of Shot Lots by using Logistical Information Systems. *Procedia Engineering*, 178, 330–339. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.059>
- Manavalan, E., & Jayakrishna, K. (2019). A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 925–953. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.030>
- Mangan, J., Lalwani, C., & Butcher, T. (2008). *Global Logistics and Supply Chain Management*.

- Mehami, J., Nawi, M., & Zhong, R. Y. (2018). Smart automated guided vehicles for manufacturing in the context of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 26, 1077–1086. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.144>
- Mourtzis, D., Doukas, M., & Bernidaki, D. (2014). Simulation in Manufacturing: Review and Challenges. *Procedia CIRP*, 25, 213–229. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.032>
- Neradilova, H., & Fedorko, G. (2017). Simulation of the Supply of Workplaces by the AGV in the Digital Factory. *Procedia Engineering*, 192, 638–643. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.110>
- Pil, F. K., & Holweg, M. (2004). Linking Product Variety to Order-Fulfillment Strategies. *INFORMS Journal on Applied Analytics*, 34(5), 394–403. <https://doi.org/10.1287/inte.1040.0092>
- Qi, M., Li, X., Yan, X., & Zhang, C. (2018). On the evaluation of AGV'S-based warehouse operation performance. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 87, 379–394. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.07.015>
- Rocha, L. F., Moreira, A. P., & Azevedo, A. (2010). Flexible Internal Logistics Based on AGV System's: A Case Study. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(17), 248–255. <https://doi.org/10.3182/20100908-3-PT-3007.00049>
- Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., & Bettenhausen, K. D. (2015). About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 567–572. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
- Silva, D. A. L., Santos Renó, G. W., Sevegnani, G., Sevegnani, T. B., & Serra Truzzi, O. M. (2013). Comparison of disposable and returnable packaging: A case study of reverse logistics in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 47, 377–387. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.057>
- Vavřík, V., Gregor, M., & Grznár, P. (2017). Computer Simulation as a Tool for the Optimization of Logistics Using Automated Guided Vehicles. *Procedia Engineering*, 192, 923–928. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.159>
- Viharos, A. B., & Németh, I. (2018). Simulation and scheduling of AGV based robotic assembly systems. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1415–1420. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.317>
- Werner-Lewandowska, K., & Kosacka-Olejniak, M. (2018). Logistics maturity model for service company – theoretical background. *Procedia Manufacturing*, 17, 791–802. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.130>
- Yan, R., Dunnett, S. J., & Jackson, L. M. (2018). Novel methodology for optimising the design, operation and maintenance of a multi-AGV system. *Reliability Engineering & System Safety*, 178, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.06.003>
- Yang, Y., Zhong, M., Dessouky, Y., & Postolache, O. (2018). An integrated scheduling method for AGV routing in automated container terminals. *Computers & Industrial Engineering*, 126, 482–493. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.007>
- Yavas, V., & Ozkan-Ozen, Y. D. (2020). Logistics centers in the new industrial era: A proposed framework for logistics center 4.0. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 135, 101864. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101864>
- Zhan, X., Xu, L., Zhang, J., & Li, A. (2019). Study on AGV's battery charging strategy for improving utilization. *Procedia CIRP*, 81, 558–563. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.155>

Zhang, L., Hu, Y., & Guan, Y. (2019). Research on hybrid-load AGV dispatching problem for mixed-model automobile assembly line. *Procedia CIRP*, 81, 1059–1064. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.251>



2021

Pedro Rafael de Figueiredo Rodrigues

Pedro Rafael de Figueiredo Rodrigues

AUTOMATIZAÇÃO DO ABASTECIMENTO DE UMA LINHA  
DE MONTAGEM COM RECURSO À SIMULAÇÃO