



**Politécnico  
de Viseu**

Escola Superior  
de Tecnologia  
e Gestão de Viseu

# Gestão das zonas de Kitting e melhoria com recurso a simulação

Bruno Filipe Pais do Nascimento

Trabalho de Projeto

Mestrado em Engenharia Informática - Sistemas de Informação

Trabalho efetuado sob a orientação de  
Professora Doutora Ana Cristina Wanzeller Guedes de Lacerda  
Professor Doutor Jorge Manuel Fernandes Henriques da Silva

Dezembro de 2024



**Politécnico  
de Viseu**

Escola Superior  
de Tecnologia  
e Gestão de Viseu

# Gestão das zonas de Kitting e melhoria com recurso a simulação

Bruno Filipe Pais do Nascimento

Trabalho de Projeto

Mestrado em Engenharia Informática - Sistemas de Informação

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professora Doutora Ana Cristina Wanzeller Guedes de Lacerda  
Professor Doutor Jorge Manuel Fernandes Henriques da Silva

Dezembro de 2024

*"A inovação só faz sentido se aperfeiçoar e melhorar a vida das pessoas."  
Satya Nadella*



# Agradecimentos

Agradeço à família que está sempre lá para me apoiar em tudo, nos bons e maus momentos. Não existem palavras que possam descrever o sentimento de gratidão que tenho para convosco.

Uma palavra de agradecimento a toda a equipa da *InKlusion Entertainment* que sempre me incentivou desde o primeiro momento, e permitiu conjugar a vida profissional com a vida académica.

Aos meus orientadores, Professora Doutora Cristina Wanzeller e Professor Doutor Jorge Silva da parte da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, João Dias e André Barbosa da parte da *InKlusion Entertainment*, por acreditarem no tema e darem um suporte constante, em todas as fases deste trabalho.

Também agradecer aos docentes do Departamento de Informática, por continuarem a ser grandes mestres na arte de ensinar, e partilharem o conhecimento da melhor maneira. Os conhecimentos obtidos ao longo das várias unidades curriculares foram muito importantes para a realização deste projeto.

Aproveito ainda para agradecer à *InKlusion Entertainment* e ao consórcio *Pro-dutech R3*, pelo convite para participar da Feira Internacional Motek 2024, que decorreu de 8 a 11 de Outubro, em Stuttgart (Alemanha), que permitiu apresentar o trabalho desenvolvido bem como recolher feedback sobre o mesmo.

Por fim, mas não menos importante, a todas as entidades que participaram no projeto, aos colegas e amigos que estão no mesmo caminho, e nos entreejudamos para ultrapassar as dificuldades e vencer os desafios.



# Resumo

Esta pesquisa propõe uma abordagem integrativa para otimização de processos industriais, unindo os princípios fundamentais do *Lean Manufacturing*, a evolução tecnológica da Indústria 4.0, a aplicação estratégica de *Digital Twin*, a análise aprofundada por meio de simulação e a gestão eficaz de *Autonomous Mobile Robot*, incorporando os pilares emergentes da Indústria 5.0. O objetivo é criar um modelo holístico que aproveite as sinergias dessas abordagens para impulsionar a eficiência e a flexibilidade na produção.

Ao examinar criticamente os princípios do *Lean Manufacturing*, a pesquisa explora a minimização de desperdícios e a maximização do valor, alinhando-os com as capacidades transformadoras da tecnologia da Indústria 4.0 e os pilares sustentáveis e humanocêntricos da Indústria 5.0. A introdução estratégica de *Digital Twin* proporciona uma representação virtual precisa dos processos em tempo real, permitindo uma compreensão mais profunda e facilitando a implementação de melhorias.

A gestão dos *Autonomous Mobile Robot* é integrada de forma eficaz nesse modelo, abordando o papel dinâmico da robótica autónoma na melhoria dos fluxos de produção. A simulação desempenha um papel central na análise de cenários e na validação das propostas, proporcionando compreensões fundamentais para a tomada de decisões informadas. Os resultados esperados devem destacar não apenas os ganhos de eficiência, mas também uma adaptação eficaz a mudanças dinâmicas nas demandas do mercado.

Ao conciliar estes aspetos, o resultado obtido é um sistema de gestão de processo e de frota, baseada em microsserviços e orientada a eventos. Este sistema representa uma prova de conceito materializada, que recorre a uma arquitetura distribuída para prover alta disponibilidade e resiliência, e coloca o operador no centro da operação.

Este estudo contribui para a convergência prática dessas abordagens, fornecendo uma estrutura abrangente para a melhoria contínua em ambientes industriais. A aplicação conjunta desses princípios representa uma evolução significativa na busca por operações mais inteligentes, adaptáveis e automatizadas.

**Palavras-Chave:** Indústria 4.0, Indústria 5.0, *Lean Manufacturing*, *Kitting*, *Autonomous Mobile Robot*, *Digital Twin*, Simulação, Sistema de Gestão de Frota



# Abstract

This research proposes an integrative approach for optimizing industrial processes, bringing together the fundamental principles of *Lean Manufacturing*, the evolution of Industry 4.0 technology, the strategic application of *Digital Twin*, and in-depth analysis through simulation, and effective management of *Autonomous Mobile Robot*, incorporating the emerging pillars of Industry 5.0. The goal is to create a holistic model that harnesses the synergies of these approaches to drive efficiency and flexibility in production.

By critically examining *Lean Manufacturing* principles, the research explores waste minimization and value maximization, aligning them with the transformative capabilities of Industry 4.0 technology and the sustainable and human-centric pillars of Industry 5.0. The strategic introduction of *Digital Twin* provides a precise virtual representation of real-time processes, enabling a deeper understanding and facilitating the implementation of improvements.

The management of *Autonomous Mobile Robot* is effectively integrated into this model, addressing the dynamic role of autonomous robotics in improving production workflows. Simulation plays a central role in scenario analysis and proposal validation, providing fundamental insights for informed decision-making. The expected results should highlight not only efficiency gains but also effective adaptation to dynamic changes in market demands.

By reconciling these aspects, the result obtained is a process and fleet management system, based on microservices and event-oriented. This system represents a materialized proof of concept, which uses a distributed architecture to provide high availability and resilience, and places the operator at the center of the operation.

This study contributes to the practical convergence of these approaches, providing a comprehensive framework for continuous improvement in industrial environments. The combined application of these principles represents a significant evolution in the pursuit of smarter, more adaptable, and automated operations.

**Keywords:** Industry 4.0, Industry 5.0, *Lean Manufacturing*, Kitting, *Autonomous Mobile Robot*, *Digital Twin*, Simulation, Fleet Management System



# Índice

<b>Lista de Tabelas</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Acrónimos</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Contextualização . . . . .	3
1.3 Definição do Problema . . . . .	5
1.4 Objetivos . . . . .	6
1.5 Resultados Esperados . . . . .	7
1.6 Plano de Trabalhos . . . . .	8
1.7 Estrutura da Tese . . . . .	9
<b>2 Revisão da Literatura</b>	<b>11</b>
2.1 Fundamentos Teóricos . . . . .	11
2.1.1 Lean Manufacturing . . . . .	11
2.1.2 Indústria 4.0 . . . . .	12
2.1.3 Indústria 5.0 . . . . .	13
2.2 Trabalho Relacionado . . . . .	15
2.2.1 Base Tecnológica . . . . .	15
2.2.2 Digital Twin . . . . .	17
2.2.3 Simulação . . . . .	19
2.3 Soluções de Mercado . . . . .	21
2.4 Solução Proposta . . . . .	24
<b>3 Metodologia/Métodos</b>	<b>27</b>
3.1 Metodologia Usada . . . . .	27
3.1.1 Tópicos e Áreas de Pesquisa . . . . .	28
3.1.2 Metodologia de Desenvolvimento . . . . .	29
3.2 Processo de Implementação . . . . .	30
3.2.1 Modelo de Negócio . . . . .	31
3.2.2 Base Tecnológica . . . . .	31

3.2.3	Gestão de Zonas de <i>Kitting</i> . . . . .	33
3.2.4	Gestão da Frota de AMR . . . . .	34
3.2.5	Gémeo Digital e Simulador . . . . .	35
3.3	Requisitos do Sistema Proposto . . . . .	36
3.3.1	Requisitos Funcionais . . . . .	37
3.3.2	Requisitos Não Funcionais . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Resultados/Discussão</b>	<b>41</b>
4.1	Processo . . . . .	41
4.1.1	Intervenientes . . . . .	42
4.1.2	Modo de funcionamento . . . . .	42
4.2	Arquitetura e Componentes do Sistema . . . . .	44
4.2.1	Orientação a Eventos . . . . .	45
4.2.2	Distribuída em Microsserviços . . . . .	45
4.2.3	Veículos Autónomos . . . . .	47
4.2.4	Hub de Comunicação . . . . .	48
4.3	Fase 1 - Gestão das zonas . . . . .	48
4.3.1	Microsserviço iMES . . . . .	49
4.3.2	Microsserviço mZone . . . . .	50
4.3.3	Registo Histórico . . . . .	52
4.4	Fase 2 - Gestão da frota dos AMR - Microsserviço mAMR . . . . .	52
4.5	Fase 3 - Simulação - Microsserviço mSim . . . . .	57
4.6	Microsserviço painel de interação - WebApp . . . . .	62
4.7	Testes . . . . .	68
4.7.1	Cenário 1 - Validação das fichas e atribuição ao AMR . . . . .	68
4.7.2	Cenário 2 - Validação das missões . . . . .	69
4.7.3	Cenário 3 - Validação do Pointer . . . . .	73
4.7.4	Testes de Carga . . . . .	77
4.7.5	Verificação dos Requisitos Funcionais . . . . .	78
4.7.6	Divulgação na Feira Internacional Motek 2024 . . . . .	78
<b>5</b>	<b>Conclusão e Trabalho Futuro</b>	<b>81</b>
	<b>Referências</b>	<b>84</b>
	<b>Anexo A Protocolo de Comunicação com o AMR</b>	<b>95</b>
A.1	Meio de comunicação . . . . .	95
A.2	Eventos . . . . .	96
A.3	Subscrição . . . . .	96
A.3.1	Estado de emergência . . . . .	96
A.3.2	Variáveis internas . . . . .	96

---

A.4	Publicação . . . . .	97
A.4.1	Tarefa em curso . . . . .	97
A.4.2	Estado do AMR . . . . .	98
A.4.3	Variáveis internas . . . . .	99
<b>Anexo B</b>	<b>Protocolo de Comunicação com o <i>Pointer</i></b>	<b>101</b>
B.1	Meio de comunicação . . . . .	101
B.2	Eventos . . . . .	102
B.3	Subscrição . . . . .	102
B.3.1	Lista de peças a coletar . . . . .	102
B.3.2	AMR chegou ao ponto de coleta . . . . .	103
B.3.3	Alerta do sistema de gestão . . . . .	104
B.4	Publicação . . . . .	104
B.4.1	Check-up interno . . . . .	104
B.4.2	Início da missão de coleta . . . . .	105
B.4.3	Peça coletada . . . . .	106
B.4.4	Peça coletada com falha na leitura do código QR . . . . .	106
B.4.5	Peça ignorada . . . . .	107
B.4.6	Fim da missão de coleta . . . . .	108
B.4.7	Detalhes da peça . . . . .	108
B.4.8	Lista de anomalias . . . . .	110
<b>Anexo C</b>	<b>Participação na Feira Internacional <i>Motek 2024</i></b>	<b>113</b>



# Lista de Tabelas

2.1	Elementos que definem a Indústria 4.0 e 5.0 . . . . .	14
4.1	Vantagens das arquiteturas distribuídas vs arquiteturas monolíticas .	46
4.2	Requisitos Funcionais definidos vs implementados . . . . .	78
4.3	Requisitos Não Funcionais definidos vs implementados . . . . .	79
A.1	Dados de autenticação do AMR . . . . .	95
A.2	Formato da mensagem para alterar o estado de emergência . . . . .	96
A.3	Formato da mensagem para modificar as variáveis internas . . . . .	97
A.4	Formato da mensagem da tarefa em curso . . . . .	97
A.5	Formato da mensagem do estado atual . . . . .	98
A.6	Formato da mensagem das variáveis internas . . . . .	99
B.1	Dados de autenticação do <i>Pointer</i> . . . . .	101
B.2	Formato da mensagem com lista de peças a coletar . . . . .	102
B.3	Formato da mensagem de chegada do AMR num <i>Checkpoint</i> . . . . .	103
B.4	Formato da mensagem de alerta do sistema . . . . .	104
B.5	Formato da mensagem de estado do <i>Pointer</i> . . . . .	105
B.6	Lista de códigos de erros do <i>Pointer</i> . . . . .	105
B.7	Formato da mensagem de início de operação do <i>Pointer</i> . . . . .	105
B.8	Formato da mensagem de peça coletada do <i>Pointer</i> . . . . .	106
B.9	Formato da mensagem de peça coletada com falha do <i>Pointer</i> . . . . .	107
B.10	Formato da mensagem de peça ignorada do <i>Pointer</i> . . . . .	107
B.11	Formato da mensagem de fim de operação do <i>Pointer</i> . . . . .	108
B.12	Formato da mensagem de pedido de detalhes da peça . . . . .	109
B.13	Formato da mensagem de detalhes da peça . . . . .	109
B.14	Formato da mensagem de pedido de anomalias . . . . .	110
B.15	Formato da mensagem de lista de anomalias . . . . .	111



# Lista de Figuras

1.1	Diagrama de Gantt que descreve o plano de trabalhos . . . . .	8
3.1	Diagrama da arquitetura de uma aplicação web . . . . .	32
3.2	Diagrama da arquitetura de orquestração de <i>containers</i> . . . . .	33
3.3	Co-relação das áreas de <i>kitting</i> com a linha de produção . . . . .	34
3.4	Frota de AMR . . . . .	35
3.5	Exemplo da interface visual de um DT . . . . .	36
4.1	Diagrama BPMN com a visão geral do processo de <i>kitting</i> . . . . .	43
4.2	Arquitetura do Sistema com componentes de aplicação . . . . .	47
4.3	Diagrama BPMN com o tratamento do plano de produção enviado pelo MES . . . . .	49
4.4	Diagrama BPMN com o processo de criação das fichas de <i>kitting</i> . . . . .	51
4.5	Diagrama BPMN sobre a criação da missão de picking e entrega na linha de produção . . . . .	53
4.6	Diagrama BPMN sobre a atribuição da missão ao AMR . . . . .	54
4.7	Diagrama BPMN do processo durante a execução da missão . . . . .	55
4.8	Simulação de um caso com resultado exequível . . . . .	59
4.9	Simulação de um caso com resultado inexecuível . . . . .	59
4.10	Design das páginas do sistema informático <i>SynKit</i> . . . . .	63
4.11	Página de entrada do sistema informático <i>SynKit</i> . . . . .	64
4.12	Página de acesso às informações relacionadas ao MES . . . . .	64
4.13	Página de acesso às informações relacionadas ao <i>Kitting</i> . . . . .	65
4.14	Página de acesso às informações relacionadas à frota . . . . .	66
4.15	Página de acesso às informações relacionadas com a consulta e simulação . . . . .	67
4.16	Página de acesso às informações relacionadas com o DT . . . . .	67
4.17	AMR de testes . . . . .	69
4.18	Espaço de testes no escritório da Flowbotic . . . . .	70
4.19	Definição das rotas e <i>checkpoints</i> no <i>GoPlanning</i> , em Coimbra . . . . .	71
4.20	Simulador do <i>Pointer</i> a sinalizar o início da recolha . . . . .	72
4.21	Simulador do <i>Pointer</i> a apresentar o detalhe da peça . . . . .	72
4.22	Execução simultânea de missões por dois AMR . . . . .	73
4.23	AMR de testes com o periférico <i>Pointer</i> acoplado . . . . .	74

4.24	Definição das rotas e <i>checkpoints</i> no <i>GoPlanning</i> , em Mangualde . . .	75
4.25	Sinaliza que o AMR chegou ao ponto de coleta da peça . . . . .	75
4.26	Zona intermediária para passagem de kit entre AMR . . . . .	76
4.27	Clientes ligados versus número de instâncias dos microsserviços . . .	77
C.1	Stand na feira Motek 2024, em Stuttgart (Alemanha) . . . . .	114
C.2	Página Overview apresentada na feira Motek 2024 . . . . .	114
C.3	Página Kitting e vídeo dos testes na feira Motek 2024 . . . . .	114

# Lista de Acrónimos

<b>ACO</b>	<i>Ant Colony Optimization</i>
<b>AGV</b>	<i>Automated Guided Vehicle</i>
<b>AMR</b>	<i>Autonomous Mobile Robot</i>
<b>API</b>	<i>Application Programming Interface</i>
<b>BE</b>	<i>Back-end</i>
<b>BPD</b>	<i>Business Process Diagram</i>
<b>BPMN</b>	<i>Business Process Modeling Notation</i>
<b>CPU</b>	<i>Central Processing Unit</i>
<b>DT</b>	<i>Digital Twin</i>
<b>EDA</b>	<i>Event Driven Architecture</i>
<b>ERP</b>	<i>Enterprise Resource Planning</i>
<b>FE</b>	<i>Front-end</i>
<b>FSBCIP</b>	<i>Function-Structure-Behavior-Control-Intelligence-Performance</i>
<b>HTTP</b>	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
<b>HTTPS</b>	<i>Hypertext Transfer Protocol Secure</i>
<b>IA</b>	<i>Inteligência Artificial</i>
<b>IoT</b>	<i>Internet das Coisas</i>
<b>JIT</b>	<i>Just In Time</i>
<b>JSON</b>	<i>Java Script Object Notation</i>
<b>KPI</b>	<i>Key Performance Indicators</i>
<b>LM</b>	<i>Lean Manufacturing</i>
<b>M2M</b>	<i>Machine To Machine</i>

<b>MES</b>	<i>Manufacturing Execution System</i>
<b>MMA</b>	<i>Manipuladores Móveis Autónomos</i>
<b>MQTT</b>	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
<b>MQTTS</b>	<i>Message Queuing Telemetry Transport Secure</i>
<b>OEE</b>	<i>Eficiência Global dos Equipamentos</i>
<b>PF</b>	<i>Pull Flow</i>
<b>PLM</b>	<i>Product Lifecycle Management</i>
<b>RFID</b>	<i>Radio-Frequency IDentification</i>
<b>SCF</b>	<i>Sistemas Ciber-Físicos</i>
<b>SMS</b>	<i>Smart Manufacturing System</i>
<b>TI</b>	<i>Tecnologias de Informação</i>
<b>TO</b>	<i>Tecnologias Operacionais</i>
<b>UNS</b>	<i>Unified Namespace</i>
<b>UP</b>	<i>Unidades de Produção</i>
<b>VR</b>	<i>Virtual Reality</i>
<b>XP</b>	<i>Extreme Programming</i>

# Capítulo 1

## Introdução

No panorama dinâmico da indústria, a constante busca por eficiência e aprimoramento operacional é vital para enfrentar os desafios em evolução. Dentro desse contexto, a gestão eficaz dos processos de produção emerge como um fator-chave para o sucesso sustentável das organizações. Um dos elementos fundamentais nessa busca por excelência é a organização estratégica das zonas de preparação, onde cada peça, ferramenta e recurso desempenha um papel crucial na cadeia de produção [Wan et al., 2022].

As zonas de preparação constituem áreas estrategicamente designadas nos processos industriais, onde materiais, ferramentas e recursos são organizados de maneira eficiente, garantindo que estejam prontos para serem integrados de forma ágil e coordenada nas etapas subsequentes da produção.

A necessidade urgente de soluções práticas que podem ser aplicadas imediatamente é abordada neste trabalho, que oferece percepções valiosas para a melhoria dos processos e sistemas industriais, alinhando-se com as exigências do ambiente de trabalho cada vez mais adaptável e desafiador.

Para concluir este capítulo, expõe-se a estrutura utilizada para criar este documento, seguindo uma sequência lógica de raciocínio.

### 1.1 Motivação

O *Lean Manufacturing* (LM) [Helmold, 2020b] é uma filosofia de gestão centrada na redução do desperdício, na otimização de processos e na busca incessante pela

melhoria contínua, tudo isso com o propósito fundamental de gerar valor para o cliente. Originado no Sistema Toyota de Produção, uma metodologia desenvolvida pela própria Toyota [Kumar et al., 2022], o LM transcendeu as suas raízes industriais para se tornar uma abordagem abrangente adotada em diversas indústrias, e a nível global. Com foco na redução do desperdício, busca uma produção mais eficiente e competitiva, incentivando também a inovação e adaptação constante para atender às mudanças do mercado. Assim, o LM não é apenas uma metodologia, mas uma cultura organizacional que busca a excelência operacional, a colaboração efetiva e a satisfação do cliente.

Um dos métodos aplicados é o *Kaizen* [Helmold, 2020a], que identifica e implementa constantes melhorias do processo, de modo a aumentar o desempenho, daí o nome de melhoria contínua. Esta ferramenta defende que há sempre espaço e oportunidades de melhoria e evolução, e desafia todos os colaboradores a proporem ideias, independentemente do seu nível hierárquico.

A motivação para a realização deste trabalho segue a linha da melhoria contínua, que visa melhorar a gestão de zonas de preparação, recorrendo-se a meios tecnológicos. Evoluir o funcionamento da preparação de kits, e facilitar a execução de operações, tendo em vista uma experiência mais agradável aos colaboradores, são os principais vetores de desenvolvimento.

A possibilidade de aprimorar a comunicação com o ambiente circundante, *Manufacturing Execution System* (MES) [Shojaeinasab et al., 2022] e *Autonomous Mobile Robot* (AMR) [Alatise and Hancke, 2020], também serve de motivação para a realização deste trabalho. Isso pode ser alcançado através de uma comunicação mais clara e contínua, com base nos eventos e ações dos colaboradores. Permitiria uma interação mais transparente e fluida, promovendo uma coordenação mais eficiente e uma resposta ágil às demandas do ambiente produtivo.

A interação do utilizador com as ferramentas ao seu dispor deve ser flexível, modular e de fácil integração, utilizando uma linguagem comum para promover a diversidade de soluções, equipamentos e veículos. Possibilita criar mapas visuais com informações dos veículos, fornecendo uma visão logística e de tráfego com base nas suas localizações.

Na busca constante pela melhoria do desempenho, as mudanças necessárias podem apresentar desafios significativos durante a implementação, exigindo testes abrangentes até alcançar o resultado desejado. Nesse contexto, é crucial desenvolver soluções que não apenas simulem as mudanças planeadas, mas também antecipem de maneira proativa os impactos correspondentes. Essa abordagem visa diminuir o tempo dedicado aos testes e até mesmo acelerar a descoberta de soluções, resultando, em muitos casos, numa considerável redução de tempo e esforço.

## 1.2 Contextualização

A Indústria Transformadora é um setor económico dedicado à produção de bens ou serviços por meio de processos tecnológicos, transformando matérias-primas em produtos finais. O objetivo principal é atender às necessidades do mercado consumidor com produtos de qualidade e competitivos.

Uma linha de produção é um sistema organizado de máquinas, equipamentos, estações de trabalho e operações interligadas, dispostas de forma sequencial e estratégica, com o objetivo de fabricar um produto ou realizar um processo específico. Essa disposição permite que o produto passe por diferentes etapas de produção de forma contínua e eficiente, muitas vezes automatizada. Cada estação de trabalho é responsável por uma etapa particular do processo produtivo, agregando valor ao produto final.

Todo este processo é controlado por um sistema de informação, o MES, com o objetivo de otimizar e gerir os processos de produção, garantindo maior eficiência, controlo e visibilidade das operações. Como qualquer sistema de informação, disponibiliza informação para todas as partes interessadas, garantindo a execução dos processos codificados (qualidade). Vale a pena ressaltar que estes sistemas estão em constante evolução devido às tendências da Indústria 4.0 [Jaskó et al., 2020], e como será a próxima geração deste tipo de sistemas [Mantravadi and Møller, 2019].

Em tempos, todas as peças a agregar ao produto final eram colocadas no bordo da linha de produção, de modo e estarem rapidamente acessíveis. Mas devido à diversidade de produtos, este tipo de abordagem requer que o operador verifique quais as peças que deve agregar ao produto, o que por vezes causam confusão e erros de operação. Estes erros podem originar problemas de qualidade e micro-paragens de produção [ServiceMax, 2023]. Os fatores humanos nos sistemas de produção e logística estão a mudar, através de novas tecnologias, aplicações da Indústria 4.0 e mudanças sociais como apresentado no artigo [Sgarbossa et al., 2020]. Em virtude desse problema, foi desenvolvida a metodologia de *Kitting*, que consiste na criação de zonas com o objetivo de prepararem kits de peças destinados às respetivas *Unidades de Produção* (UP). Assim o operador não necessita de pensar sobre qual peça deve utilizar em cada operação [Tetik et al., 2021].

O transporte destes kits até às UP pode ser realizado por vários tipos de veículos, desde carrosséis, passando por carrinhos logísticos, até chegar aos veículos autónomos como os *Automated Guided Vehicle* (AGV) que representam um avanço tecnológico ao nível da logística [De Ryck et al., 2020], ou os *Autonomous Mobile Robot* (AMR) que propõem uma abordagem mais autónoma e inteligente [Fragapane et al., 2021]. Ambos os exemplos de base tecnológica representam um ganho considerável de performance.

Num ambiente industrial, todos os segundos contam de maneira que qualquer

atraso representa uma perda de produtividade e possui um alto custo, uma vez que resulta na redução da produção e no aumento dos custos operacionais. Em função dos tempos de atraso, podem ocorrer paragens de produção, o que eleva o custo e a respetiva perda de performance, podendo desencadear impactos na cadeia de abastecimento, como indicado no estudo [Siemens, 2022]. Esta performance faz parte de um conjunto de indicadores que é seguida de perto pelas hierarquias, os *Key Performance Indicators* (KPI).

O conceito de LM é apresentado no livro [Socconini, 2019a], e explica de forma prática um vasto leque de abordagens e ferramentas que tornam o processo produtivo mais eficaz e eficiente. Na essência, o LM é uma filosofia de produção que busca eliminar os desperdícios, reduzir as variações e otimizar os fluxos de trabalho, resultando em operações mais ágeis e orientadas para a eficiência. Uma das abordagens chama-se *Just In Time* (JIT) [Socconini, 2019b] e consiste na produção em função das necessidades, quando é necessário, e apenas na quantidade necessária. O mesmo livro ainda refere o *Pull Flow* (PF) [Socconini, 2019c], como um sistema de comunicação para controlar a produção, sincronizar os processos produtivos com os requisitos do cliente.

Todos os processos são alvo de alterações, com vista a melhorar o desempenho e a reduzir os custos. Estas evoluções requerem uma fase de testes e validações, com o intuito de evitar impactos no funcionamento normal da produção. Em virtude desse requisito, é realizada uma panóplia de testes de forma a simular o novo modo de funcionamento, e verificar os impactos associados. Em virtude das evoluções, nem sempre é fácil simular os processos e realizar as medições, de modo que progressivamente se utilizam ferramentas de simulação, umas mais evoluídas do que outras para evitar transtornos e contratempos na hora de aplicar no ambiente de produção.

As simulações são uma ótima ferramenta de trabalho, pois permitem replicar em ambiente virtual, todas as características e comportamentos do ambiente real, e assim analisar com mais detalhe os comportamentos dos processos, e prever anomalias indesejadas. A representação virtual de um objeto físico, sistema ou processo designa-se por Gémeo Digital, ou na sigla em inglês *Digital Twin* (DT), o qual teve a sua origem nos contextos da Indústria 4.0 [Semeraro et al., 2021]. Este emprega tecnologias como *Inteligência Artificial* e *Big Data* para criar uma réplica digital de um objeto ou processo, permitindo simulações, monitorização e análises. Essa representação virtual facilita a identificação de falhas, otimização do desempenho e tomada de decisões para melhorar a eficiência e reduzir os desperdícios [Li et al., 2022].

Os DT conjugados com as ferramentas de simulação são extremamente úteis, pois permitem recriar o ambiente de produção num ambiente isolado e seguro. Além disso possibilita a exploração de várias abordagens por forma a encontrar a melhor performance, num tempo mais reduzido [Khajavi et al., 2019].

## 1.3 Definição do Problema

Nos ambientes industriais, as zonas de preparação desempenham um papel crítico no alinhamento com o fluxo principal de produção. Essas zonas precisam de ser geridas de forma sincronizada para garantir um funcionamento eficiente. A complexidade da gestão destas áreas é significativa, pois envolve a coordenação de várias operações e o envio contínuo de kits essenciais para a linha de produção, tudo isso enquanto mantém a organização e a continuidade do processo.

Essas operações seguem geralmente uma sequência de tarefas pré-estabelecidas. No entanto, os métodos de controlo dessas operações variam, desde métodos manuais, passando por sistemas de *Pick-to-Light* baseados em códigos de barras e esquema de luzes [Stockinger et al., 2020] [Astigarraga et al., 2020], até soluções totalmente digitais com o recurso a *Smartphones* [Mkansi et al., 2020] ou até mesmo *SmartGlasses* [Plakas et al., 2020].

No entanto, essas soluções apresentam limitações ou particularidades que acabam por não atender completamente às necessidades dos ambientes industriais. Por exemplo, os sistemas de *Pick-to-Light* podem ser eficazes em ambientes específicos, mas não são muito flexíveis para lidar com variações nos processos de produção. Por outro lado, as soluções mais avançadas, como o uso de *SmartGlasses*, podem oferecer vantagens em termos de digitalização, mas a sua implementação pode tornar-se complexa e requer um investimento significativo. Além disso, a coordenação e intercomunicação entre uma variedade de equipamentos e veículos autónomos nem sempre são abordadas de forma adequada pelas soluções existentes.

Vale ressaltar que os ambientes industriais são extremamente diversificados, envolvendo uma infinidade de equipamentos, veículos, tecnologias e métodos de comunicação, muitos dos quais interligados. Porém, a heterogeneidade e a dependência destes sistemas geram desafios de coordenação e integração entre os intervenientes.

A utilização dos DT emerge como uma ferramenta inovadora, oferecendo uma visão virtual do processo industrial. Possibilita a realização de análises, ensaios e estudos exploratórios. No entanto, a sua implementação apresenta desafios significativos, pois muitas vezes não conseguem estabelecer uma relação precisa entre o mundo virtual e o real, o que dificulta a sua aplicação prática.

Estes problemas apresentam uma oportunidade: criar soluções abrangentes e modulares que convergem processos, eliminando dependências e permitindo integração e diversidade no ambiente industrial. Essas soluções buscam impulsionar a eficiência operacional, mas também promover a inovação e adaptação contínua, alinhadas com os avanços tecnológicos e industriais, mantendo o foco na redução de desperdícios e na melhoria contínua, características fundamentais do *Lean Manufacturing*.

O relatório da Gartner '*Magic Quadrant for Manufacturing Execution Systems*'

[Gartner, 2023], define o sistema MES como especialista na classe de software orientado à produção. O mesmo relatório indica as principais funcionalidades e integrações com os outros sistemas da indústria, como o *Enterprise Resource Planning* (ERP) e o *Product Lifecycle Management* (PLM), e faz uma análise das ofertas presentes no mercado. Por exemplo, a componente de simulação está presente em alguns destes produtos, mas existem limitações como o tipo de indústria, e as licenças ou a integração com os outros sistemas instalados. Outro fator a salientar diz respeito à arquitetura utilizada, que se encontra em transição para uma abordagem mais de nuvem, com recurso a *containers* e microsserviços.

O desenvolvimento de uma nova solução justifica-se pela necessidade de um sistema adaptável, modular e personalizável, que atenda eficazmente às particularidades de ambientes industriais diversificados, integrando tecnologia, flexibilidade e eficiência operacional de forma abrangente e precisa.

## 1.4 Objetivos

Considerando os desafios apresentados nas secções anteriores, este trabalho tem como objetivo principal contribuir para a otimização da gestão de zonas de kiting, através de:

- Estudo de fundamentos, tecnologias, desenvolvimentos e das principais conclusões acerca de soluções de gestão de zonas de kiting.
- Conceção e desenvolvimento de uma solução de gestão das zonas de *kitting* que permita a melhoria contínua através da simulação das operações, em ambiente virtual.

O objetivo principal do trabalho pode ser decomposto no seguinte conjunto de objetivos a atingir pelo sistema proposto:

O1 - *Gerir as zonas de kitting*: Estabelecer e organizar as zonas de *kitting*, visando uma gestão otimizada dos aprovisionamentos essenciais.

O2 - *Criar kits em função da necessidade*: Implementar a geração dinâmica de kits, alinhando-se com as solicitações específicas da produção, e otimizando o abastecimento em diferentes zonas.

O3 - *Otimizar a armazenagem das peças*: Reestruturar a organização das peças com base em dados de consumo, com o propósito de aumentar a eficiência e reduzir o tempo necessário para a montagem dos kits.

O4 - *Simular o MES*: Realizar análises simuladas do funcionamento da linha de produção e das zonas de preparação para identificar oportunidades de melhorias, sem causar impactos na produção real.

O5 - *Avaliar impactos das alterações no MES*: Após simulações, ajustar parâmetros relevantes para avaliar o seu impacto, garantindo a eficácia das mudanças sem perturbar a produção.

O6 - *Gerir a frota de AMR*: Estabelecer uma lista eficaz de AMR disponíveis para coleta e entrega de kits na linha de produção, otimizando assim o transporte interno.

O7 - *Controlar em tempo real o estado e a localização de cada AMR*: Adquirir informações em tempo real sobre o estado e a localização de cada veículo AMR, aperfeiçoando a gestão logística e a eficiência geral do processo de entrega.

## 1.5 Resultados Esperados

De acordo com os objetivos identificados na secção anterior, esperam-se obter os seguintes resultados para o sistema a conceber:

R1 - *Gestão das zonas de kitting*: Grupo de funcionalidades disponibilizadas pelo sistema, que possibilita identificar as várias zonas de *kitting*. Para cada zona preconiza-se associar as várias peças e a respetiva disposição. Presume-se ainda que exista a possibilidade de definir qual o tipo de kit utilizado. Estes resultados decorrem dos objetivos O1 e O2 enunciados na secção anterior.

R2 - *Melhoria do desempenho de cada zona*: A reorganização da disposição das peças visa a redução do tempo de montagem do kit, melhorando a eficiência do processo. Essa iniciativa também tem o potencial de ampliar a rapidez na identificação e no acesso às peças necessárias, resultando na minimização de desperdícios de tempo. Este resultado é um desdobramento do objetivo O3 mencionado na secção anterior.

R3 - *Simulação do MES*: Com as informações disponíveis na aplicação, deve ser possível simular o funcionamento da linha de produção e das zonas de *kitting*, tendo em conta os parâmetros base, tais como tempos de ciclos, tempo de operação e transporte. Desta forma será possível oscilar os respetivos parâmetros de modo a identificar possíveis pontos bloqueantes ao normal funcionamento. Estes resultados estão relacionados com os objetivos O4 e O5.

R4 - *Gestão da frota de AMR*: O sistema desenvolvido deve comunicar com os AMR instalados e disponibilizar a localização e estado de cada veículo. Estas informações devem ser apresentadas de forma visual e intuitiva para os utilizadores. Estes resultados decorrem dos objetivos O6 e O7 enunciados na secção anterior.

## 1.6 Plano de Trabalhos

De modo a atingir os objetivos propostos anteriormente, tendo em vista os resultados esperados, o desenvolvimento deste trabalho conta com as seguintes macro etapas:

- T1 - Levantamento do Estado da Arte.
- T2 - Benchmark de soluções de Mercado com o mesmo propósito.
- T3 - Estudo do modo de funcionamento atual e futuro.
- T4 - Estudo dos sistemas parceiros (MES e AMR).
- T5 - Desenho da arquitetura da solução
- T6 - Especificação e desenvolvimento da gestão das zonas.
- T7 - Especificação e desenvolvimento da gestão dos veículos autónomos.
- T8 - Especificação e desenvolvimento do módulo de simulação.
- T9 - Testes e validações.
- T10 - Documentação.
- T11 - Escrita da tese de mestrado.

A figura 1.1 apresenta a lista de macro etapas, desta vez sobre a forma de um diagrama de Gantt. Cada etapa dispõe de um nome, da respetiva duração, da data de início, e da data de fim. Neste diagrama também é possível verificar qual a relação entre as etapas, nomeadamente, qual ou quais são os pré-requisitos para iniciar.

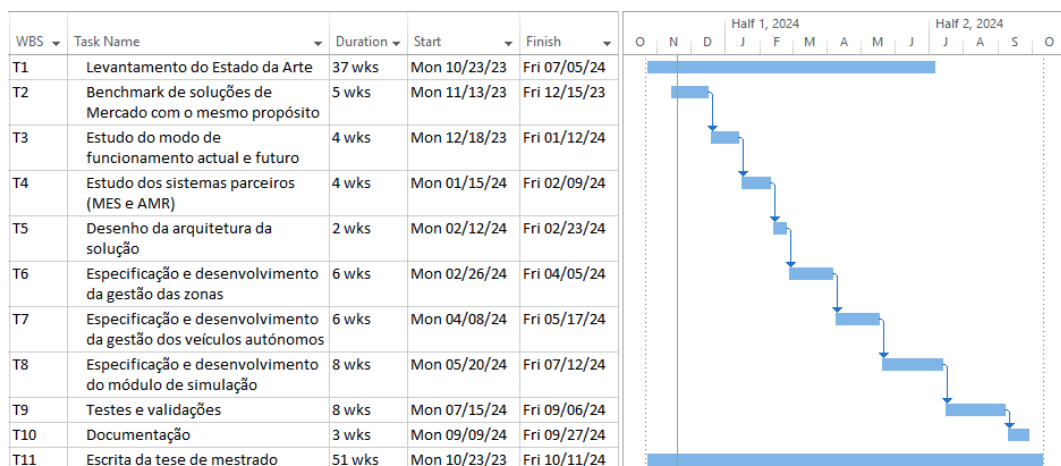


Figura 1.1: Diagrama de Gantt que descreve o plano de trabalhos

A ordem das tarefas segue as orientações da metodologia de desenvolvimento ágil *SCRUM* [Hayat et al., 2019], que visa dividir a implementação de um grande projeto em ciclos curtos chamados de *sprints* [Hayat et al., 2019], com o intuito de que no fim de cada ciclo seja possível apresentar algo ao cliente. Deste modo, o progresso do projeto torna-se sustentável, por via de sucessivos incrementos no valor do produto final e retroalimentado com os sucessivos *feedbacks* do cliente, evitando uma instalação pesada e onerosa, com vários riscos associados, entre os quais o cliente ficar desapontado com a solução final.

É possível constatar que a etapa T1 pode prolongar-se no tempo ou ser retomada em momentos posteriores, uma vez que é natural o aparecimento de trabalhos relevantes, durante as pesquisas complementares, ou fruto de revisões do conteúdo. Na mesma orientação encontra-se a etapa T11 dado que o documento final é escrito ao longo da realização do trabalho, de modo a aproveitar os pensamentos e o raciocínio fresco para documentar da melhor forma.

## 1.7 Estrutura da Tese

Esta tese está organizada e estruturada da seguinte forma: Capítulo 1 - Introdução, são apresentadas as principais motivações e a contextualização do tema. Além disso, são definidos os objetivos e respetivos resultados esperados; Capítulo 2 - Estado da Arte, fornece uma análise aprofundada das tecnologias relevantes para o projeto, juntamente com uma exploração dos cenários de pesquisa e implementação relacionados ao tema; Capítulo 3 - Metodologia, apresenta as tecnologias e arquiteturas implementadas para este estudo; Capítulo 4 - Implementação, aborda a aplicação prática do projeto e demonstra como foi executado; Capítulo 5 - Resultados, os resultados obtidos são analisados e discutidos; Capítulo 6 - Conclusão e Trabalho Futuro, nestas páginas finais, partilham-se as conclusões e ideias sobre o futuro do projeto. Por último, é apresentada uma secção de Referências, na qual todas as fontes consultadas ao longo do trabalho estão devidamente listadas.



## Capítulo 2

# Revisão da Literatura

Este capítulo tem o objetivo de analisar a literatura que vai de encontro ao contexto do trabalho a realizar. São analisadas diversas obras de carácter científico, no intuito de reunir o conhecimento produzido, e aplicar de forma empírica na resolução do problema. Para este trabalho existem duas vertentes que devem ser analisadas: a vertente do modo de funcionamento do negócio e a vertente tecnológica que servirá de suporte à nova solução.

### 2.1 Fundamentos Teóricos

Esta secção visa apresentar um vasto leque de conceitos teóricos que serão abordados ao longo do trabalho, criando assim uma base sólida de conhecimento, que servirá de suporte ao trabalho realizado.

#### 2.1.1 Lean Manufacturing

O livro [Vinodh, 2022] aborda a aplicação dos conceitos do *Lean Manufacturing* (LM) em várias indústrias, salientando a integração desses princípios na Indústria 4.0. Este apresenta fundamentos, casos de estudo e exemplos, fornecendo ideias sobre a aplicação do *Lean* no contexto da Indústria 4.0. O livro cobre uma variedade de tópicos relacionados, como ferramentas e elementos *Lean*, medidas de desempenho, seleção de projetos e estratégias de integração. Este destaca a relação entre conceitos *Lean* e a Indústria 4.0, incluindo exemplos de análise de *Eficiência Global dos Equipamentos* (OEE) e mapeamento do fluxo de valor.

O artigo [Pagliosa et al., 2021] identifica as relações entre as práticas de LM e as tecnologias da Indústria 4.0. Realizou-se uma revisão sistemática da literatura, analisando 93 estudos quanto ao conteúdo e contexto. Identificaram-se 9 tecnologias da Indústria 4.0 e 14 práticas de LM, classificadas de acordo com seu nível de aplicação no fluxo de valor e sinergia. Das 126 relações em pares, 24 foram consideradas de alta sinergia, evidenciando uma interação positiva entre as práticas de LM e as tecnologias da Indústria 4.0 na melhoria do desempenho operacional. O estudo também sugere três oportunidades de pesquisa futura: validar as sinergias propostas, distinguir os efeitos das relações em diferentes níveis de fluxo e examinar o impacto dessas relações no desempenho operacional.

O estudo [Kamble et al., 2020] investiga o impacto da Indústria 4.0 nas práticas do LM e no desempenho organizacional sustentável. Os resultados sugerem efeitos significativos, tanto diretos quanto indiretos, da Indústria 4.0 no desempenho organizacional sustentável. Além disso, confirmam a forte influência das práticas de LM como uma variável mediadora nesse processo. A pesquisa foi baseada em dados recolhidos junto de 205 gestores de 115 empresas de fabrico. Esses resultados contribuem para uma compreensão mais ampla da Indústria 4.0, identificando-a como um facilitador das práticas de LM, o que contribui para o aumento do desempenho organizacional sustentável.

### 2.1.2 Indústria 4.0

O conceito da Indústria 4.0 engloba várias tecnologias digitais impactando as empresas de manufatura, mas há carência de pesquisa abrangente sobre suas aplicações nos processos de ciclo de vida de manufatura. O artigo [Zheng et al., 2021] revisa 186 estudos, dando evidência ao agendamento e controlo de produção como os processos mais investigados. A orientação para serviços e a gestão de cadeia de abastecimento circular são tendências crescentes. Há um uso extensivo e combinado de *Internet das Coisas* (IoT), Análise de *Big Data* e Computação em Nuvem em diversos processos, mas outras tecnologias, como *Blockchain*, não são amplamente discutidas.

Nas últimas décadas, a Indústria 4.0 expandiu-se globalmente com muitos países a adotar as suas tecnologias. O progresso e o uso dessas tecnologias variam bastante de acordo com o tipo de indústria e a região. Cada setor e país têm níveis diferentes de avanço, o que mostra como a implementação dessas tecnologias pode ser complexa e diversificada em vários ambientes industriais e geográficos. Contudo, a Comissão Europeia introduziu a Indústria 5.0, que prioriza valores sobre tecnologia. O artigo [Xu et al., 2021] explora cinco questões-chave: 1) A Indústria 4.0 foca muito na tecnologia, negligenciando a centralidade humana, sustentabilidade e resiliência? 2) As tecnologias da Indústria 4.0 podem atender aos objetivos da Indústria 5.0 ou são necessárias novas tecnologias? 3) A Indústria 5.0 é uma continuação cronológica da

Indústria 4.0, como seus predecessores? 4) Estamos a viver uma transição entre duas Revoluções Industriais ou uma revolução tecno-social única? 5) Como se diferenciam as jornadas da Indústria 4.0 e da Indústria 5.0? O objetivo é estimular debates imparciais e contínuos sobre esses temas.

### 2.1.3 Indústria 5.0

A indústria está a passar por uma evolução tecnológica, com a passagem da Indústria 4.0 para a Indústria 5.0. A Indústria 5.0 coloca maior ênfase no papel dos colaboradores e responde à complexidade dos produtos e produção, especialmente evidenciada durante a pandemia de COVID-19. Em [Zizic et al., 2022] são discutidos os motivadores, facilitadores e diferenças entre os dois paradigmas com foco em pessoas, organização e tecnologia. A conclusão destaca a mudança em direção à centralização no ser humano e também analisa modelos de maturidade para avaliar a preparação das empresas em adotar essas mudanças.

Em [Akundi et al., 2022] são analisadas as tendências de pesquisa relacionadas com a Indústria 5.0 através da utilização de técnicas de mineração de texto em 196 artigos. Os termos-chave mais comuns incluem *Inteligência Artificial* (IA), *Big Data*, cadeia de abastecimento, transformação digital, aprendizagem automática e IoT. Cinco principais temas de pesquisa na Indústria 5.0 são a otimização da cadeia de abastecimento, inovação empresarial digital, produção inteligente e sustentável, transformação impulsionada por IoT, IA e *Big Data*, e a interligação entre seres humanos e máquinas. Estas áreas estão a atrair cada vez mais atenção na comunidade de investigação.

A Indústria 5.0 representa uma evolução significativa na indústria, com um foco na colaboração entre especialistas humanos e máquinas inteligentes para criar soluções de fabricação altamente eficientes e personalizadas. [Maddikunta et al., 2022] apresenta uma visão inicial dessa revolução industrial, explorando as possíveis aplicações e tecnologias de suporte. Introduce novos conceitos e definições da Indústria 5.0, oferecendo diversas perspetivas sobre o assunto. Além disso, fornece uma análise detalhada das aplicações práticas da Indústria 5.0, abrangendo áreas como cuidados de saúde inteligentes, fabricação em nuvem, gestão da cadeia de abastecimento e produção industrial. Também discute as tecnologias que sustentam essa evolução, tais como computação na fronteira, DT, robôs colaborativos, IoT, *Blockchain* e as futuras redes 6G.

A Indústria 5.0 representa uma transformação global focada no bem-estar humano e nas metas sociais sustentáveis. No entanto, a pesquisa nessa área ainda está em estágios iniciais. O estudo [Leng et al., 2022] analisa as principais características da Indústria 5.0, incluindo o foco no ser humano, sustentabilidade e resiliência. Propõe uma arquitetura tridimensional para sua implementação, abrangendo aspetos

técnicos, da realidade e de aplicação. Além disso, explora impulsionadores, caminhos de implementação, possíveis aplicações e desafios práticos da Indústria 5.0. O estudo também destaca as limitações na pesquisa atual e sugere as direções futuras. Isso ajuda a organizar o entendimento da Indústria 5.0 e o seu potencial impacto.

Porém, o artigo [Adel, 2022] discute as oportunidades e limitações da Indústria 5.0, que muda o paradigma, enfatizando a colaboração entre humanos e máquinas, visando melhorar a satisfação do cliente por meio de produtos personalizados. A pesquisa explora aplicações da Indústria 5.0 em áreas como saúde, cadeia de abastecimento, produção, e tecnologias como análise de *Big Data*, IoT, robôs colaborativos, *Blockchain* e sistemas 6G, e os desafios na integração de robôs e pessoas.

Recentemente, têm surgido duas perspectivas futuristas de grande interesse: a Indústria 5.0 e a Sociedade 5.0. A Indústria 5.0 foi anunciada pela Comissão Europeia com o objetivo de criar uma indústria europeia sustentável, centrada no ser humano e resiliente. A Sociedade 5.0 foi proposta pelo Gabinete do Japão para equilibrar o avanço econômico com a resolução de problemas sociais na sociedade japonesa. Historicamente, as revoluções industriais e sociais têm interagido profundamente desde a primeira revolução industrial. A coexistência da Indústria 5.0 e da Sociedade 5.0 levanta várias questões que precisam ser esclarecidas. Neste sentido, [Huang et al., 2022] compara, complementa e destaca a coevolução entre a Indústria 5.0 e a Sociedade 5.0, fornecendo argumentos que servem de inspiração para investigações futuras e discussões que impulsionarão o desenvolvimento de ambas.

A evolução industrial passou por várias fases, da mecanização à automação e à digitalização. Atualmente, a Indústria 4.0 e a Indústria 5.0 representam duas etapas distintas nesse percurso. A tabela 2.1 destaca as principais características das duas revoluções industriais.

Elementos	Indústria 4.0	Indústria 5.0
<b>Prioridade</b>	Automação e digitalização de processos	Colaboração entre humanos e máquinas
<b>Tecnologia</b>	IoT, <i>Big Data</i> , DT	Integrada com IA, Robótica Avançada, Realidade Aumentada
<b>Centralização</b>	Tecnologia e máquinas	Bem-estar humano centralizado nos sistemas
<b>Objetivo</b>	Aumento da eficiência e automação	Maior flexibilidade, personalização e sustentabilidade
<b>Comunicação</b>	Máquinas interligadas e comunicação eficiente	Colaboração entre humanos e máquinas
<b>Resultados</b>	Melhorias em eficiência, produtividade	Sistemas resilientes e adaptação eficiente
<b>Contribuição</b>	Avanço tecnológico no chão de fábrica	Maior foco na resolução de problemas sociais e ambientais

Tabela 2.1: Elementos que definem a Indústria 4.0 e 5.0

A mudança de paradigma apresenta-se de forma mais clara. Enquanto a Indústria 4.0 enfatiza a automação e a eficiência, a Indústria 5.0 foca mais na colaboração entre humanos e máquinas, na busca por soluções personalizadas e sustentáveis para as necessidades humanas e ambientais.

## 2.2 Trabalho Relacionado

Nesta secção é feita uma análise de trabalhos desenvolvidos na área que este projeto se insere, por forma a identificar o que já foi feito e salientar as lacunas ou limitações identificadas. O projeto a desenvolver terá em consideração estas limitações e proverá um meio de dar resposta às mesmas.

### 2.2.1 Base Tecnológica

A base tecnológica permite criar os alicerces do projeto que será desenvolvido, tendo como orientações as ferramentas mais apropriadas para o contexto em causa. Esta base deve suportar o âmbito definido e as funcionalidades estabelecidas, mas também proporcionar uma visão de evolução, considerando uma visão a curto e médio prazo.

Num projeto *Web* tradicional, o código do *Front-end* (FE) (a parte da aplicação que os utilizadores interagem diretamente) e do *Back-end* (BE) (a parte que lida com a lógica de negócios e o processamento dos dados) está altamente misturado. Isso gera uma grande pressão no servidor, pois os recursos estáticos e dinâmicos são misturados no servidor. Se surgirem problemas no servidor, tanto o FE quanto o BE podem colapsar simultaneamente, resultando numa experiência terrível para o utilizador. Com a crescente procura de desempenho dos projetos na era do *big data*, a arquitetura que mistura FE e BE não consegue atender gradualmente às necessidades das aplicações. A separação entre FE e BE tornou-se uma direção para projetos *Web*. Com o avanço das técnicas de FE, surgiram alguns frameworks, como *React*, *Angular* e *Vue*. O artigo [Gong et al., 2020] apresenta um sistema de informações académicas com uma arquitetura de software baseada em *Spring Cloud* para microsserviços e *React* para a separação de FE e BE. As principais técnicas e implementações usadas no sistema são descritas. Através do desacoplamento de FE e BE, a capacidade de carga do sistema foi significativamente aumentada e o bom desempenho do sistema destaca as vantagens do design de microsserviços e separação de FE e BE.

O aumento exponencial de dispositivos inteligentes no contexto IoT gerou um cenário complexo de comunicação entre esses dispositivos. [Mishra and Kertesz, 2020] foca a análise do crescimento da pesquisa sobre protocolos *Machine To Machine*

(M2M) nas últimas duas décadas, com ênfase no protocolo MQTT. A análise quantitativa destaca estudos relevantes dos últimos cinco anos sobre o MQTT, apresentando características, vantagens e limitações. Além disso, propõe uma taxonomia para comparar implementações do MQTT, como *brokers* e bibliotecas, visando auxiliar pesquisadores e utilizadores na escolha eficiente dessas ferramentas.

Devido ao volume de dados gerados pelos dispositivos os sistemas informáticos destinados aos ambientes industriais que possuem uma ligação direta com robôs, ou veículos autônomos, têm tendência a gerar um grande volume de dados relacionados com as operações que executam durante o dia-a-dia. O artigo [Valduriez et al., 2021] explora a evolução do cenário das bases de dados, destacando o surgimento do *NoSQL* para lidar com requisitos complexos de *big data* em aplicações *web* e em nuvem. O *NewSQL* surge como uma tecnologia mais recente que combina a escalabilidade e disponibilidade do *NoSQL* com a consistência e usabilidade do *SQL*. O *NewSQL* busca superar desafios como a escalabilidade de transações em cargas de trabalho mistas operacionais e analíticas (HTAP) sobre grandes conjuntos de dados. O artigo destaca os princípios básicos do *NewSQL*, destacando sistemas avançados como *Spanner* e *LeanXcale*, que abordam a gestão escalável de transações. O *NewSQL* oferece oportunidades inovadoras em domínios de aplicação onde as decisões em tempo real são cruciais, simplificando a gestão de dados ao eliminar barreiras tradicionais entre *NoSQL* e *SQL*, bem como entre bases de dados operacionais e *data warehouse/data lake*.

O estudo [Gkamas et al., 2022] aborda o desafio de armazenar e processar grandes volumes de dados sensoriais em aplicações de IoT e Indústria 4.0, propondo uma abordagem centrada na nuvem para aquisição e armazenamento de dados. Foram avaliados três sistemas de gestão de bases de dados distribuídos (MongoDB e PostgreSQL, com esquemas JSON e relacionais) quanto a tempo de resposta, débito e falhas em cenários de inserção de dados, consultas de seleção e funções de agregação. Os resultados mostram que PostgreSQL relacional supera MongoDB em funções de agregação e consultas complexas, enquanto MongoDB é mais eficiente em inserções massivas e escalabilidade horizontal, alcançando até 2 vezes maior débito em casos com 6 e 8 shards. PostgreSQL com JSON teve melhor tempo de resposta que MongoDB em inserções com menos de 6 shards, mas MongoDB destacou-se no débito geral. Esses achados fornecem orientações para a escolha de DBMS em contextos de IoT e Indústria 4.0, considerando necessidades específicas de desempenho e escalabilidade.

O estudo [Mao et al., 2020] aborda a crescente integração da tecnologia em nuvem nos processos internos das empresas, com foco na abordagem "*cloud-native*" para o desenvolvimento e execução de aplicações. A pesquisa analisa o desempenho de aplicações computacionais intensivas, como *big data* e *deep learning*, num ambiente "*cloud-native*" utilizando tecnologias de virtualização baseadas em *containers*,

como *Docker* e *Kubernetes*. A análise abrange métricas essenciais, como tempo de conclusão e utilização de recursos, revelando variações significativas. Os resultados destacam a importância das configurações e esquemas de gestão de recursos, mostrando uma redução de até 79,4% no tempo de conclusão com ajustes específicos e aumentos de até 96,7%, dependendo dos esquemas de gestão de recursos. Além disso, observa-se um atraso de até 116,7% na libertação de recursos em diferentes sistemas.

O livro [Arundel and Domingus, 2019] explora o papel do *Kubernetes* como o sistema de orquestração do mundo nativo da nuvem, oferecendo uma plataforma confiável e escalável para executar cargas de trabalho em *containers*. Os autores, especialistas em computação na nuvem, John Arundel e Justin Domingus, orientam os programadores e as equipas de operações sobre a aplicação de práticas *DevOps*, padrão da indústria, ao *Kubernetes* num contexto nativo da nuvem. A obra abrange o ecossistema do *Kubernetes*, fornecendo soluções testadas na prática para desafios comuns. De forma pragmática, é possível verificar as capacidades do *Kubernetes* e como utilizá-lo, construindo passo a passo uma aplicação nativa da nuvem, a sua infraestrutura de suporte, ambiente de desenvolvimento e um *pipeline* de implementação contínua.

O estudo [Rahmatulloh et al., 2022] aborda os desafios na implementação de microsserviços, destacando a flexibilidade e organização que eles oferecem em comparação com a arquitetura monolítica, mas também os problemas de comunicação síncrona via HTTP ou API, além das questões de escalabilidade e desempenho. Para resolver esses problemas, propõe-se a utilização de tecnologia de *containers* integrada com *Event Driven Architecture* (EDA), que adota comunicação assíncrona entre os microsserviços. A pesquisa comparou o desempenho da EDA com o modelo *API-Driven*, avaliando o tempo de resposta, taxa de erro e o uso de *Central Processing Unit* (CPU). Os resultados mostraram que a EDA apresentou um aumento de 19,18% no tempo de resposta, uma redução de 34,40% na taxa de erro, embora tenha consumido 8,52% a mais de CPU. Em suma, a EDA melhorou a escalabilidade e o desempenho dos microsserviços, com respostas mais rápidas e menor taxa de erros, embora o maior uso de recursos de CPU deva ser considerado.

Uma vez definida a base tecnológica, nas secções seguintes será efetuada a representação virtual do processo de fabricação, DT, e a vertente de simulação de modo a explorar o ambiente representado pelo DT.

### 2.2.2 Digital Twin

O DT é uma representação virtual do processo de fabricação, que está instalado no mundo físico e reflete todos os acontecimentos e comportamentos em tempo real.

O artigo [Qi et al., 2021] destaca a revolução causada pela tecnologia de *Digital Twin* (DT) na indústria, permitindo a criação de modelos sofisticados que replicam

virtualmente diversos aspectos de um produto, processo ou serviço com base em dados de sensores e históricos. Embora essa tecnologia receba grande atenção, o texto aponta que ainda não atingiu todo o seu potencial, enfrentando desafios complexos e um processo demorado. Para criar DT, os pesquisadores têm de modelar todas as partes dos objetos ou sistemas, recolhendo e integrando vários tipos de dados. Muitos profissionais na área de engenharia ainda têm dúvidas sobre quais tecnologias e ferramentas utilizar. O artigo propõe um modelo de DT em 5 dimensões como referência para compreender e implementar essa tecnologia. A partir dessa perspectiva, investiga e resume as tecnologias e ferramentas frequentemente utilizadas, visando fornecer referências para sua aplicação futura.

O artigo [Lu et al., 2020] analisa o desenvolvimento recente das tecnologias de DT em sistemas e processos de fabricação para compreender a sua conotação, cenários de aplicação e questões de investigação na manufatura inteligente impulsionada por DT, no contexto da Indústria 4.0. Para compreender os DT e o seu potencial futuro na manufatura, é apresentada uma definição e os resultados atuais do estado-da-arte no desenvolvimento de DT. As tecnologias existentes para criar um DT na manufatura inteligente são revistas sob um modelo de referência de DT, a fim de sistematizar a metodologia de desenvolvimento. São também apresentadas aplicações representativas com ênfase na correspondência com o modelo proposto.

O estudo [He and Bai, 2021] aborda a manufatura inteligente, como um sistema de produção de última geração que oferece melhor qualidade, produtividade aprimorada, custos reduzidos e maior flexibilidade na fabricação. Além disso, foca na crescente importância da sustentabilidade na manufatura. Destaca o papel da tecnologia de DT, que permite supervisionar sistemas de manufatura em tempo real e prever falhas. O mesmo estudo analisa detalhadamente os componentes da manufatura inteligente, como equipamentos, sistemas e serviços, bem como discute a sustentabilidade associada a essa abordagem. Também explora a tecnologia de DT e sua aplicação na manufatura inteligente. Ao avaliar o estado atual da manufatura inteligente, o estudo [He and Bai, 2021] oferece orientações sobre as futuras direções de desenvolvimento dessa abordagem inovadora para a produção.

O artigo [Shah et al., 2021] apresenta um *framework* de DT construído inteiramente com programas de software gratuitos e de código aberto, demonstrado num sistema portátil de controlo de temperatura de pequenas dimensões. Além do desenvolvimento do sistema físico, é construído um modelo matemático, usado como sua contraparte digital para executar simulações e prever futuras falhas. Aquando da operação em tempo real, o modelo matemático é observado para analisar falhas do sistema no futuro próximo. A prevenção de tais falhas é alcançada usando o sistema digital, fornecendo entradas de controlo ao sistema físico em tempo real. Essa capacidade é demonstrada ao criar um cenário hipotético onde um ponto de falha é forçado no sistema. Posteriormente, uma correção automática é observada

pelo DT para evitar uma potencial catástrofe. Além disso, é criado um modelo de simulação para visualizar os resultados.

O artigo [Pang et al., 2021] apresenta uma visão do estado atual da tecnologia de DT em operações industriais. Ambas são tecnologias transformadoras que melhoram a eficiência do *design* e manufatura. O DT é crucial na digitalização da Indústria 4.0, mas a grande quantidade de dados gerados por este apresenta desafios de gestão, processamento e armazenamento. O texto descreve o desenvolvimento de um *framework* que combina DT para melhorar a gestão de dados, impulsionar a inovação, aprimorar o processo de produção e garantir a continuidade e rastreabilidade da informação. Esse *framework* incorpora simulação de comportamento e componentes de controlo físico, para facilitar a troca de informações e impulsionar a inovação, almejando que otimize os processos operacionais e a rastreabilidade de informações no mundo físico, especialmente num ambiente de estaleiro industrial.

O artigo [Leng et al., 2021] aborda o desafio de projetar *Smart Manufacturing System* (SMS) complexos, nos quais os designers, muitas vezes, só conseguem projetar subsistemas com base numa compreensão limitada da dinâmica global. A introdução da tecnologia de DT é proposta como uma solução inovadora para realizar simulações semi-físicas, antecipando erros de design e reduzindo custos e tempo associados aos testes e ajustes físicos. O artigo apresenta um novo *framework* chamado *Function-Structure-Behavior-Control-Intelligence-Performance* (FSBCIP), que revisa como as tecnologias de DT são integradas e promovem o design de SMS. São apresentadas definições, *frameworks*, passos de design, modelos, tecnologias habilitadoras e casos de design de habilitadoras no contexto do design de SMS, proporcionando uma visão sobre as preocupações industriais urgentes na era da Indústria 4.0.

### 2.2.3 Simulação

A simulação é uma ferramenta de extrema importância no contexto industrial, uma vez que permite aplicar alterações ao processo, num ambiente seguro, e analisar os respetivos impactos sem causar perturbações no processo produtivo em curso.

O artigo [Detty and Yingling, 2000] identifica a dificuldade que existe na demonstração dos ganhos de performance, associados à aplicação dos princípios do LM. A solução proposta recorre à simulação de processos para avaliar os ganhos, face à situação atual, e servir de suporte à decisão final. O trabalho desenvolvido consiste na criação de um modelo da linha de produção atual, incluindo os principais processos envolventes (armazenamento, inventário, transporte e controlo/planejamento de produção) e outro modelo baseado no primeiro, mas com as respetivas alterações no processo. Os resultados obtidos em ambos casos são colocados lado a lado, e denota-se a redução de custos e o respetivo ganho de performance, no modelo que contempla o LM. No entanto, houve alguma limitação no tempo, o que fez com

que não houvesse diversidade nos produtos e limitou a recolha de dados a apenas 3 células de produção e 2 modelos do produto.

O estudo [de Paula Ferreira et al., 2020] enfatiza a importância da simulação na Indústria 4.0, otimizando decisões e o design de sistemas de produção inteligentes. Um modelo conceitual descreve a Indústria 4.0 em termos de tecnologias e princípios para a simulação. A revisão abrangente da literatura sobre simulação e princípios da Indústria 4.0 revela um aumento nas publicações recentes. Foram também identificadas 10 abordagens de simulação e 17 princípios da Indústria 4.0. A pesquisa destaca ainda a eficácia da simulação na compreensão e aplicação dos princípios da Indústria 4.0.

O artigo [Friederich et al., 2022] descreve a adoção de DT em fábricas inteligentes para modelar estados reais de sistemas de fabricação por meio de simulações com atualização em tempo real. Esse uso é associado ao aumento da produtividade, à redução dos custos e ao consumo de energia. Devido à rápida transição das fábricas e aos ciclos de vida mais curtos dos produtos em função das mudanças nas demandas dos clientes, os métodos tradicionais de modelagem e simulação tornam-se inadequados. Como solução, é proposto um *framework* genérico baseado em dados para a geração automática de modelos de simulação como base para DT em fábricas inteligentes. A novidade reside na abordagem baseada em dados, aproveitando avanços em aprendizagem de máquina e técnicas de mineração de processos, bem como na melhoria contínua e validação do modelo. O objetivo é minimizar ou eliminar a necessidade de conhecimento especializado na extração de modelos de simulação correspondentes. O *framework* é ilustrado por meio de um estudo de caso.

O artigo [Mourtzis, 2020] aborda a necessidade de investigar alternativas para projetar sistemas de fabricação mais eficientes devido à rápida evolução da tecnologia. A simulação de sistemas de fabricação é destacada como uma ferramenta poderosa para esse fim, oferecendo baixo custo, análise rápida, baixo risco e ideias significativas para melhorar a compreensão da influência de cada componente. A simulação é fundamental para a implementação bem-sucedida da fabricação digital, permitindo experimentação e validação de design e configuração de produto, processo e sistema. O artigo examina os marcos históricos na evolução das tecnologias de simulação de sistemas de fabricação, analisa abordagens recentes na indústria e na pesquisa, destaca como a digitalização da fabricação influenciou a simulação e avalia novas abordagens na literatura. O foco está nas tecnologias em ascensão nas fábricas digitalizadas do futuro, oferecendo várias vantagens na simulação de aplicações industriais.

A tese [de Melo Costa and Leite, 2017], apresenta um projeto de melhoria das operações logísticas, utilizando a filosofia 5S e um estudo do processo de *picking* com a aplicação de um algoritmo de otimização combinatória. Os principais problemas eram a desorganização generalizada e a falta de padronização nas operações

logísticas. As mudanças resultaram em melhorias gerais nos processos logísticos, particularmente na operação de *picking*.

Com uma outra abordagem, a tese [Ramos, 2017], explora a atividade de recolha e separação de pedidos, utilizando simulação computacional para analisar o impacto de estratégias e tecnologias nesta atividade. O estudo de caso foi realizado numa empresa distribuidora de peças de automóveis, a qual atualmente não usa estratégias ou tecnologias para reduzir o tempo de recolha dos itens. Após analisar o contexto e os procedimentos do armazém, identificou-se que o método de recolha por lote, juntamente com rotas de heurística combinada, é a abordagem mais adequada para a empresa, podendo reduzir o tempo do processo de recolha em até 40%. Além disso, o uso da tecnologia de Radio Frequência pode economizar mais 15% no tempo de *picking*. Com base nos dados coletados, e simulações em quatro modelos diferentes no software Arena.

A tese [Dias, 2022] propõe a implementação de um DT, que replica os dispositivos físicos, permitindo que os engenheiros analisem recursos, compreendam os comportamentos e otimizem os processos de forma económica. O foco da dissertação é criar uma infraestrutura eficiente para suportar a implementação de um DT, com ênfase na aquisição e armazenamento de dados. O objetivo principal é estabelecer um sistema eficaz com alta capacidade de processamento e armazenamento de dados para a indústria.

## 2.3 Soluções de Mercado

O software destinado à gestão do processo de *kitting* possui diversas características projetadas para otimizar o processo de preparação e montagem de kits e geralmente apresentam diversas características específicas para atender às necessidades desse contexto. Algumas das principais características incluem: Rastreamento em tempo real; Integração com tecnologias emergentes; Otimização do processo; Geração automática de listas; Flexibilidade e escalabilidade; Comunicação eficiente.

Na investigação do estado atual de soluções para gestão de *kitting*, constatamos que existe uma lacuna significativa na disponibilidade de sistemas ou software concebido para atender de forma integral e flexível às demandas específicas que este projeto busca abordar. Ao explorar o domínio do software de *kitting* disponível, verifica-se a ausência de soluções que ofereçam as características essenciais necessárias para uma otimização abrangente, ágil e adaptável.

Um exemplo concreto deste tipo de software é o *SAP Extended Warehouse Management* [SAP, 2023], o qual é amplamente utilizado na indústria para gestão de *kitting*. No entanto, uma análise detalhada desta solução revela que as suas funcionalidades estão mais alinhadas com contextos menos dinâmicos e não se ajustam

completamente às demandas da gestão de zonas de *kitting* em ambientes industriais dinâmicos.

Em contrapartida, o *Critical Manufacturing MES V10* [Manufacturing, 2023] é um software que oferece funcionalidades valiosas para a gestão de *kitting*, incluindo a otimização de rotas e DT. No entanto, é crucial observar que o foco principal deste software reside na gestão abrangente do processo produtivo como um todo. Apesar das suas capacidades significativas, a orientação geral do software limita a sua flexibilidade e especialização para atender de maneira ideal às demandas específicas da gestão de áreas de *kitting*.

Além disso, ao examinar outro software notável na área, o *Oracle Supply Chain Management* [Oracle, 2023], observa-se que, embora ofereça algumas funcionalidades relevantes para a gestão de *kitting*, a sua falta de integração eficiente com as tecnologias emergentes, como DT e Simulação, limita a sua capacidade de proporcionar uma visão holística e adaptável.

Este vazio no mercado ressalta a necessidade de uma abordagem mais holística e personalizada, conforme proposto neste estudo, que busca integrar princípios do LM, tecnologias da Indústria 4.0 e 5.0, DT e Simulação para preencher essa lacuna de eficiência e flexibilidade. Ao destacar essas limitações, reconhecemos a oportunidade de avançar para soluções mais abrangentes que atendam às exigências específicas de gestão de zonas de *kitting* em ambientes industriais dinâmicos e em constante evolução.

As práticas logísticas existentes lutam frequentemente para gerir eficazmente as perturbações, o que levou a apelos para abordagens mais dinâmicas e orientadas digitalmente para criar redes logísticas flexíveis e sustentáveis. O estudo [Aron et al., 2023] pretende explorar as interdependências entre ativos físicos e digitais, examinando como os sistemas Ciber-Físicos poderão permitir a interoperabilidade em redes logísticas. Fornece uma visão geral da literatura existente sobre aplicações Ciber-Físicas em logística e propõe um modelo conceptual de um sistema de manuseamento de materiais na nuvem. Este modelo aproveita as tecnologias digitais para captar e processar informação em tempo real sobre uma rede logística, permitindo a alocação dinâmica de recursos de movimentação de materiais e promovendo a partilha de ativos e infraestruturas. O modelo ilustra como a computação em nuvem, a aprendizagem automática e a informação em tempo real podem ser utilizadas para otimizar a alocação de recursos nos fluxos de produtos. A adoção deste modelo pode potencialmente aumentar a eficiência, a resiliência e a sustentabilidade das práticas logísticas. O artigo identifica também várias direções de investigação promissoras para uma exploração mais aprofundada deste tema.

O artigo [Ghodsian et al., 2023] aborda os desafios e oportunidades associados

à integração de *Manipuladores Móveis Autónomos* (MMA) como *Sistemas Ciber-Físicos* (SCF) em ambientes de fabrico modernos, impulsionados pela quarta revolução industrial e pela necessidade de sistemas de produção flexíveis. À medida que a procura de MMA cresce devido ao seu potencial para aumentar a flexibilidade de produção, há necessidade de um quadro estruturado para maximizar os seus benefícios nos sistemas de produção existentes. O artigo propõe uma estrutura abrangente para a integração de MMA nos sistemas de produção atuais. Esta estrutura enfatiza a compreensão e o aproveitamento dos processos de produção e dos sistemas de controlo existentes para melhorar o desempenho do sistema com as novas funcionalidades oferecidas pelos MMA. A integração passa pelo alinhamento de novas operações de MMA com o sistema de controlo de produção existente através de blocos paramétricos definidos, facilitando uma maior autonomia na linha de produção. A estrutura abrange quatro dimensões principais: integração física, integração comunicacional, integração funcional e operacional e integração digital. Foi aplicado a uma linha de produção de investigação denominada Plataforma 4.0 na *Arts et Métiers*, onde foi incorporado um MMA denominado MoMa da *OMRON Company* para validar o *framework*. Os resultados desta aplicação no mundo real demonstraram que o MoMa aumentou efetivamente a flexibilidade, a autonomia e a eficiência do sistema de produção utilizando sinais de comando MES.

O problema abordado no estudo [Ghodsian et al., 2024] é a necessidade crescente de flexibilidade e adaptabilidade nos sistemas de produção modernos. Para resolver isto, é proposta uma estrutura abrangente para incorporar MMA nos sistemas de produção existentes. Este *framework* assenta numa arquitetura modular, orientada a serviços e com descentralização adaptativa, que se centra na interoperabilidade em tempo real e na utilização de capacidades virtuais, garantindo a integração eficaz dos MMA como SCF. Os métodos incluem o desenvolvimento e aplicação desta estrutura a uma linha de produção de investigação referida no parágrafo anterior, e dá continuidade ao trabalho já desenvolvido no artigo [Ghodsian et al., 2023]. Os resultados demonstram que a estrutura aumenta significativamente a flexibilidade, autonomia e eficiência do sistema de produção, com a integração bem sucedida gerida por um MES, mostrando o seu potencial para transformar os processos de produção em linha com os princípios da Indústria 4.0.

O artigo [Pan et al., 2024] explora os desafios e as soluções associados ao modo de produção de kits, que é popular entre as empresas de fabrico pela sua capacidade de fornecer produtos personalizados através de combinações versáteis. Este modo de produção introduz dificuldades de gestão significativas, incluindo a necessidade de coordenação horizontal entre as fases de produção (tais como produção, transporte e armazenamento) e de coordenação vertical do progresso da produção para diferentes produtos dentro do kit. Além disso, requer a gestão de perturbações dinâmicas durante as operações de produção. O artigo propõe uma plataforma inteligente de

gestão da produção de kits para enfrentar estes desafios. Esta plataforma apresenta uma arquitetura de DT multi-nível para controlo, um mecanismo de sincronização de “dois estágios e três níveis” para controlo qualitativo e um método de cascata de alvos baseado em algoritmos genéticos para soluções quantitativas. Significado: Dois planos de *kitting* (inicial e corrigido) e três níveis operacionais (oficina, departamento e empresa). Em conjunto, estes componentes permitem um controlo sincronizado eficaz da produção de kits em ambientes dinâmicos. Os métodos propostos foram validados através de uma simulação de estudo de caso, que confirmou a sua viabilidade e eficácia. O estudo também fornece informações sobre a forma como os diferentes níveis de perturbações dinâmicas em diferentes momentos afetam o sistema logístico de produção, oferecendo orientações valiosas para melhorar as práticas de gestão.

O artigo [Zafarzadeh et al., 2023] analisa a crescente complexidade dos sistemas de manuseamento de materiais devido aos fatores como a personalização, as novas tecnologias de produtos, os requisitos de circularidade e o aumento das interações na rede de fornecimento. Neste ambiente dinâmico, a utilização de robôs pode aumentar a eficiência dos sistemas de movimentação de materiais. No entanto, a investigação sobre a colaboração humano-robô no manuseamento de materiais tem sido limitada, particularmente no que diz respeito de como abordar os requisitos de fluxo de dados tanto de humanos como de robôs. Além disso, desafios específicos como a baixa visibilidade devido ao movimento constante de pessoas, robôs e materiais não foram completamente explorados. Para enfrentar estes desafios, o artigo propõe uma estrutura concebida para uma colaboração segura e eficiente entre humanos e robôs no manuseamento de materiais. Esta estrutura incorpora tecnologias multimodais e considera aspetos como a cognição humana, a assistência robótica, a deteção em tempo real e o conhecimento humano. A estrutura foi testada num cenário de movimentação de materiais para demonstrar e verificar a sua eficácia. Os resultados indicam que a estrutura proposta aborda com sucesso os diferentes requisitos dos humanos e dos robôs no manuseamento de materiais. Além disso, o estudo sublinha que a colaboração eficiente entre humanos e robôs requer uma monitorização cuidadosa do ambiente de trabalho para garantir a segurança e a eficiência operacional.

## 2.4 Solução Proposta

Em jeito de conclusão, a vasta literatura no âmbito da Indústria 4.0 e 5.0 têm influenciado de alguma forma a inovação dos processos, e a constante evolução das metodologias, e o surgimento de novas tecnologias que em alguns casos têm uma abordagem disruptiva. A Indústria 4.0 aportou, entre outras coisas, um conjunto de equipamentos que permitem a sensorização de todos os intervenientes e eventos,

dando assim uma visão 360° do ambiente industrial e permitindo uma gestão em tempo real, de toda a cadeia de valor. Por sua vez, a Indústria 5.0, vista em muitos casos como uma ligeira melhoria, estabelece três pilares essenciais: o ser humano, a resiliência e a sustentabilidade. Assim sendo, o foco principal não é mais o equipamento tecnológico, ou a tecnologia por detrás da solução, mas sim a importância do ser humano, como este irá desempenhar o seu papel naquele ambiente. Os processos têm de ser adaptáveis e permitir abordagens modulares para evitar bloqueios futuros e reduzir o máximo possível os impactos em caso de adversidades. Além disso, esses mesmos processos têm de ser sustentáveis, amigos do ambiente, de modo a evitar os desperdícios e os impactos ambientais, respeitando a Natureza.

O trabalho desenvolvido nesta tese foca-se principalmente em três elementos: a gestão adaptativa, flexível e personalizável de zonas de *kitting*, em função das necessidades e inerente da Indústria 5.0; a gestão avançada dos veículos autónomos, com uma visão em tempo real da localização e estado de cada veículo respetivamente, usando uma linguagem comum num ambiente partilhado por todos, refletindo a digitalização, conectividade e análise de dados proeminentes da Indústria 4.0; um simulador de MES que dê a possibilidade de observar o funcionamento do processo industrial, criando um DT que permita realizar testes, simulações e otimizações antes da implementação real. Tudo isto numa plataforma *web* que pode ser acedida a partir de múltiplos dispositivos, tais como computador, telemóvel, *tablet* ou TV inteligente, entre muitos outros que possuam um navegador da *web*. A integração destes elementos no projeto impulsiona a eficiência operacional, e oferece um panorama de inovação e adaptação contínua, alinhada com os avanços tecnológicos e industriais, ao mesmo tempo que mantém o foco na redução de desperdícios e na melhoria contínua, características do LM.



## Capítulo 3

# Metodologia/Métodos

Neste capítulo, além de se descrever a metodologia aplicada para a execução do projeto, serão destacados os motivos que fundamentam a escolha dessa abordagem específica. Destacam-se os passos estratégicos e as abordagens adotadas, ressaltando os fundamentos que direcionaram a seleção desta metodologia para garantir um desenvolvimento eficiente e alinhado aos objetivos propostos.

Em seguida é estabelecida a estratégia para implementar o projeto, tendo sempre em mente a pesquisa bibliográfica realizada no capítulo 2, e que permite atingir os objetivos e resultados esperados definidos no capítulo 1, nas seções 1.4 e 1.5 respectivamente.

### 3.1 Metodologia Usada

Nos últimos anos, as metodologias ágeis de software têm sido bastante populares entre os investigadores. Esses métodos são considerados leves em comparação com as metodologias convencionais de desenvolvimento de software, devido ao seu estilo casual, versátil e adaptável. Os *frameworks* ágeis foram amplamente aceites pela sociedade de software devido à sua concentração na entrega oportuna de software, qualidade do produto e satisfação do utilizador. Para atender aos requisitos de diferentes projetos de software, existem vários *frameworks* ágeis para escolher. Dentre esses métodos, o *Extreme Programming* (XP) e o *Scrum* são os mais reconhecíveis e amplamente utilizados. O estudo realizado pelos autores de [Akhtar et al., 2022]

contribui ao investigar dois *frameworks* detalhadamente. O artigo realiza uma comparação abrangente entre *Scrum* e XP para identificar suas semelhanças, diferenças e explorar aquelas características que se complementam.

A pesquisa [Khasanah and Sarmini, 2023] avalia o uso do método *Scrum* no desenvolvimento da aplicação *Keep Wallet*, explorando a sua eficácia em criar software de alta qualidade, adaptável às mudanças e alinhado com as necessidades do utilizador. Os resultados indicam que o *Scrum* melhora a qualidade e a produtividade do desenvolvimento, facilita a priorização das tarefas e aumenta a satisfação do cliente. O estudo destaca ainda o potencial do *Scrum* para superar os desafios financeiros através do desenvolvimento de software e serve como base para aplicações semelhantes, evidenciando os benefícios desta metodologia.

A metodologia ágil *Scrum* [Hayat et al., 2019] foi criteriosamente selecionada como a abordagem primária para a implementação deste projeto, visando a entrega eficiente e adaptável de soluções. O *Scrum* é fundamentado na flexibilidade e colaboração, dividindo o desenvolvimento em iterações chamadas *sprints*, cada uma com objetivos claros e prazos definidos.

A escolha do *Scrum* baseia-se nos seus pontos fortes distintos. A natureza iterativa permite uma resposta ágil às mudanças nos requisitos, promovendo a adaptabilidade num cenário dinâmico. A divisão do projeto em *sprints* mensuráveis facilita o controlo do progresso, e promove uma transparência fundamental para todas as partes envolvidas.

A colaboração intensa entre os membros da equipa, combinada com reuniões regulares, como o *Daily Scrum*, promove a comunicação constante, minimizando potenciais desafios e garantindo uma compreensão partilhada dos objetivos do projeto. Além disso, o *feedback* contínuo é valorizado, permitindo ajustes imediatos com base nas experiências de cada *Sprint*.

A alocação flexível de tarefas e responsabilidades, característica central da metodologia, maximiza a eficiência da equipa. A abordagem colaborativa e a autonomia concedida aos membros da equipa incentivam a criatividade e a inovação.

Em forma de conclusão, a escolha do *Scrum* para este projeto fundamenta-se nos seus princípios ágeis, na sua capacidade de adaptação a mudanças e na sua ênfase na colaboração contínua, tornando-o a metodologia ideal para garantir a entrega bem-sucedida e alinhada às necessidades dinâmicas do projeto.

### 3.1.1 Tópicos e Áreas de Pesquisa

Dentro da proposta de pesquisa, a investigação sobre *Lean Manufacturing* (LM) vai-se concentrar na compreensão das referências e boas práticas no ambiente industrial, com especial atenção para o *Pull Flow* (PF), *Just In Time* (JIT) e *Kaizen*. O PF será examinado quanto à sua influência na eficiência dos processos, o JIT será avaliado em termos de gestão eficaz de stocks e produção, enquanto o *Kaizen* será

investigado para compreender como a filosofia de melhoria contínua é integrada nas práticas quotidianas.

No contexto da Indústria 4.0, a pesquisa volta-se para as ferramentas tecnológicas essenciais, como arquitetura em nuvem, *Big Data*, *Internet das Coisas* (IoT) e *Digital Twin* (DT). A arquitetura em nuvem será explorada quanto ao suporte à flexibilidade e à escalabilidade nas operações, enquanto o *Big Data* será examinado em termos de análise de dados em larga escala para impulsionar decisões informadas. O papel da IoT na conectividade e monitorização será abordado, e a implementação do DT será investigada para compreender o seu papel na simulação e otimização dos processos.

No contexto da Indústria 5.0, a pesquisa concentra-se numa abordagem mais centrada no ser humano, visando tornar as operações mais resilientes e sustentáveis. A análise investigará como a Indústria 5.0 redefine a relação entre humanos e tecnologia na produção industrial, priorizando a colaboração e a personalização. A pesquisa busca compreender as estratégias adotadas para integrar tecnologias avançadas mantendo um foco na experiência do operador, promovendo assim ambientes de trabalho mais flexíveis, adaptativos e sustentáveis.

A abordagem DT será explorada para criar uma visão mais abrangente de toda a atividade industrial num ambiente virtual. A pesquisa irá-se aprofundar na implementação de DT em setores específicos, avaliando como essa tecnologia replica e monitora processos em tempo real. A análise proporcionará uma compreensão clara de como o DT é utilizado para aprimorar a eficiência operacional e a tomada de decisões na indústria.

A simulação será explorada como um meio de análise, teste e validação de ideias antes de aplicar alterações no ambiente real, com base no DT previamente criado. A pesquisa buscará compreender como a simulação é integrada nas fases de desenvolvimento e otimização, usando o DT como referência. Serão fornecidas mais valias sobre como a simulação pode ser uma ferramenta valiosa na validação de processos e na antecipação de cenários complexos na indústria.

### 3.1.2 Metodologia de Desenvolvimento

Este projeto aborda a implementação de um sistema composto por três módulos principais: gestão de zonas de *kitting*, gestão da frota de AMR e simulação com DT para análise e teste de futuras alterações. A metodologia de desenvolvimento adotada é delineada a seguir, visando a eficiência operacional, otimização logística e capacidade de análise preditiva.

O desenvolvimento de software será conduzido de maneira iterativa, utilizando linguagens de programação como *C#* [Microsoft, 2023] e a framework de desenvolvimento *JavaScript Angular* [Google, 2023] para a implementação dos algoritmos

necessários em cada módulo. O emprego de *frameworks* especializados em simulação e controlo de robôs, juntamente com sensores específicos, será crucial para a integração efetiva dos componentes tecnológicos.

A integração entre os módulos será realizada por meio de uma arquitetura de sistema robusta, permitindo a comunicação eficiente entre o módulo de gestão de zonas de *kitting*, responsável pela organização eficiente dos materiais, o módulo de gestão da frota de AMR, focado na otimização do movimento dos robôs autônomos, e o módulo de simulação com DT, que oferecerá uma representação virtual precisa do ambiente logístico.

Os testes serão conduzidos de forma abrangente, começando com avaliações individuais de cada módulo para garantir seu funcionamento adequado. Em seguida, a integração dos módulos será testada em cenários simulados antes da implementação física. A utilização do módulo de simulação permitirá a análise de diversas alterações potenciais no sistema, avaliando o desempenho e a eficiência antes da tomada de decisões operacionais.

A recolha de dados será realizada por meio de sensores integrados nos AMR, sistemas de rastreamento de inventário e simulações virtuais. A análise dos dados recolhidos será conduzida utilizando técnicas estatísticas e algoritmos específicos para cada módulo, permitindo uma avaliação aprofundada do desempenho do sistema como um todo.

Considerações éticas incluem a garantia da privacidade e segurança dos dados recolhidos, além do consentimento informado dos participantes envolvidos nos testes do sistema. Limitações potenciais do projeto, como restrições tecnológicas ou orçamentárias, serão reconhecidas, e medidas para mitigar essas limitações serão consideradas ao longo do desenvolvimento.

A validade e confiabilidade dos resultados serão asseguradas por meio de testes rigorosos, análises estatísticas robustas e a utilização do módulo de simulação para validar as conclusões antes da implementação final. Esta secção fornece uma base sólida para a condução do estudo, garantindo a integridade e relevância da pesquisa no contexto da gestão de zonas de *kitting*, frota de AMR e simulação com DT.

## 3.2 Processo de Implementação

Esta secção inicia-se com a exploração e conhecimento do modelo de negócio e respetivo ambiente industrial, seguindo-se uma sólida fundação na arquitetura tecnológica do projeto antes de apresentar os módulos estruturados para fornecer uma organização eficaz e orientar o desenvolvimento de maneira otimizada. A base do projeto está centrada na arquitetura tecnológica, estabelecendo a infraestrutura essencial para o sucesso global. Em seguida, os módulos específicos são introduzidos, começando pela Gestão de Zonas de *Kitting*, seguida pela Gestão da Frota de AMR

e pelo DT e Simulador. Para cada módulo, uma abordagem detalhada será fornecida, incluindo procedimentos específicos para configuração, integração, formação e análise de resultados, tudo isso construído sobre a sólida base da arquitetura tecnológica do projeto. Essa estrutura visa garantir coesão, eficiência e consistência ao longo de todas as fases do desenvolvimento.

### 3.2.1 Modelo de Negócio

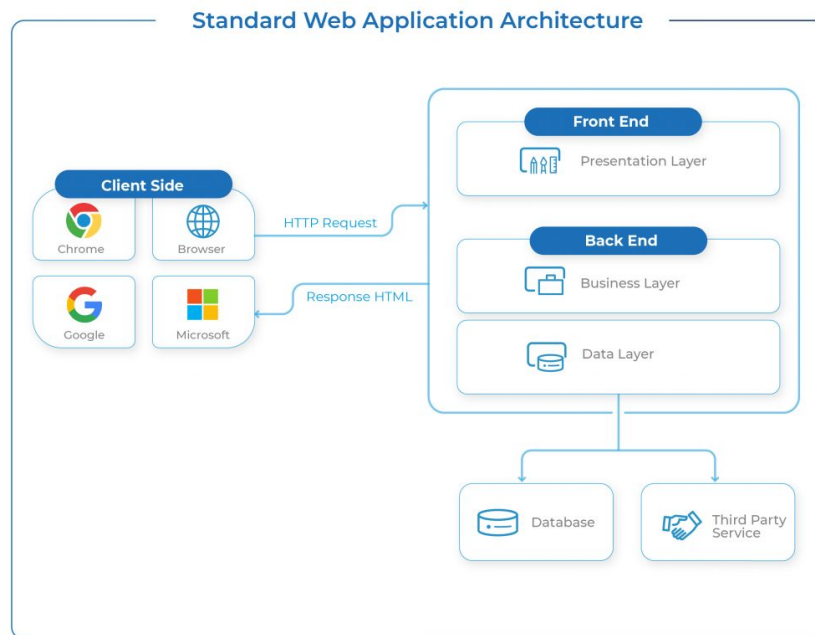
No desenvolvimento do projeto, é crucial uma análise aprofundada do modelo de negócio existente, destacando estratégias e objetivos comerciais já estabelecidos. O conhecimento profundo dos produtos desempenha um papel crucial, influenciando não apenas o design e a implementação, mas também moldando a visão estratégica do projeto à luz do cenário atual. Além disso, a compreensão detalhada do ambiente industrial é essencial para ajustar o projeto às características específicas do setor, garantindo uma implementação mais eficiente e alinhada às demandas do mercado.

No âmbito operacional, o mapeamento detalhado do processo produtivo, com recurso à notação *Business Process Modeling Notation* (BPMN) [Erasmus et al., 2020], emerge como uma ferramenta indispensável. Esse mapeamento não oferece apenas uma visão clara das operações, mas também destaca áreas potenciais de otimização e eficiência ao longo do fluxo de trabalho. Ao integrar esses elementos - o conhecimento do modelo de negócio existente, o entendimento aprofundado dos produtos, a compreensão do ambiente industrial e o mapeamento detalhado do processo produtivo - cria-se uma base sólida e estratégica para o projeto. Isso proporciona uma implementação prática, mas também uma visão alinhada com os objetivos e requisitos específicos do contexto em que será aplicado, considerando as nuances do modelo de negócio já em vigor.

### 3.2.2 Base Tecnológica

Com base na revisão da literatura efetuada no capítulo 2, o desenho da aplicação é cuidadosamente delineado, com uma arquitetura eficiente dividida entre o *Back-end* (BE) [Gong et al., 2020] por um lado, e o *Front-end* (FE) [Gong et al., 2020] por outro, destacando os benefícios distintos de cada componente, tal como se apresenta na figura 3.1.

O BE é estruturado para oferecer uma interface robusta e flexível, permitindo a integração fluida com outros sistemas e facilitando a expansão futura. A sua natureza modular promove a reutilização de código e simplifica a manutenção, resultando em maior eficiência no desenvolvimento. Por outro lado, o FE é projetado para proporcionar uma experiência do utilizador intuitiva e envolvente, priorizando a usabilidade e a acessibilidade. A separação clara entre a lógica de negócios no BE



Fonte: ClickIt

Figura 3.1: Diagrama da arquitetura de uma aplicação web

e a apresentação no FE permite uma escalabilidade eficiente, adaptando-se dinamicamente às necessidades crescentes. Juntos, esses elementos contribuem para uma aplicação coesa, eficiente e preparada para evolução contínua.

O ambiente industrial caracteriza-se como exigente e as soluções tecnológicas desempenham um papel importante ao longo de todo o processo de fabrico. Em função dessa criticidade, as aplicações devem possuir uma forte componente de disponibilidade, suportar grandes volumes de acessos e interações, mas também possuir um grau de flexibilidade para que não haja a sobre-utilização de recursos, alinhando-se com o princípio PF do LM. Conforme constatado na secção 2.2.1, do capítulo 2, a arquitetura deste projeto é centrada no uso de tecnologias avançadas de *containers* [Potdar et al., 2020], nomeadamente *Docker* [Docker, 2023], e na orquestração [Al Jawarneh et al., 2019] desses *containers* através do *Kubernetes* [Kubernetes, 2023], de acordo com o ilustrado na figura 3.2.

Uma vez que este tipo de soluções acabam por gerar um grande volume de dados, que se tornam extremamente importantes para analisar os comportamentos de cada equipamento e explorar novas formas de melhoria, torna-se crucial a aplicação de um serviço robusto e altamente escalável para lidar com dados. Durante a revisão da literatura no capítulo 2, mais concretamente na secção 2.2.1, foi identificado o *NewSQL* como uma solução indicada, dado que possui um bom desempenho na execução de consultas e manipulação de dados, assim como capacidades de escalabilidade para dar resposta a cenários de grande carga de acessos e interações.

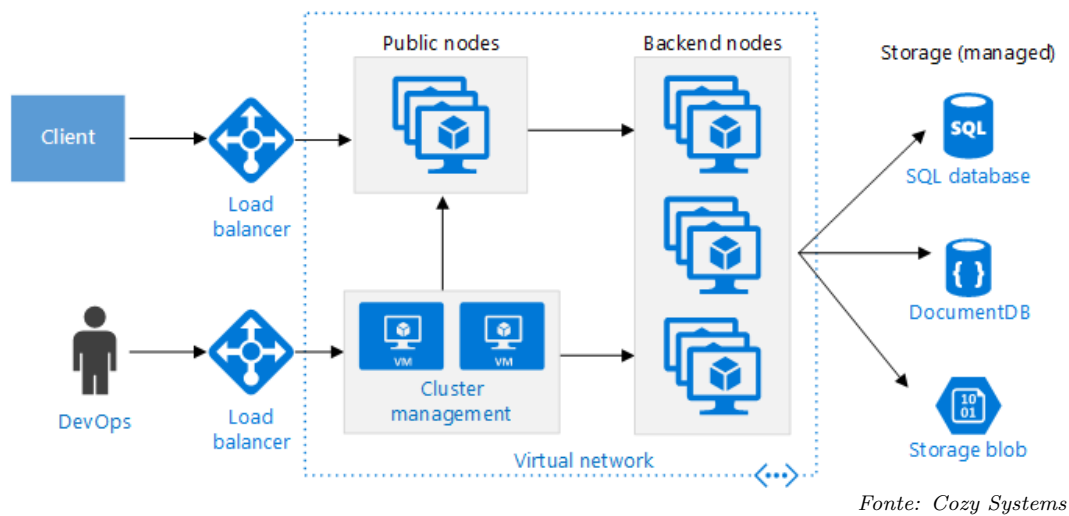


Figura 3.2: Diagrama da arquitetura de orquestração de *containers*

Esta tecnologia também é utilizada como base das soluções de DT analisadas, mais concretamente nos artigos [Qi et al., 2021] e [Pang et al., 2021], na secção 2.2.2 do capítulo 2.

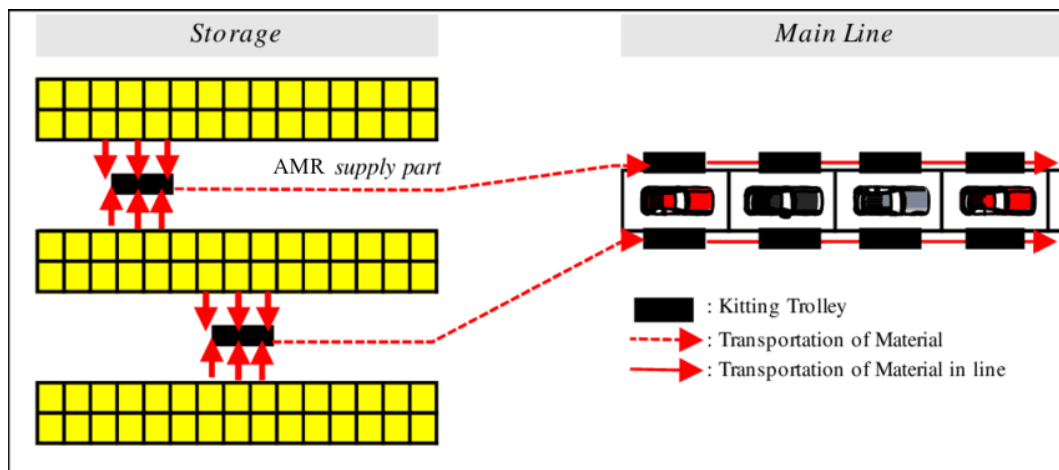
Tendo em consideração este género de arquitetura, é possível implementar uma cultura de *DevOps* [Mishra and Otaiwi, 2020], que representa uma abordagem colaborativa e integrada para unir equipas de desenvolvimento e operações de modo a aprimorar a eficiência e a qualidade do ciclo de vida do desenvolvimento de software. Essa cultura enfatiza a automação de processos, integração contínua, entrega contínua, gestão de configuração e monitorização contínua. Ao incentivar a colaboração, a aprendizagem contínua, a transparência e a segurança integrada, a cultura *DevOps* visa criar um ambiente ágil, escalável e flexível.

Essa escolha estratégica proporciona uma configuração consistente e eficiente em termos de recursos, mas também estabelece as bases para alcançar alta disponibilidade e escalabilidade em todos os módulos do sistema. Através da utilização inteligente dessas tecnologias, procura-se assegurar que o projeto seja resiliente, facilmente gerível e capaz de se adaptar dinamicamente às demandas operacionais.

### 3.2.3 Gestão de Zonas de *Kitting*

O módulo de gestão de zonas de *kitting* será implementado através de uma cuidadosa configuração do sistema, levando em consideração as especificidades de cada zona. Isso envolverá a definição de parâmetros cruciais, como características espaciais, distribuição de peças e requisitos de armazenamento, conforme o exemplo da figura 3.3.

As áreas de *kitting* estão distribuídas geograficamente pelo espaço industrial, seguindo a estratégia da empresa, a qual pode ser por proximidade do ponto de entrega na linha de produção ou por agregação das zonas de *kitting*. Para garantir



Fonte: [Setiawan et al., 2021]

Figura 3.3: Co-relação das áreas de *kitting* com a linha de produção

uma transição suave, a integração com os processos existentes de *kitting* será minuciosamente planeada, incluindo estratégias para a migração eficiente de processos e dados.

A formação dos utilizadores será uma peça-chave nesta fase, com programas elaborados para garantir uma rápida adoção e efetiva utilização do novo sistema. Além disso, será estabelecida uma comunicação contínua com o sistema MES por meio de API, permitindo a receção ágil das necessidades para a criação de fichas de *kitting*, assegurando uma sincronia precisa entre o módulo de gestão de zonas de *kitting* e o ambiente operacional. Cada ficha gerada desempenhará um papel importante no módulo subsequente de gestão de AMR, desempenhando um papel fundamental na coordenação e execução eficiente das operações da frota.

### 3.2.4 Gestão da Frota de AMR

A configuração da frota de AMR será uma etapa crucial, detalhando as especificações de cada robô, incluindo as rotas, as velocidades e as capacidades de carga. Tal como apresentado na figura 3.4, a frota de veículos pode ser heterogénea, em função das múltiplas necessidades e propósitos do meio em que este tipo de veículos estão ou irão estar inseridos.

Estes veículos autónomos possuem várias finalidades tais como o transporte de mercadorias por arrasto, a elevação de cargas para posterior armazenamento (quer por utilização de garfos, quer por posicionamento sob a carga) ou ainda o transporte em forma de comboio.

As fichas de *kitting*, previamente geradas pelo módulo anterior de gestão de zonas de *kitting*, desempenharão um papel fundamental ao originar missões específicas. Estas missões serão distribuídas de maneira sincronizada e organizada pela frota de AMR, garantindo uma execução eficiente e coordenada. A integração estreita com



Fonte: Flowbotic

Figura 3.4: Frota de AMR

os sistemas de controlo dos AMR será priorizada para garantir uma comunicação eficaz, através de um *broker* MQTT bem definido, como analisado na secção 2.2.1, do capítulo 2. Procedimentos para a resolução rápida de problemas também serão implementados. A eficácia desse módulo será avaliada com base na otimização da movimentação da frota no ambiente operacional.

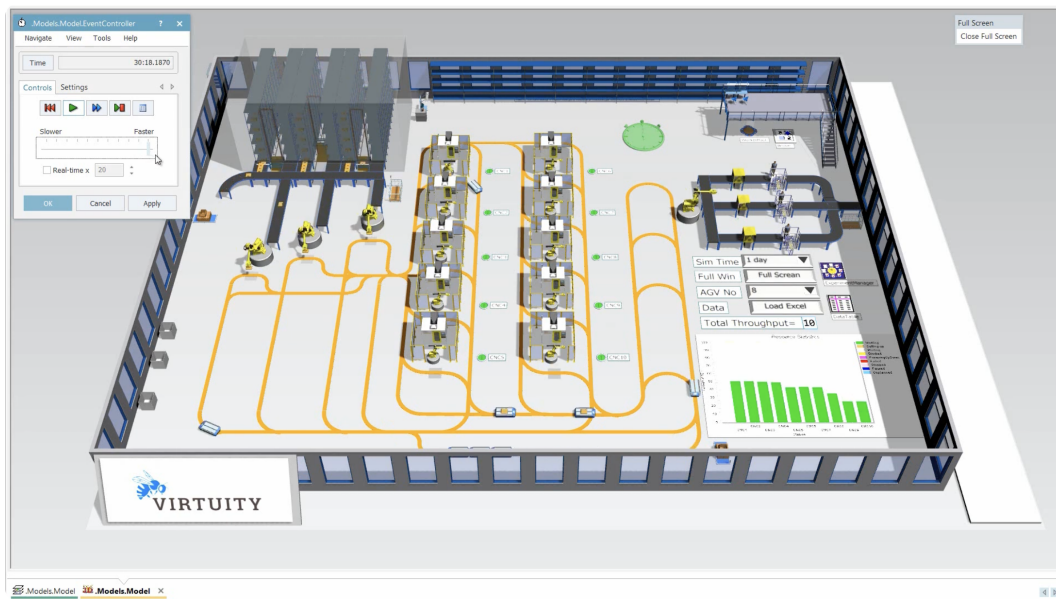
### 3.2.5 Gémeo Digital e Simulador

O módulo de Gémeo Digital (*Digital Twin - DT*) será a personificação virtual da linha de produção, incorporando os módulos, postos de trabalho, as zonas de *kitting* e os equipamentos envolventes. A ligação estratégica com a frota de AMR permite a representação em tempo real dos seus estados, oferecendo uma visão holística do ambiente produtivo. Além disso, a integração com o MES proporciona uma perspetiva detalhada dos estados e produções em tempo real, solidificando assim a abordagem digital do projeto.

Este módulo contará com uma componente de simulação, que desempenhará um papel inovador na análise e teste de futuras alterações, como exemplificado na figura 3.5.

Podemos contemplar o estado e posição de cada veículo, assim como as suas respectivas rotas. Com base no modo de funcionamento estabelecido, é possível ajustar os principais parâmetros de funcionamento, e verificar se a simulação vai de encontro ao desejado, ou se porventura existem impactos ou anomalias a resolver. Propostas de alterações serão virtualmente introduzidas e testadas antes da implementação no ambiente real, proporcionando uma avaliação abrangente dos potenciais impactos. A análise de resultados irá concentrar-se em métricas específicas, tais como eficiência operacional e tempo de ciclo, para informar decisões futuras e otimizar a operação global do sistema.

Além de analisar o desempenho de futuras alterações, este módulo de simulação tem a capacidade de recriar eventos passados com base nos dados armazenados, o



Fonte: *Virtuity*

Figura 3.5: Exemplo da interface visual de um DT

que oferece uma análise minuciosa e particular. Essa funcionalidade permite revisitar momentos específicos, identificando padrões e tendências. Além disso, possibilita simulações retrospectivas para avaliar o impacto de decisões passadas, contribuindo para uma tomada de decisão mais informada. Essa abordagem enriquece a compreensão do sistema, mas também valida o modelo de simulação, garantindo sua precisão e utilidade.

Este processo de implementação segue as linhas de orientação da metodologia ágil *Scrum* [Hayat et al., 2019], o que possibilita um desenvolvimento incremental e iterativo da solução, que visa garantir a eficácia e a integração harmoniosa dos módulos propostos, proporcionando uma base sólida para aplicar melhorias contínuas do processo no ambiente operacional.

### 3.3 Requisitos do Sistema Proposto

Esta secção tem como objetivo apresentar a lista de Requisitos do trabalho a desenvolver, organizados por tipo de requisitos, Funcionais e Não Funcionais. Os Requisitos Funcionais descrevem o que o sistema deve fazer e quais as suas funcionalidades específicas, por exemplo: os utilizadores podem criar diferentes produtos. Os Requisitos Não Funcionais dizem respeito às características ou qualidades do sistema, tais como desempenho, segurança, usabilidade e confiabilidade, por exemplo: o sistema deve responder rapidamente às solicitações dos utilizadores.

Vale a pena ressaltar a importância dos requisitos estabelecidos irem de encontro aos objetivos definidos na secção 1.4, que visam garantir que os mesmos são atingidos na sua totalidade, tal como os resultados adjacentes fixados na secção 1.5.

### 3.3.1 Requisitos Funcionais

Criar uma lista de Requisitos Funcionais para um sistema de gestão é um passo fundamental no processo de desenvolvimento do sistema, de acordo com a análise [Tsui et al., 2022]. A lista abaixo representa os principais Requisitos Funcionais, agrupados por módulos:

RF1 - *Gestão das Zonas de Kitting*: Com base no resultado esperado R1.

RF1.1 - *Registo de Zonas*: O sistema deve permitir o registo de diferentes zonas de *kitting*, identificando características como localização e capacidade.

RF1.2 - *Atribuição de Peças*: Os utilizadores autorizados devem poder atribuir peças específicas a cada zona de *kitting*.

RF1.3 - *Criação de Kits*: O sistema deve gerar os pedidos de criação de kits, pelas diferentes zonas, em função das necessidades.

RF2 - *Gestão da Frota de AMR*: Com base no resultado esperado R4.

RF2.1 - *Registo de AMR*: O sistema deve permitir o registo e identificação única de cada AMR na frota.

RF2.2 - *Atribuição de Tarefas*: Utilizadores autorizados devem poder atribuir tarefas específicas a cada AMR, como o transporte de peças entre zonas.

RF2.3 - *Monitorização em Tempo Real*: Deve ser possível visualizar a localização e o status de cada AMR em tempo real.

RF3 - *Simulador MES*: Com base nos resultados esperados R3 e R2.

RF3.1 - *Simulação dos Processos de Produção*: O simulador MES deve permitir a criação e execução de simulações dos processos de produção, incluindo a movimentação de peças entre as zonas de *kitting*.

RF3.2 - *Avaliação de Desempenho*: Deve ser possível avaliar o desempenho do sistema em diferentes cenários simulados.

RF3.3 - *Análise de Eficiência*: O simulador MES deve oferecer ferramentas para analisar a eficiência do fluxo de trabalho e identificar possíveis melhorias.

RF3.4 - *Integração com Casos Reais*: Deve haver a capacidade de integrar dados provenientes de cenários reais ou exemplos específicos para tornar as simulações mais precisas.

### 3.3.2 Requisitos Não Funcionais

A criação de uma lista de Requisitos Não Funcionais para um sistema de gestão é uma tarefa importante para garantir que o sistema atenda aos critérios de desempenho, segurança e usabilidade desejados, segundo o estudo [Ameller et al., 2019]. Em seguida são apresentados os Requisitos Não Funcionais relevantes para este projeto:

RNF1 - *Desempenho*: Componente focado no desempenho do sistema, durante a realização de tarefas.

RNF1.1 - *Tempo de Resposta*: O sistema deve responder às solicitações do utilizador num tempo aceitável, por exemplo, menos de 1 segundo para operações comuns.

RNF1.2 - *Escalabilidade*: O sistema deve ser capaz de lidar com um aumento significativo no número de utilizadores, transações ou dispositivos sem degradação significativa do desempenho.

RNF1.3 - *Carga Máxima*: Suportar no máximo 1000 utilizadores simultâneos e transações sem comprometer o desempenho.

RNF2 - *Segurança*: Componente essencial para garantir um ambiente seguro.

RNF2.1 - *Controlo de Acesso*: Implementar um sistema de controlo de acesso robusto para garantir que apenas os utilizadores autorizados possam aceder a funcionalidades específicas do sistema.

RNF2.2 - *Auditoria*: Registrar e auditar atividades críticas do sistema, como modificações de dados, acessos privilegiados e eventos de segurança.

RNF2.3 - *Criptografia*: Garantir a segurança das comunicações e armazenamento de dados confidenciais utilizando criptografia adequada.

RNF3 - *Confiabilidade*: Componente focada nas expectativas almejadas pelos utilizadores, em relação à aplicação.

RNF3.1 - *Disponibilidade*: Possuir uma taxa de disponibilidade mínima de 99%.

RNF3.2 - *Recuperação de Falhas*: Implementar mecanismos de recuperação de falhas para minimizar o impacto de falhas inesperadas no sistema.

RNF4 - *Usabilidade*: Componente orientada à experiência do utilizador durante a utilização.

RNF4.1 - *Interface do Utilizador*: Garantir uma interface de utilizador intuitiva e amigável para facilitar a interação dos utilizadores com o sistema.

- RNF4.2 *Formação*: Fornecer documentação adequada e formação para os utilizadores, garantindo que eles possam utilizar eficientemente todas as funcionalidades do sistema.
- RNF5 - *Manutenção*: Componente orientada ao suporte e resolução de problemas do sistema, durante a operação corrente no dia-a-dia.
- RNF5.1 - *Facilidade de Manutenção*: Projetar o sistema de forma que as atualizações e correções possam ser aplicadas facilmente, minimizando o tempo de inatividade.
- RNF5.2 - *Documentação*: Manter documentação abrangente do sistema, incluindo arquitetura, código-fonte, e manuais de administração.
- RNF6 - *Integração*: Componente relacionada com as ligações do sistema, quer internamente entre os seus módulos e componentes, quer externamente com o meio ambiente em redor.
- RNF6.1 - *Módulos*: Integrar os módulos de forma eficiente, para garantir a comunicação e sincronização adequada.
- RNF6.2 - *Compatibilidade*: Garantir que o sistema seja compatível com hardware e software existentes na infraestrutura da empresa.
- RNF6.3 - *Application Programming Interface (API)*: Fornecer API bem documentadas para facilitar a integração com outros sistemas.



## Capítulo 4

# Resultados/Discussão

Este capítulo tem como objetivo apresentar todos os resultados obtidos e realizar uma pequena discussão sobre os mesmos. Desde os aspetos mais visíveis e de simples entendimento, até aos mais subjetivos e complexos.

Em primeiro lugar vamos abordar o processo de *kitting* previsto e o leque de atores que vão interagir, tal como as principais características de cada um deles. De seguida vamos aprofundar a componente do Sistema proposto que é o principal objeto de estudo nesta tese, apresentando a sua arquitetura, núcleo de funcionamento e a sua relação com os outros intervenientes. Por fim, serão apresentados os resultados dos testes realizados em diferentes cenários de validação do protótipo. O facto do sistema ser distribuído permitiu implementar uma estratégia de testes incremental, uma vez que não é necessário ter o sistema completo, e possibilita a entrega constante de valor ao resultado final.

### 4.1 Processo

Antes de implementar um sistema num ambiente industrial é necessário realizar um reconhecimento do terreno e entender quais são os processos envolvidos e as respetivas operações que as pessoas e/ou robôs realizam. É um aspeto fulcral entender os métodos de trabalho e os motivos pelos quais eles são realizados, para evitar transtornos no futuro e criar uma solução que melhor se adapte ao contexto envolvido.

### 4.1.1 Intervenientes

Ao analisarmos o processo de *kitting* identificamos três atores principais que são: o Operador, o AMR e o Sistema Informático.

O Operador é a pessoa que conhece bem o processo de *kitting* e possui a formação específica para realizar esta função. Conhece bem o contexto de trabalho e sabe a importância do seu papel em toda a cadeia produtiva. Além disso tem a noção do impacto que pode causar em situações de baixo desempenho ou atraso na realização das suas tarefas.

O AMR é o robô móvel que tem o propósito de realizar várias missões de *kitting* e de transportar os kits até à linha de produção. Neste caso em particular, possui um periférico acoplado apelidado de *Pointer*, com o propósito de auxiliar o Operador durante a recolha das peças. Este periférico é constituído por: um visor para apresentar as informações das peças a recolher; uma câmara para identificar os códigos de barras das peças; um laser para apontar para a peça a recolher; e um leitor de pulseiras *Radio-Frequency IDentification* (RFID) para ler a identificação do Operador. O protocolo de comunicação com os AMR pode ser consultado no anexo A, onde são descritos os vários eventos de publicação de mensagens, os eventos subscritos e os formatos esperados das mensagens. Já o protocolo de comunicação com o *Pointer* pode ser consultado no anexo B, onde são descritos os vários eventos de publicação de mensagens assim como os eventos subscritos e os formatos esperados das mensagens em ambas as situações.

O Sistema Informático tem o papel central na coordenação do processo e visa garantir que todas as tarefas são realizadas de forma correta e ordenada. Este papel é semelhante a um maestro de uma orquestra, na medida em que orienta os intervenientes citados anteriormente, de modo a criar uma harmonia entre todos, e garantir que as tarefas são executadas da melhor forma. Com base nesta descrição foi dado o nome de *SynKit* ao sistema, onde *Syn* faz referência à componente de sincronismo de ações entre o operador, o AMR e o sistema, e *Kit* faz referência ao kit de peças criado durante o processo.

### 4.1.2 Modo de funcionamento

O modo de funcionamento é automatizado e sincronizado com as operações do colaborador, tendo como objetivo principal seguir o fluxo natural do processo e de forma a que fique mais fluído e reduzindo o máximo possível os atritos com o Operador. Para esquematizar da melhor forma o processo em causa recorreu-se a um *Business Process Diagram* (BPD) em BPMN para elaborar o diagrama apresentado na figura 4.1.

O AMR está localizado num ponto de espera ou descanso, até que o sistema lhe atribua uma missão, com uma ficha de *kitting* associada. Assim que seja atribuída

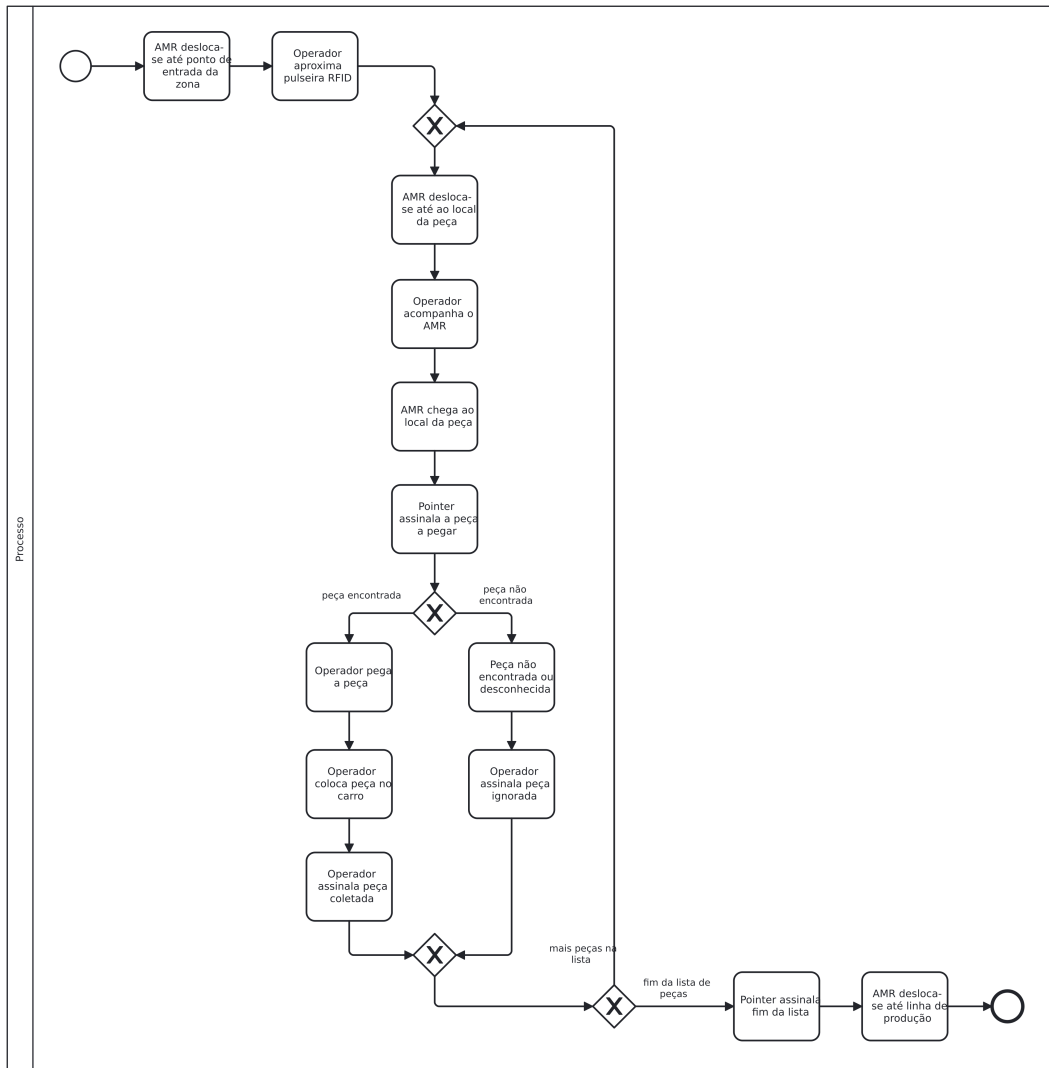


Figura 4.1: Diagrama BPMN com a visão geral do processo de *kitting*

a missão, o AMR desloca-se até ao ponto de entrada da respetiva zona de *kitting* e aguarda que o Operador inicie o processo de recolha das peças.

O Operador aproxima a sua pulseira RFID do leitor embarcado no *Pointer*, para iniciar o processo de recolha. Em seguida, o *Pointer* apresenta no visor a primeira peça a recolher assim como a quantidade e a sua localização, enquanto o AMR se desloca até ao local desta e é acompanhado de perto pelo Operador. Chegadas ao local da peça, o *Pointer* recorre a uma câmara para identificar o código de barras da peça e assinalar a prateleira exata. Neste momento podem ocorrer duas situações distintas na identificação do código de barras:

1. Sucesso: o *Pointer* identifica o código de barras e ativa um *laser* na direção da peça, de forma a auxiliar o Operador.
2. Falha: o *Pointer* não identifica o código de barras e fica a aguardar que o Operador identifique visualmente a peça.

Uma vez identificada a peça em questão, o Operador coloca a mesma no carrinho que o AMR transporta consigo e, em seguida, aproxima a sua pulseira RFID do leitor, para sinalizar que a peça foi recolhida, podendo-se avançar para a seguinte. Caso hajam mais peças, o processo de recolha será repetido iterativamente até à última peça que consta da ficha de *kitting*.

No fim do processo de recolha, o *Pointer* apresenta uma mensagem de fim de recolha e o AMR desloca-se até à linha de produção para realizar a entrega do kit.

## 4.2 Arquitetura e Componentes do Sistema

A arquitetura do sistema deverá satisfazer a necessidade atual de uma solução deste tipo: *kitting* e gestão de frotas AMR. No entanto, deve também ter uma abordagem orientada para o futuro, permitindo o crescimento e a expansão que contribuirão para a utilização a longo prazo. A mesma arquitetura deve ser energeticamente eficiente para garantir a sustentabilidade, reduzindo o consumo de recursos computacionais e aproveitando serviços escaláveis para minimizar o desperdício de infraestruturas. Além disso, deve suportar atualizações modulares, garantindo que o sistema se mantém adaptável e eficiente na gestão dos recursos ao longo do tempo.

Vale a pena salientar que estamos num ambiente industrial, e temos por isso de considerar a comunicação e a harmonia entre dois mundos: as *Tecnologias Operacionais* (TO), que representam o chão de fábrica, os eventos, os dispositivos e as suas operações inerentes; e as *Tecnologias de Informação* (TI), que simbolizam as soluções e sistemas informáticos, de armazenamento de dados e de redes que suportam a operação e respetivos negócios [Schäfer et al., 2023]. Sendo uma solução para a logística interna da fábrica, esta solução desempenha um papel crítico no funcionamento da empresa, pelo que deve ser robusta e resiliente.

### 4.2.1 Orientação a Eventos

Com as diretrizes descritas em mente, foi desenhada uma arquitetura distribuída em serviços independentes (microsserviços) e baseada em eventos (*event-driven*). Em termos práticos, os eventos gerados pela operação são os gatilhos do processamento da informação e do processo físico [Rahmatulloh et al., 2022].

A adoção de uma arquitetura orientada a eventos (*event-driven*) oferece inúmeros benefícios para sistemas informáticos, especialmente no que diz respeito à capacidade de resposta em tempo real. Este tipo de arquitetura permite que os eventos sejam detetados e processados de maneira assíncrona e imediata, proporcionando uma visão atualizada do estado do sistema à medida que as mudanças ocorrem. Essa abordagem aumenta a escalabilidade e flexibilidade, permitindo que diferentes componentes do sistema funcionem de forma independente e sejam ativados apenas quando necessário. Além disso, a arquitetura baseada em eventos melhora a capacidade de monitorização e tomada de decisão em tempo real, uma vez que os eventos podem ser processados quase instantaneamente. Isso traz uma vantagem competitiva, pois os sistemas tornam-se mais ágeis, adaptáveis e preparados para lidar com grandes volumes de dados e interações dinâmicas entre os serviços.

O desenvolvimento de raiz de uma arquitetura de microsserviços orientada a eventos oferece diversas vantagens em relação às abordagens monolíticas tradicionais. Embora abordagens monolíticas enfrentem frequentemente desafios de escalabilidade e resiliência, os microsserviços fornecem uma solução distribuída e eficiente. As arquiteturas orientadas a eventos melhoram o desempenho do sistema e a tolerância a falhas, através da comunicação assíncrona entre serviços. Esta abordagem permite um desenvolvimento e implementação independentes, permitindo uma adaptação mais rápida às mudanças e uma maior eficiência de custos [Rocha, 2021]. A tabela 4.1 destaca os principais benefícios da adoção de uma arquitetura de microsserviços orientada a eventos.

### 4.2.2 Distribuída em Microsserviços

As melhores práticas na arquitetura de microsserviços incluem definir claramente os limites dos serviços e garantir que cada microsserviço é autónomo e responsável por funcionalidades específicas, facilitando a escalabilidade e a manutenção. Além disso, os serviços devem comunicar de forma assíncrona sempre que possível, utilizando protocolos leves como HTTP/REST ou mensagens através de filas para minimizar o acoplamento. A automatização das implementações dos microsserviços e a monitorização contínua são essenciais para garantir a eficiência operacional e detetar falhas rapidamente. Por fim, cada serviço deve ser desenvolvido e gerido de forma independente, permitindo às equipas implementar e atualizar microsserviços isoladamente, sem impactar todo o sistema. Estudos recentes, como

Aspeto	Arquitetura monolítica	Arquitetura distribuída
<b>Escalabilidade</b>	Limitada, difícil de dimensionar peças de forma independente.	Altamente escalável; os serviços são escalonados de forma independente.
<b>Resiliência</b>	Os pontos únicos de falha podem afetar todo o sistema.	Resiliente; os serviços continuam disponíveis mesmo que um dos componentes falhe.
<b>Desempenho</b>	os processos síncronos ficam lentos sob carga elevada.	Melhorado através de comunicação assíncrona.
<b>Flexibilidade</b>	Difícil de modificar sem impactar todo o sistema.	Altamente flexível; os serviços evoluem de forma independente.
<b>Eficiência de custos</b>	Custos de infraestrutura mais elevados devido ao forte acoplamento.	Mais económico ao longo do tempo com utilização otimizada de recursos.
<b>Manutenção</b>	Desafiante à medida que o sistema cresce; as mudanças afetam tudo.	Manutenção mais fácil; alterações isoladas nos serviços.

Tabela 4.1: Vantagens das arquiteturas distribuídas vs arquiteturas monolíticas

[Aljawawdeh et al., 2023] e [Baškarada et al., 2020], discutem extensivamente estas práticas, que abordam os princípios e desafios na conceção e implementação de microsserviços.

Definidas as linhas orientadoras para a arquitetura da solução logística de gestão de zonas de *kitting*, o passo seguinte é moldar e ilustrar os componentes necessários para a suportar, como ilustrado na Figura 4.2.

Da esquerda para a direita, temos os AMR que irão realizar missões de recolha e transporte de peças desde as zonas de *kitting* até à linha de produção. Ao centro, o *Data Broker* trata das mensagens de eventos trocadas entre todos os elementos ou componentes do sistema. À direita, os microsserviços são responsáveis pelo processamento da informação, seguindo-se o MES, que contém a referência dos produtos e o respetivo plano de produção, entre muitas outras coisas.

Em síntese, esta proposta tira partido de uma arquitetura de microsserviços combinada com um modelo orientado a eventos, garantindo modularidade e escalabilidade. Cada microsserviço é concebido para executar tarefas específicas de forma independente, permitindo que sejam desenvolvidos, implementados e dimensionados separadamente. A abordagem orientada a eventos melhora este sistema, permitindo a comunicação assíncrona entre serviços, através de um intermediário de mensagens.

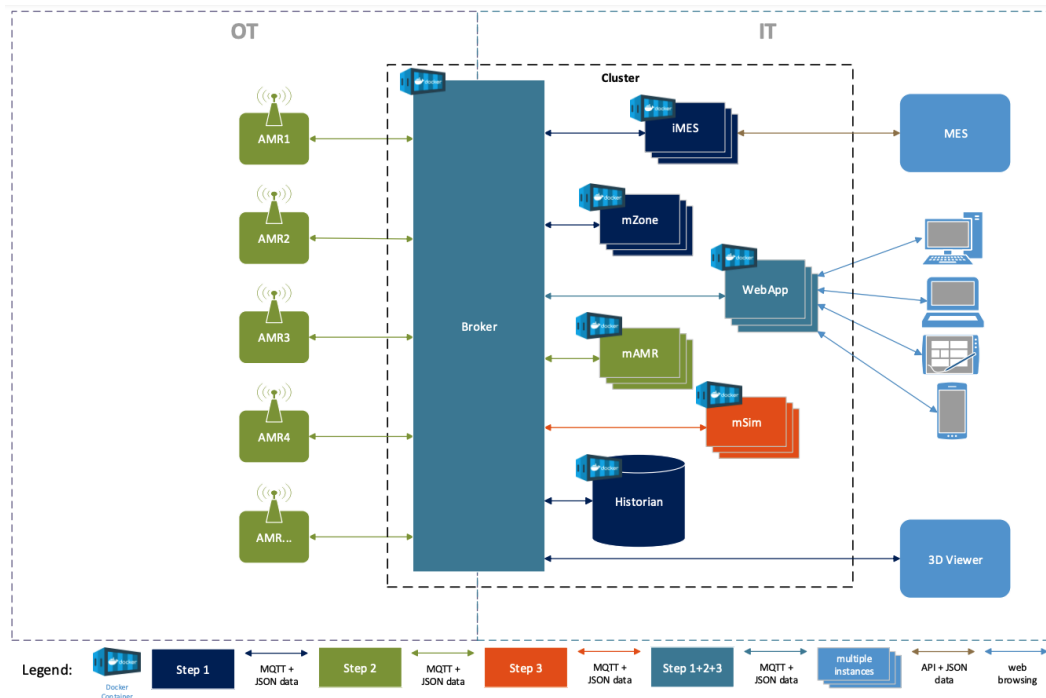


Figura 4.2: Arquitetura do Sistema com componentes de aplicação

Este agente de mensagens trata da troca de mensagens entre serviços, permitindo-lhes responder em tempo real a eventos e processar dados de forma eficiente. Em conjunto, estas abordagens apoiam a escalabilidade dinâmica do sistema, a tolerância a falhas e a utilização otimizada dos recursos, tornando-as ideais para lidar com contextos industriais complexos, como a logística interna.

### 4.2.3 Veículos Autônomos

A frota de veículos autônomos foi definida para satisfazer os principais requisitos: método de navegação preciso e modularidade das rotas. Ou seja, permite facilitar a modificação do modo de operação e das rotas estabelecidas, considerando futuros desenvolvimentos no método de trabalho. Para este caso, foram adotados veículos do tipo AMR [Fragapane et al., 2021] em vez de AGV [De Ryck et al., 2020], uma vez que a navegação dispensa faixas e marcações no solo, tornando o ambiente mais limpo e reduzindo o esforço e o trabalho envolvido na implementação e alteração de percursos.

No contexto deste projeto foram utilizados os veículos autônomos da empresa *Flowbotic* [Flowbotic, 2024], uma vez que tinha sido o parceiro escolhido para colaborar nesta vertente de trabalho. O desenvolvimento do periférico *Pointer* foi atribuído à empresa *GBT* [GBT, 2024], dado ter sido este o parceiro selecionado para esta componente do trabalho.

#### 4.2.4 Hub de Comunicação

No que diz respeito ao hub de comunicação adotado, o *Data Broker EMQX* foi selecionado por ser uma solução robusta, baseada no protocolo MQTT, amplamente utilizada no mercado e com uma arquitetura projetada para suportar *clustering* e escalabilidade, características fundamentais para sistemas distribuídos de elevada disponibilidade [Mishra et al., 2021]. Além disso, a escolha pelo *EMQX* baseia-se na necessidade de integração com serviços externos, uma vez que este *Data Broker* oferece suporte nativo para autenticação, ligação a bases de dados e fluxo de dados. Tais funcionalidades integradas facilitam a conexão direta com o componente *Historian*, permitindo o armazenamento confiável e intuitivo de todos os dados publicados, o que é essencial para a monitorização e rastreabilidade de eventos no sistema [Mishra and Kertesz, 2020]. Por fim, o facto de ser um software de código aberto (*open source*) contribui para uma maior flexibilidade e controlo sobre as personalizações, adaptando-se às especificidades do nosso ambiente e reduzindo os custos de licenciamento.

Aproveitando as funcionalidades do protocolo MQTT aplicadas na versão 5, como é o caso do *Response Topic* [Chien and Wang, 2022], que permite direccionar as respostas para um tópico específico enquanto protege o contexto, e ainda do *Shared Subscription* [Matic et al., 2021] [Banno and Yoshizawa, 2021], que permite a distribuição de carga ao nível do *Data Broker*, é possível acrescentar mais robustez à solução desenvolvida.

Ainda relacionado com o *Data Broker*, é aplicado o conceito arquitetural *Unified Namespace* (UNS) para organizar os tópicos de forma estruturada. Um UNS pode levar os dados de TO, normalmente organizados no modelo *ISA* de Empresa -> Local -> Área -> Linha -> Célula, numa arquitetura mais aberta onde os dados de TO são combinados com os dados de TI, fornecendo uma camada de dados padrão [Markkanen, 2023] [Xavier et al., 2023]. Neste método, a subscrição e publicação de informação são organizadas em tópicos e espelham a organização hierárquica da fábrica, criando uma única fonte de verdade para todos os dados e informações das operações de fabrico [Abouzied et al., 2024].

### 4.3 Fase 1 - Gestão das zonas

O primeiro passo para o desenvolvimento da solução assentou na implementação do microsserviço iMES para conectar com o MES e o microsserviço mZone que é responsável pela gestão das zonas de *kitting*. Desta forma, é possível obter as necessidades de produção vindas do MES e gerar as respetivas fichas de *kitting*, com base na distribuição das peças pelas diferentes zonas de *kitting*.

### 4.3.1 Microserviço iMES

Por ser uma aplicação direcionada para o meio industrial, a fonte de dados sobre os produtos e o plano da produção é o MES. O microserviço iMES forma o adaptador entre o MES e o *Data Broker*, criando assim uma abstração e independência do contexto externo e possibilitando a aplicação noutras indústrias e empresas. A comunicação com o MES é feita via API e os dados são trocados em formato JSON.

O processo consiste em decompor cada produto previsto no plano de produção, nas respetivas peças e quantidades associadas, conforme apresentado na figura 4.3.

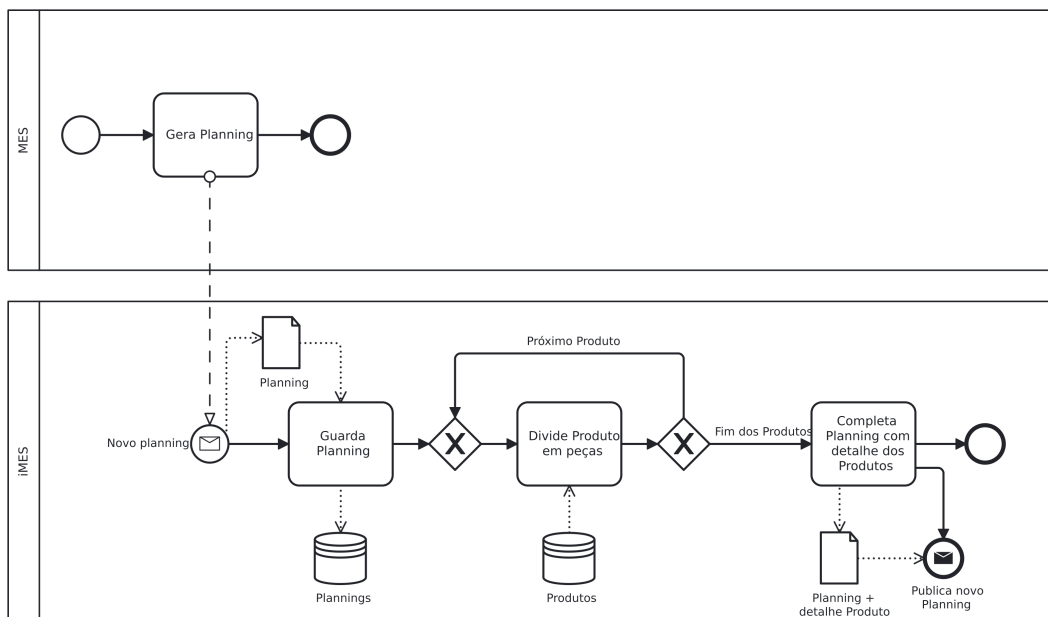


Figura 4.3: Diagrama BPMN com o tratamento do plano de produção enviado pelo MES

Acompanhando o fluxo do processo, o novo plano de produção é armazenado localmente, para utilização interna do sistema. Em seguida, de forma iterativa, é feita a divisão de cada produto em peças com as respetivas quantidades. Por fim, esta decomposição de cada produto é adicionada ao plano de produção inicial, sendo publicada para difusão interna. Este microserviço também será responsável no futuro por reencaminhar informação do sistema para o MES, como por exemplo alterações e estados de operações.

Como forma de prover visibilidade sobre o processo de decomposição dos produtos em peças, principalmente os potenciais problemas, foram implementados alertas relacionados com produtos e peças desconhecidos. Este alerta é visível na página principal, além de constar da lista de alertas.

Para validar o funcionamento deste primeiro microserviço, foi definido um plano de produção de teste, constituído pela data de produção prevista, lista de produtos de teste, e respetivas quantidades. Os primeiros testes foram executados recorrendo

apenas a um produto, para validar a correta decomposição deste e corrigir algum problema que surja. Posteriormente foram adicionados mais produtos e mais quantidades respectivamente. Todos os testes tiveram bons resultados, observando-se a recepção da correta da informação vinda do MES, a posterior decomposição do produto em peças com a respectiva quantidade também de forma correta, e sem detecção de anomalias. Para validar o sistema de alertas implementado, foram gerados planos de produção com produtos conhecidos e desconhecidos, mas também peças conhecidas e desconhecidas. Os resultados obtidos foram um sucesso, com os respectivos alertas gerados e visíveis para o utilizador.

### 4.3.2 Microserviço mZone

Com base no plano de produção enviado pelo MES e na localização das peças nas diferentes zonas de kits, o microserviço mZone gera as folhas de kits. Este microserviço é também responsável pela gestão das zonas de *kitting*, das peças colocadas em cada zona e dos carrinhos que serão utilizados para enviar as peças para a linha de produção. Compilar estas informações básicas e combiná-las com os requisitos do plano de produção gera as folhas de kits.

O processo é iniciado com base na informação divulgada pelo microserviço iMES, descrito anteriormente, e consiste na localização das peças pelas várias zonas de *kitting* e criação das fichas de *kitting*, de acordo com o apresentado pela figura 4.4.

Para cada peça necessária, identifica-se a zona onde está localizada e a respectiva posição. Em seguida, determina-se o carrinho onde a peça será colocada para envio à linha de produção, sendo criada uma nova ficha para essa zona ou atualizada uma ficha existente, associada ao plano de produção. Este processo é repetido para todas as peças que compõem o plano de produção divulgado.

Uma vez criadas as fichas de *kitting* por zona, segue-se a criação da rota para coletar essas mesmas peças. De referir que é preciso definir a rota que seja mais rápida e curta para coletar todas as peças. Para que isto seja possível, recorreu-se ao algoritmo de *Ant Colony Optimization* (ACO) [Miao et al., 2021] que é uma meta-heurística inspirada no comportamento das formigas em busca de alimentos. Em ambientes reais, as formigas depositam feromônios ao percorrerm rotas entre o formigueiro e a fonte de alimento, criando um sistema de marcação que favorece a exploração de caminhos mais curtos e eficientes ao longo do tempo. O ACO replica esse processo utilizando formigas virtuais para explorar soluções em problemas de otimização combinatória, como o problema do caixeiro-viajante. As rotas mais promissoras recebem maior intensidade de “feromônios” virtuais, aumentando a probabilidade de serem seguidas nas iterações subsequentes. Esta abordagem é especialmente eficaz em cenários onde o espaço de busca é vasto e as soluções exatas são computacionalmente impraticáveis. Estudos demonstram que o ACO

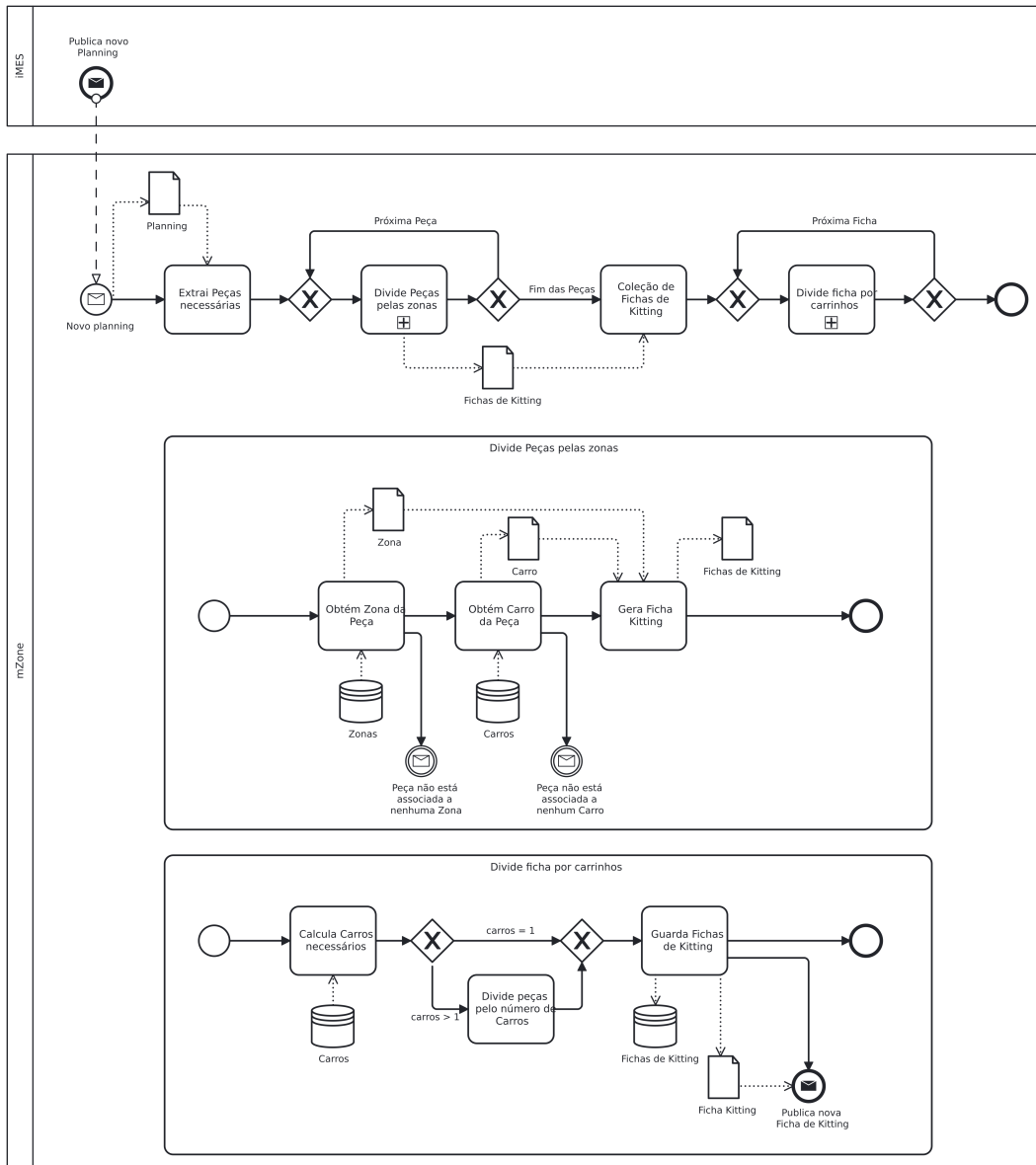


Figura 4.4: Diagrama BPMN com o processo de criação das fichas de *kitting*

é robusto e adaptável, destacando-se em problemas NP-difíceis [Adib et al., 2021] [Gupta and Srivastava, 2020].

Para cada ficha gerada, o próximo passo é ajustar o número de carrinhos necessários, através da divisão da quantidade de peças pela capacidade de cada carrinho. No final de cada ficha tratada, a mesma é publicada.

Como existem alguns pontos com potencial para ocorrerem falhas, foram implementados alertas relacionados com peças que não estão associadas a nenhuma zona e peças que não estão associadas a nenhum carrinho. Estes alertas são visíveis na página principal, além de constarem da lista de alertas.

Para validar o correto funcionamento, foi criada uma zona de teste com todas as peças do produto de teste, definido anteriormente, além de um carrinho com a capacidade para albergar todas as peças do produto. Os primeiros testes foram constituídos por apenas um produto, para validar a criação da respetiva ficha de *kitting*. Posteriormente foi aumentada a complexidade através da criação de mais zonas, mais carrinhos, e a redistribuição das peças do produto. Os resultados obtidos ao longo dos vários testes foram bons, com a criação correta das fichas de *kitting*, sem qualquer problema encontrado. Para validar o sistema de alertas, foram eliminadas algumas peças das zonas de *kitting*, mas também carrinhos com capacidade para algumas peças. Os resultados obtidos também foram ótimos, com os respetivos alertas gerados e visíveis para o utilizador.

### 4.3.3 Registo Histórico

Paralelamente a todas estas interações e eventos, existe o componente *Historian*, que não é mais do que um *data logger* de tudo o que está a acontecer. Esta função é relevante para que seja possível posteriormente consultar e explorar acontecimentos passados e analisar com mais detalhe o que aconteceu. A sua implementação recorre a uma funcionalidade integrada do *Data Broker* que permite a ligação com serviços externos. Para o efeito, bastou configurar a regra sobre todos os dados gerados e qual o destino dessa informação, no caso, o envio para o serviço *REST API* da base de dados que os insere numa tabela.

## 4.4 Fase 2 - Gestão da frota dos AMR - Microserviço mAMR

Após a implementação da gestão das zonas de *kitting*, descrita na secção 4.3, que produz a lista de fichas de *kitting* a realizar, o próximo passo foi distribuir essas mesmas fichas pela frota disponível. Para tal foi desenvolvido o microserviço mAMR que faz a gestão dos AMR e gera as missões de abastecimento.

Uma vez distribuídas as fichas dos kits, é necessário atribuí-las à frota AMR disponível. A função é desempenhada pelo microserviço mAMR, que inventaria a frota AMR disponível e escolhe as rotas entre as zonas de *kitting* e a linha de produção. Tal como o microserviço anterior, o mAMR, utiliza a informação que gere (veículos e rotas) para gerar as missões de forma eficiente, combinando a localização das zonas de *kitting* com a localização do AMR. Para o fazer de forma eficiente, utiliza o algoritmo *KD-tree* [Cao et al., 2020] para reduzir ao máximo o tempo de viagem e as distâncias percorridas. A escolha do algoritmo *KD-tree* deve-se ao facto do mesmo reduzir o tempo de pesquisa de pontos próximos, tornando a pesquisa do ponto vizinho mais rápida [Cao et al., 2020].

O início do processo é a publicação da ficha de *kitting*, e tem como destino a criação e atribuição de missões, como demonstrado na figura 4.5.

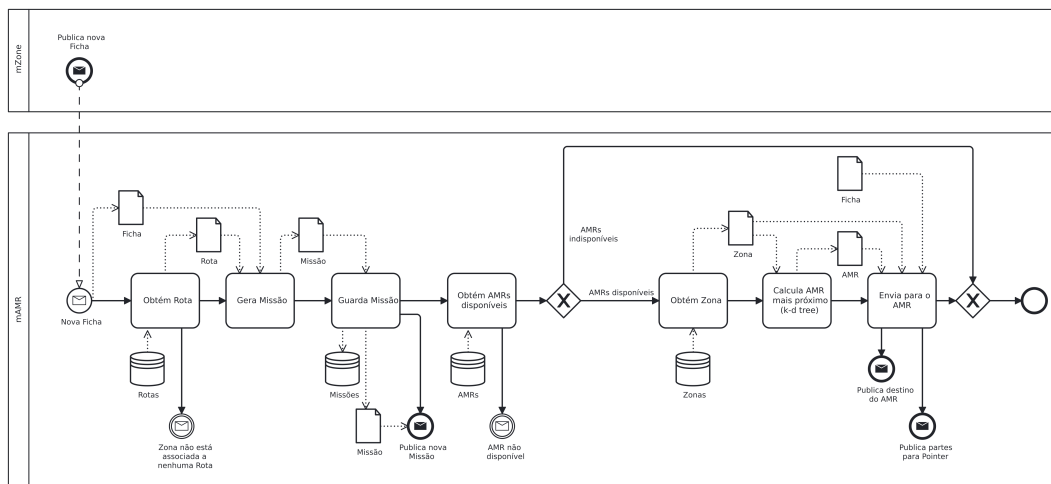


Figura 4.5: Diagrama BPMN sobre a criação da missão de picking e entrega na linha de produção

Com base na ficha publicada, é obtida a rota de abastecimento que contém a zona de *kitting* como origem e o posto da linha de produção como destino. Uma vez obtida a rota, a missão é guardada na base de dados e publicada. Após isso, e para otimizar o processamento e recursos, é feita uma pesquisa sobre os AMR que possam estar disponíveis. Caso haja algum, é obtida a zona de *kitting* em causa e calculado o AMR que está mais próximo do ponto de entrada da zona, com recurso ao algoritmo *KD-tree*. Após este cálculo, a missão é atribuída automaticamente, através da publicação do destino para o AMR e da publicação da lista de peças para o *Pointer*.

Também aqui foram aplicadas algumas verificações, nomeadamente na associação da zona de *kitting* com as rotas de abastecimento, e no caso da não existência de AMR disponíveis. Cada uma destas verificações gera o respetivo alerta.

Caso não haja nenhum AMR disponível, a missão fica em espera até que haja disponibilidade de algum, sendo a atribuição da missão feita de forma automática,

como mostra a figura 4.6.

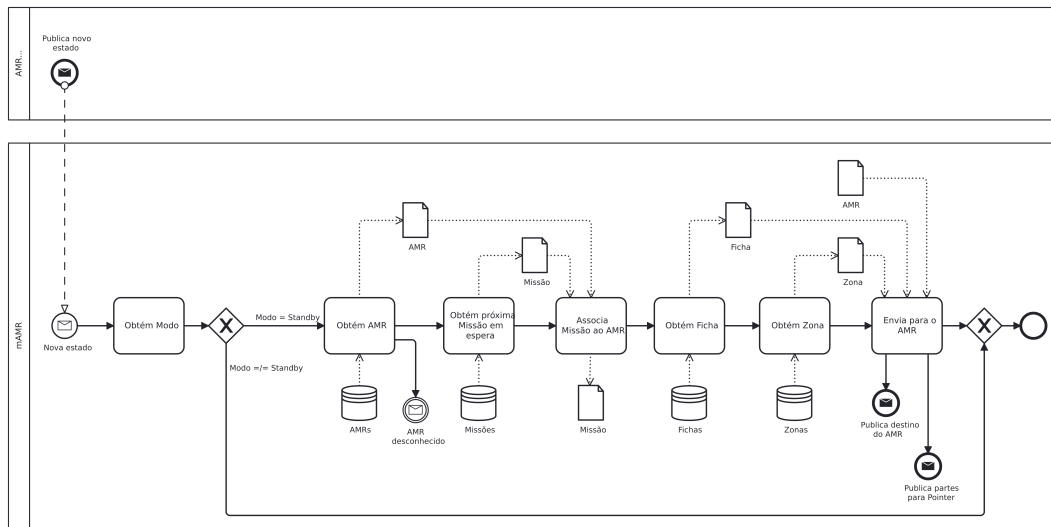


Figura 4.6: Diagrama BPMN sobre a atribuição da missão ao AMR

Quando o AMR publica o seu estado como *StandBy*, num primeiro momento, é verificado se esse AMR é conhecido. Em caso afirmativo, é obtida a próxima missão no estado de espera e associada automaticamente ao AMR em questão. De seguida, é obtida a respetiva ficha e a zona de *kitting* e, tal como acontece no caso anterior, a missão é atribuída automaticamente, através da publicação do destino para o AMR e da publicação da lista de peças para o *Pointer*.

Mais uma vez foram colocados pontos de verificação, neste caso em concreto quando o AMR é desconhecido do sistema.

Uma vez atribuída a missão ao AMR, este desloca-se até ao ponto de entrada da zona de *kitting* e aguarda que o operador inicie a operação de coleta das peças. O processo de coleta das peças é algo iterativo e possui várias interações em tempo real entre o AMR, o *Pointer* e o sistema, como demonstrado pela figura 4.7.

O ponto de partida é dado pelo *Pointer* quando o operador inicia a coleta das peças, ao passar a sua pulseira RFID no leitor e é publicada no *Data Broker*, a mensagem de início de operação de coleta das peças. Após isso, são efetuadas verificações básicas relativas ao AMR e à missão em curso. De seguida é analisada qual a operação enviada, para se proceder ao devido tratamento de entre as quatro opções:

1. **Operação = Início** : para o caso do início da operação, é atualizado o estado do AMR, atualizado o estado da missão, obtida a respetiva ficha e enviada para o AMR a localização da primeira peça a coletar;
2. **Operação = Coletada** : para o caso da peça ser coletada, é atualizada a missão com os detalhes da coleta, obtida a respetiva ficha e enviada para o AMR a localização da primeira peça a coletar;

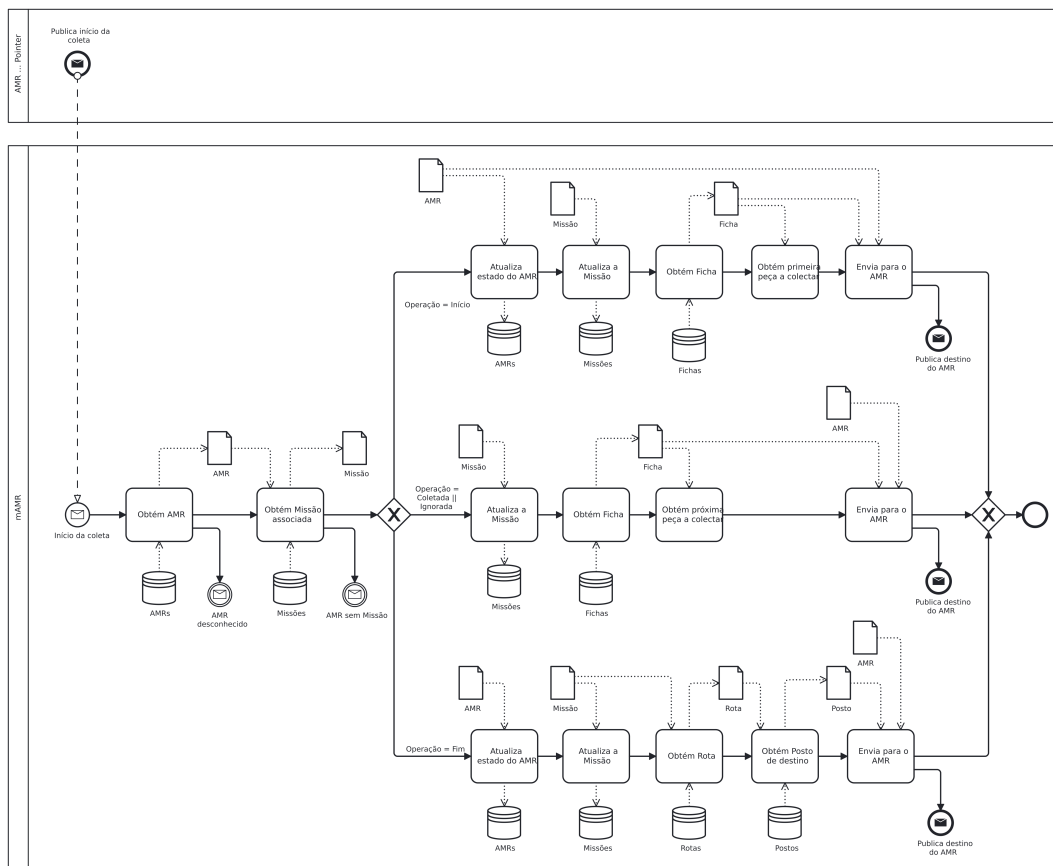


Figura 4.7: Diagrama BPMN do processo durante a execução da missão

3. **Operação = Ignorada** : para o caso da peça ser ignorada por algum motivo, é atualizada a missão com os detalhes da coleta, principalmente o motivo indicado pelo operador na interface do *Pointer*, obtida a respectiva ficha e enviada para o AMR a localização da primeira peça a coletar;
4. **Operação = Fim** : para o caso do fim da operação, é atualizado o estado do AMR, atualizado o estado da missão, consultada a rota de abastecimento para obter a localização do posto de entrega, junto à linha de produção, e enviar esses dados para o AMR.

De ressaltar que todas estas interações são anexadas à respectiva missão e ficha de *kitting*, com os dados relativos à data, hora, peça em causa e operador em questão. Estes dados possibilitam futuras análises e estudos que fundamentem decisões por parte dos coordenadores.

Uma vez desenvolvido mais um microsserviço do sistema, partiu-se para a fase de testes de modo a validar o correto funcionamento. Foi aplicada a mesma abordagem dos microsserviços anteriores, com a execução de algo simples e aumentando a complexidade a cada passo validado. No início foi testado a criação de uma missão com base numa ficha de *kitting*, o que não originou problemas. Seguidamente foi incrementado o número de fichas e de missões até ao limite de cinquenta, sem qualquer problema detetado.

Validada a geração de missões, passou-se para a atribuição destas a um AMR que estivesse disponível e aqui começaram os desafios. O primeiro desafio foi a disponibilidade de veículos para testes, dado que o processo de fabrico dos mesmo estava atrasado. Em função disso foi desenvolvido um pequeno simulador de AMR com base no protocolo de comunicação disponibilizado pelo fabricante. Este simulador foi desenvolvido com recurso a tecnologia *web* e baseado em *HTML*, *CSS* e *JavaScript*. O objetivo principal era rapidez do desenvolver e simplicidade de utilização. O segundo desafio também estava relacionado com o tempo, mas desta vez com o desenvolvimento do *Pointer*, que ainda não estava pronto para realizar testes de integração. Assim sendo, aproveitando o simulador desenvolvido para o AMR, foi adicionada uma nova funcionalidade, com base no processo definido para o *Pointer* e respetivo protocolo de comunicação.

Ultrapassados estes desafios, voltou-se aos testes propriamente ditos, com a atribuição das missões aos AMR que tiveram bons resultados, verificando-se a atribuição automática e de forma correta aos veículos disponíveis, com alguns ajustes pelo meio para evitar a atribuição em massa de missões ao mesmo AMR. Esta situação em particular, de atribuição em massa de missões ao mesmo AMR, verificou-se durante o tratamento das mensagens de estado do AMR, o qual ignorava o estado desse AMR no sistema, e atribui-a automaticamente a próxima missão. A resolução deste problema foi bastante relevante para os casos em que existem múltiplos veículos

disponíveis, permitindo ao sistema utilizar de forma eficiente toda a frota ao seu dispor.

Já na execução da operação de coleta de peças também foram obtidos bons resultados, através da indicação correta da peça a coletar assim como a respetiva quantidade e local a colocar no carrinho. Os mesmos testes ainda proveram melhorias na apresentação da informação no simulador do *Pointer* e no controlo de cada etapa da operação de coleta e passagem para a próxima peça.

O *feedback* obtido, durante os testes iniciais, foi muito importante no desenvolvimento do *Pointer* porque permitiu criar uma interface mais intuitiva e consistente, alinhada com os princípios de usabilidade, antes de ter o protótipo criado e acoplado no AMR.

## 4.5 Fase 3 - Simulação - Microsserviço mSim

Implementada a gestão da frota de AMR, descrita na secção 4.4, a próxima tarefa seria a criação do acesso ao histórico e da simulação do processo de kitting com base em parâmetros pré-estabelecidos. Nessa ótica foi desenvolvido o microsserviço mSim para esse propósito.

Para viajar ao passado e realizar vários tipos de análises, existe o microsserviço mSim, que utiliza o histórico armazenado no componente *Historian* descrito na secção 4.3.3, e o disponibiliza de forma organizada. Através destas consultas é possível realizar diversos tipos de análises que nos permitem detalhar melhor o que aconteceu e servem de base para explicar problemas e identificar pontos de melhoria.

Além de possibilitar o acesso ao passado, este microsserviço também é responsável por possibilitar uma visão para o futuro, isto é, com base num conjunto de parâmetros de entrada que definem o modo de funcionamento pretendido, é possível calcular a exequibilidade daquele cenário. Estes parâmetros estão agrupados em cinco grupos distintos e visam facilitar a sua compreensão e preenchimento por parte do utilizador, sendo eles os seguintes:

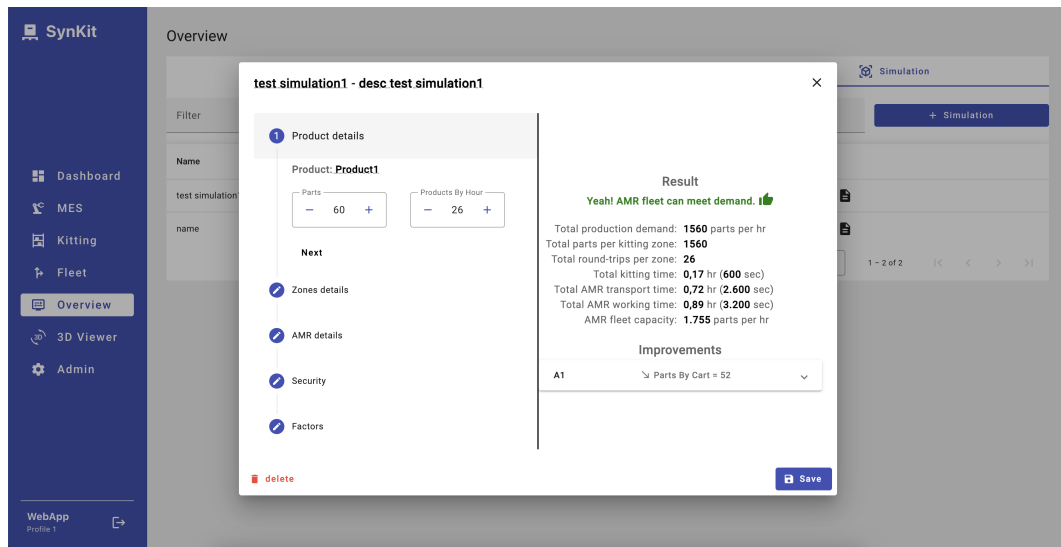
1. *Produto*: dados referentes ao Produto final.
  - (a) *Peças*: Quantidade de peças que constituem o Produto.
  - (b) *Produtos por Hora*: Quantidade de Produtos produzidos por hora.
2. *Zonas*: dados referentes às Zonas de *Kitting*.
  - (a) *Zonas*: Número de zonas de *kitting*.
  - (b) *Distância*: Distância das zonas de *kitting* até à linha de produção, em metros.
  - (c) *Peças por Zona*: Quantidade de peças que estão em cada zona de *kitting*.

- (d) *Peças por Carrinho*: Quantidade de peças que são colocadas no carrinho que é enviado para a linha de produção.
  - (e) *Tempo por Peça*: Tempo necessário para o operador pegar a peça na estante do armazém e colocar no carrinho, em segundos.
3. *AMR*: dados referentes aos AMR.
- (a) *AMRs*: Número de AMR que constituem a frota.
  - (b) *Velocidade*: Velocidade em que o AMR circula durante a operação, em metros por segundo.
4. *Segurança*: dados referentes aos aspetos importantes relacionados com a Segurança no Trabalho.
- (a) *Velocidade Máxima*: Velocidade máxima a que o AMR pode circular durante a operação, em metros por segundo.
  - (b) *Máximo de Peças por carrinho*: Quantidade máxima de peças que cada carrinho pode levar para a linha de produção.
  - (c) *Tempo Mínimo por Peça*: Tempo mínimo para o operador pegar a peça na estante do armazém e colocar no carrinho em segurança, em segundos.
5. *Fatores*: dados referentes aos fatores que influenciam a operação de kitting.
- (a) *Tráfego*: Fator de tráfego no chão de fábrica, em percentagem.
  - (b) *Congestionamento*: Fator de congestionamento das rotas de abastecimento, em percentagem.
  - (c) *Manutenção*: Fator de manutenção dos AMR, em percentagem.
  - (d) *Paragens de Linha*: Probabilidade de haver uma paragem de linha, em percentagem.
  - (e) *Tempo Médio de Paragem de Linha*: Duração média de uma paragem de linha, em segundos.

Considera-se exequível se com a procura esperada e as condições dadas é possível realizar as missões com a frota disponível num determinado momento.

Caso o cenário seja exequível, são apresentados os respetivos indicadores que a fundamentam, tais como quantidade de peças por hora, número de missões por zona, total de tempo disponível para realizar o *kitting*, total de tempo de transporte dos AMR, entre outros, tal como apresentado na figura 4.8.

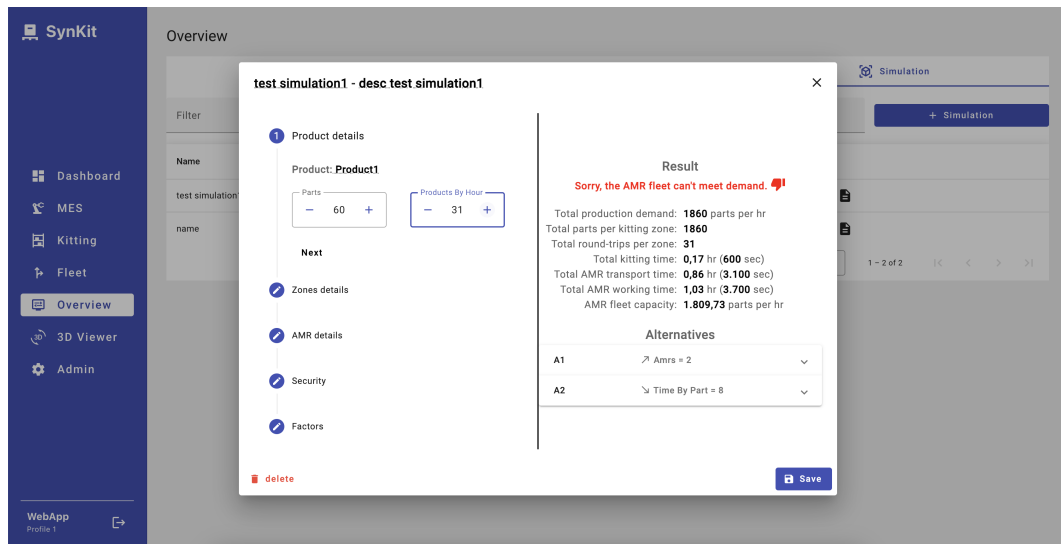
Além disso também podem ser apresentadas estratégias de melhoria com vista à otimização do processo, através de novos valores nos parâmetros de entrada, como por exemplo redução do número de AMR e/ou redução dos tempos de processo.



Fonte: SynKit

Figura 4.8: Simulação de um caso com resultado executável

Caso o cenário não seja executável, esse resultado é sinalizado e justificado com os devidos valores nas respectivas métricas. Porém, são propostas alterações nos parâmetros de entrada, com vista a tornar executável o cenário pretendido, como mostra a figura 4.9.



Fonte: SynKit

Figura 4.9: Simulação de um caso com resultado inexecutável

Uma vez que este cenário particular não é possível aplicar devido à capacidade da frota de AMR não ir de encontro às necessidades, são apresentadas duas soluções:

1. Aumentar a frota de AMR para dois veículos, de forma a aumentar a capacidade horária da frota que vai de encontro às necessidades.

2. Reduzir o tempo para coletar a peça para oito segundos, de modo a reduzir o tempo total da operação de coleta das peças, considerando a frota de AMR inicial e a procura horária da linha de produção.

De salientar que como se tratam de operações que envolvem a interação direta de operadores com os equipamentos e processos, existem sempre questões relacionadas com a segurança no trabalho que devem ser respeitadas, para permitir uma maior segurança, qualidade e proporcionar um ambiente de trabalho agradável. Em função disso, foram adicionados parâmetros de entrada com essa finalidade, nomeadamente:

- Limite máximo de velocidade dos AMR.
- Limite máximo de peças por carrinho.
- Limite mínimo de tempo por peça.

Além das questões de segurança, também existem as variabilidades no processo produtivo, ou seja, nem sempre o processo corre como o planeado, uma vez que existe um leque de diversos fatores que impactam diretamente o processo. Exemplos concretos desses fatores são:

- Tráfego físico no chão de fábrica.
- Congestionamento das rotas de abastecimento.
- Indisponibilidade por manutenção dos veículos.
- Paragens da linha de produção.
- Tempo médio de paragem da linha de produção.

Todos estes fatores são dados de entrada e são tidos em conta no cálculo da exequibilidade da simulação. O cálculo da exequibilidade recorre a múltiplas fórmulas matemáticas que permitem fundamentar o resultado obtido, as quais vamos descrever.

De ressaltar que todos os cálculos têm em consideração o tempo de uma hora, uma vez que a indústria usa a cadência da linha de produção (número de produtos produzidos por hora de trabalho) como padrão para os cálculos de exequibilidade.

O primeiro cálculo a efetuar é a quantidade de peças necessárias (PdP), que se baseia na multiplicação da quantidade de produtos por hora (PpH) pela quantidade de peças que cada produto (PpP) possui, conforme mostra a fórmula 4.1 a seguir.

$$PdP = PpH * PpP \quad (4.1)$$

Com o valor anterior, calcula-se o total de peças por zona de (PpZ), através da divisão da quantidade de peças necessárias (PdP) pelo número de zonas de *kitting* (NdZ), conforme mostra a fórmula 4.2 a seguir.

$$PpZ = \frac{PdP}{NdZ} \quad (4.2)$$

Em seguida, para cada zona de *kitting*, efetua-se um conjunto de cálculos considerando a distância e o respetivo tempo das rotas de entrega.

O primeiro cálculo diz respeito ao número de voltas necessárias para abastecer a linha de produção (NdVpZ). Calcula-se através da divisão inteira do total de peças por zona de *kitting* (PpZ) pelo número de peças por carrinho (PpC), ou por outras palavras, o número de peças que cada carrinho comporta, conforme mostra a fórmula 4.3 a seguir.

$$NdVpZ = \left\lceil \frac{PpZ}{PpC} \right\rceil \quad (4.3)$$

O segundo cálculo obtém o tempo necessário para realizar a coleta das peças (TdCpZ). Obtém-se através do número de peças por zona (PpZ) a multiplicar pelo tempo médio para coletar cada peça no armazém (TpC), a dividir por três mil e seiscentos, conforme mostra a fórmula 4.4 a seguir.

$$TdCpZ = \frac{PpZ * TpC}{3600} \quad (4.4)$$

O terceiro cálculo obtém o tempo necessário para fazer a entrega dos kits na linha de produção (ida e volta) (TpV), através da multiplicação por dois da distância da zona de *kitting* à linha de produção (DeZeL), a dividir pela velocidade do AMR (VdA), conforme mostra a fórmula 4.5 a seguir.

$$TpV = \frac{2 * DeZeL}{VdA} \quad (4.5)$$

O quarto cálculo obtém o tempo de transporte (TdTpZ), recorrendo à multiplicação do número de voltas necessárias para abastecer a linha de produção (NdVpZ), pelo tempo necessário para fazer a entrega do kit na linha de produção (ida e volta) (TpV) e pelo fator de tráfego (FdT) a somar com fator de engarrafamento (FdE), a dividir por três mil e seiscentos, conforme mostra a fórmula 4.6 a seguir. A ressaltar que o FdT e o FdE são dados de entrada, fornecidos pelo utilizador.

$$TdTpZ = \frac{NdVpZ * TpV * (1 + FdT + FdE)}{3600} \quad (4.6)$$

Findo os cálculos particulares para cada zona de *kitting*, retorna-se ao contexto global com o cálculo do fator do impacto do tempo de paragem da linha produção (IPdL), que é obtido através a multiplicação do fator de tempo de paragem (FPdL)

pelo tempo médio de paragem (TMdP) dividido por três mil e seiscentos, conforme mostra a fórmula 4.7 a seguir.

$$IPdL = 1 + FPdL * \left( \frac{TMdP}{3600} \right) \quad (4.7)$$

De seguida calcula-se o tempo total de trabalho dos AMR (TdA), recorrendo à soma do tempo total para realizar os kits de peças (TdCpZ) com o tempo total de transporte desses kits à linha de produção (TpV), a multiplicar pelo fator de manutenção (FdM) e pelo fator de impacto da paragem de linha de produção (IPdL), conforme mostra a fórmula 4.8 a seguir.

$$TdA = \left( \sum_{i=1}^{NdZ} TdCpZ + \sum_{i=1}^{NdZ} TpV \right) * (1 + FdM) * IPdL \quad (4.8)$$

Por fim calcula-se a capacidade da frota de AMR (CdF) através da multiplicação do número de AMR (NdA) pela multiplicação do número de peças por cada carrinho (PpC) pelo total de voltas por zona (TdVpZ) pela quantidade de zonas (NdZ), a dividir pelo tempo de trabalho dos AMR (TdA), conforme mostra a fórmula 4.9 a seguir.

$$CdF = \frac{NdA * (PpC * TdVpZ * NdZ)}{TdA} \quad (4.9)$$

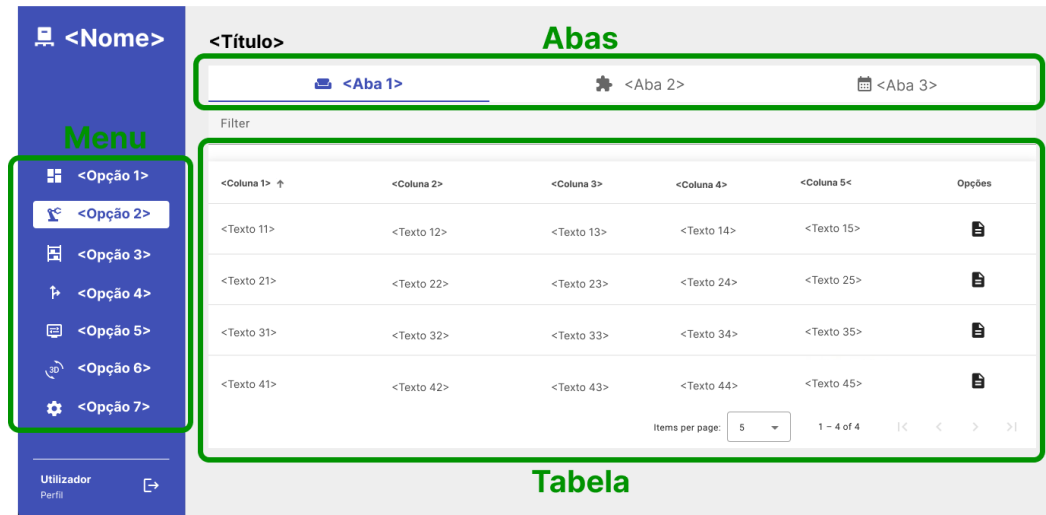
No final dos cálculos, comparamos a capacidade da frota de AMR (CdF) definida com a procura de peças pela linha de produção (PdP). Caso a capacidade da frota seja maior ou igual que a procura da linha de produção, o resultado é positivo, ou seja, a frota é capaz de dar resposta às necessidades da linha de produção. Caso contrário, se a capacidade da frota for menor que a procura da linha de produção significa que não é possível entregar a quantidade de peças necessárias pela linha de produção e, portanto, o resultado é negativo.

## 4.6 Microserviço painel de interação - WebApp

Para tornar toda a informação mais visível e fácil de utilizar, foi desenvolvido o microserviço WebApp, que utiliza elementos visuais e tecnologias web para facilitar a interação do utilizador com o sistema e melhorar a representação da informação. Além disso, este é o único ponto de entrada para o utilizador. Apesar de ainda não ter sido referido, este está presente em todos os passos anteriores, com a criação de páginas dedicadas a cada grupo de funções.

O design assenta numa estrutura com menu do lado esquerdo, organizado por grupo de funções relacionadas com: a gestão dos produtos e plano de produção; a gestão das zonas de *kitting*; a gestão da frota de AMR; histórico e simulação. Por

sua vez, o conteúdo é apresentado do lado direito, com um título na parte superior e um conjunto de abas logo abaixo, para organizar a informação apresentada. Esta informação está disposta em tabela para possibilitar a aplicação de filtros e familiarização com os utilizadores, como é possível verificar na figura 4.10.



Fonte: SynKit

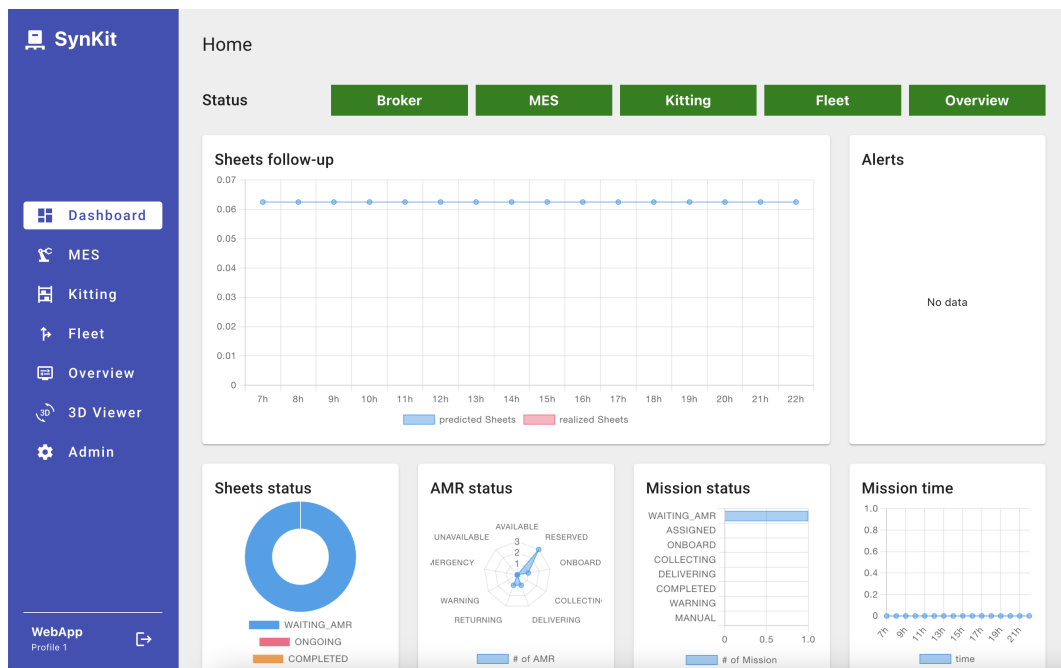
Figura 4.10: Design das páginas do sistema informático *SynKit*

Ao efetuar o *login* na aplicação, o utilizador navega para a página principal que contém um painel com os principais indicadores do processo, como mostra a figura 4.11.

A página principal tem como objetivo apresentar um painel com o estado atual do processo de *kitting* e o desempenho ao longo do dia. Na primeira linha, é exposto o gráfico de execução das fichas de *kitting* ao longo das horas de produção e na lateral os alertas que surgiram até ao momento. Na segunda linha, é apresentado o estado das fichas de *kitting* previstas para o dia, seguido dos estados dos AMR que constituem a frota instalada, dos estados das missões criadas para o dia e dos tempos médios das missões. Por fim, na terceira linha são apresentadas em forma de tabela, as fichas de *kitting* com os principais campos que as constituem e as respetivas missões também com os principais campos. Assim temos um painel com uma visão geral sobre o panorama do processo de *kitting*, no dia corrente.

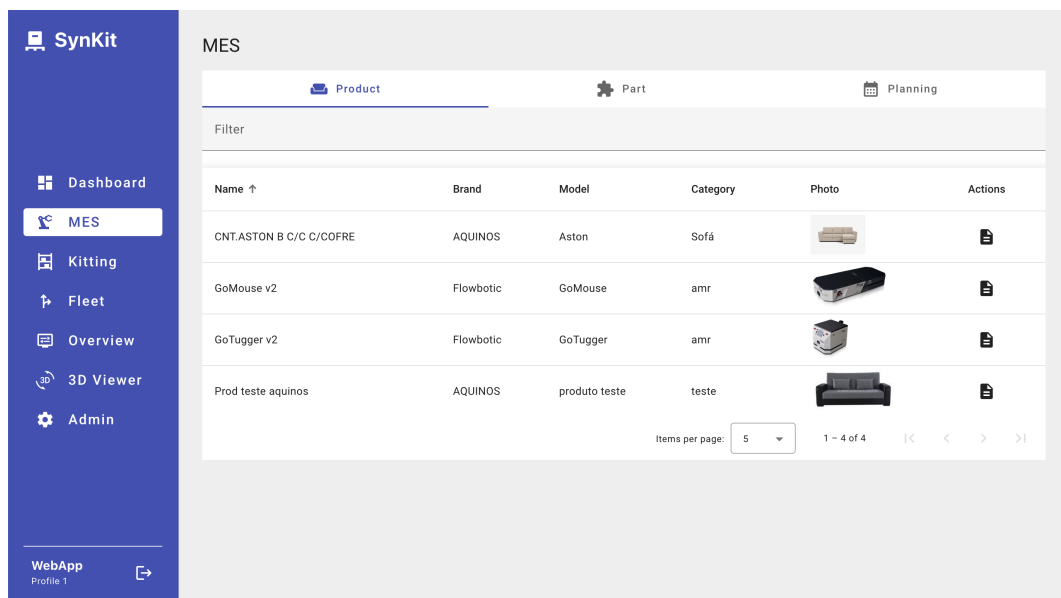
De volta ao menu principal, seguindo a ordem do topo para o fundo, surge o botão MES que permite aceder às informações vindas do sistema MES, como apresentado na figura 4.12.

Com base nas orientações de design já referidas acima, temos três abas que permitem aceder às informações relativas a: definição de Produto (*MES > Product*); Peças que constituem os Produtos (*MES > Part*); e os planos de produção com a definição de quantidades de produtos a produzir para cada dia (*MES > Planning*). Um ponto importante a destacar é a funcionalidade para difundir novamente o plano



Fonte: SynKit

Figura 4.11: Página de entrada do sistema informático *SynKit*



Fonte: SynKit

Figura 4.12: Página de acesso às informações relacionadas ao MES

de produção, que na prática representa um modo alternativo para o caso de ter ocorrido algum tipo de problema no tratamento inicial do plano de produção, evitando assim o reenvio por parte do MES.

O botão *Kitting* do menu principal dá acesso à página com as informações relacionadas com o processo de *kitting*, como apresentado na figura 4.13.

Planning	Product	Zone	Car	Status	Actions
2024-10-21 01:00:00	Prod teste aquinos	Aquinos zone1	Aquinos car1	COMPLETED	[Icons]
2024-10-20 01:00:00	Prod teste aquinos	Aquinos zone1	Aquinos car1	COMPLETED	[Icons]
2024-10-10 00:00:00	Prod teste aquinos	Aquinos zone1	Aquinos car1	WAITING_AMR	[Icons]
2024-10-09 01:00:00	Prod teste aquinos	Aquinos zone1	Aquinos car1	WAITING_AMR	[Icons]
2024-10-08 01:00:00	Prod teste aquinos	Aquinos zone1	Aquinos car1	COMPLETED	[Icons]

Fonte: SynKit

Figura 4.13: Página de acesso às informações relacionadas ao *Kitting*

Através deste, é possível realizar a gestão: dos diferentes carrinhos de kit usados no processo (*Kitting* > *Car*); das diferentes zonas e ainda quais as peças que fazem parte de cada zona (*Kitting* > *Zone*); dos motivos que podem originar desvios durante o processo de colocar a peça no carrinho (lista partilhada com o sistema *Pointer*) (*Kitting* > *Reason*); e, por último, das fichas de *kitting* propriamente ditas (*Kitting* > *Sheet*), geradas automaticamente pelo microserviço mZone descrito acima. Também aqui existe a possibilidade de realizar a ficha de *kitting* em modo manual, caso ocorram problemas com a frota de AMR, tornando-se assim um modo alternativo.

Para controlo da frota de AMR temos o botão *Fleet* do menu principal, que agrupa estas mesmas funções, tal como ilustra a imagem 4.14.

Nesta página é possível realizar a gestão: da frota de AMR disponíveis (*Fleet* > *AMR*); do conjunto de rotas de abastecimento entre as diversas ilhas de *kitting* e a linha de produção (*Fleet* > *Route*); e das missões de abastecimento que são geradas pelo microserviço mAMR e atribuídas aos AMR (*Fleet* > *Mission*). Tal como acontece nos módulos anteriores, também existe a possibilidade de realizar algumas funções em modo manual, por exemplo, a atribuição de uma missão a um determinado AMR, ou ainda o controlo remoto do veículo autónomo.

The screenshot shows the SynKit Fleet management interface. On the left is a dark blue sidebar menu with the following items: Dashboard, MES, Kitting, Fleet (highlighted), Overview, 3D Viewer, and Admin. At the bottom of the sidebar is a 'WebApp Profile 1' section. The main content area is titled 'Fleet' and contains a table of fleet items. The table has columns for Name/Id, Type, Location (x, y, theta), Status, Mode, and Actions. The data rows are as follows:

Name/Id ↑	Type	Location (x, y, theta)	Status	Mode	Actions
AMR01	simulator	(0.695, 0) Checkpoint: 0	DELIVERING	...	[Gamepad] [Document]
AMR02	simulator	(null, null) Checkpoint: 0	RESERVED	...	[Gamepad] [Document]
GM22001	Dragger	(null, null) Checkpoint: 0	RESERVED	...	[Gamepad] [Document]
GM24016	transporter	(0.806, -0.099) Checkpoint:	ONBOARD	...	[Gamepad] [Document]
GM24017	picker	(81.74, 0.642) Checkpoint: 0	RETURNING	...	[Gamepad] [Document]

At the bottom of the table, there is a pagination control showing 'Items per page: 5' and '1 - 5 of 6'.

Fonte: SynKit

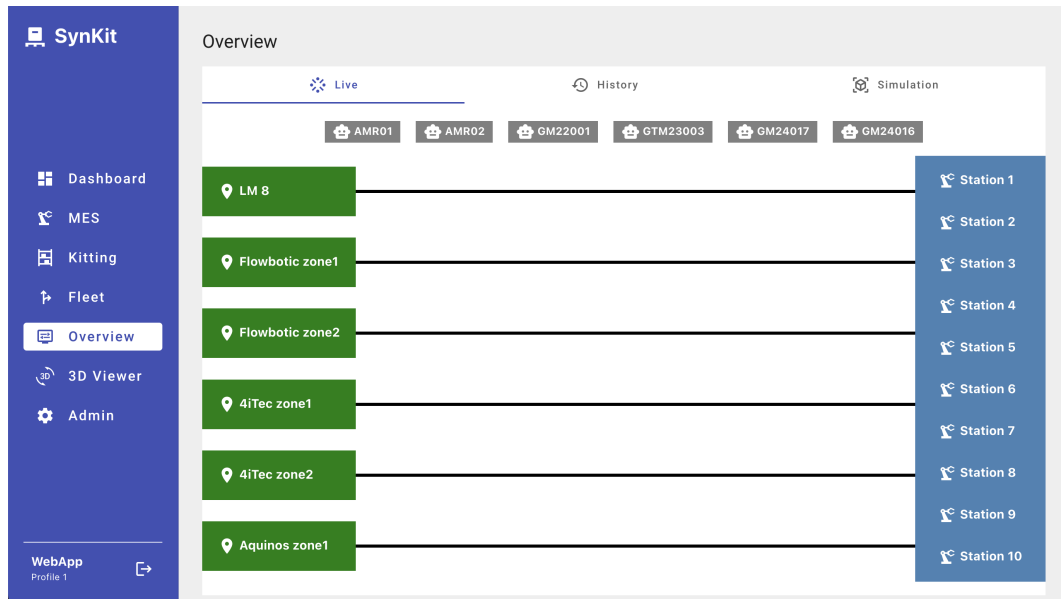
Figura 4.14: Página de acesso às informações relacionadas à frota

O botão *Overview* do menu principal dá acesso às funcionalidades de consulta dos estados atuais, do histórico e das simulações, como mostra a figura 4.15

Na primeira aba, *Overview > Live*, é apresentado o estado em tempo real das várias zonas de *kitting* e da movimentação dos AMR durante as missões de abastecimento à linha de produção. A segunda aba, *Overview > History*, possibilita a consulta do histórico e a respectiva representação das operações, similar à aba anterior. Já a terceira aba, *Overview > Simulation*, permite definir os parâmetros de entrada para um determinado cenário de operação e averiguar se é possível esse cenário definido ou não. Caso não o seja, são apresentadas alternativas que tornem esse cenário aplicável, por exemplo o aumento do número de AMR, ou ajuste dos tempos de operação.

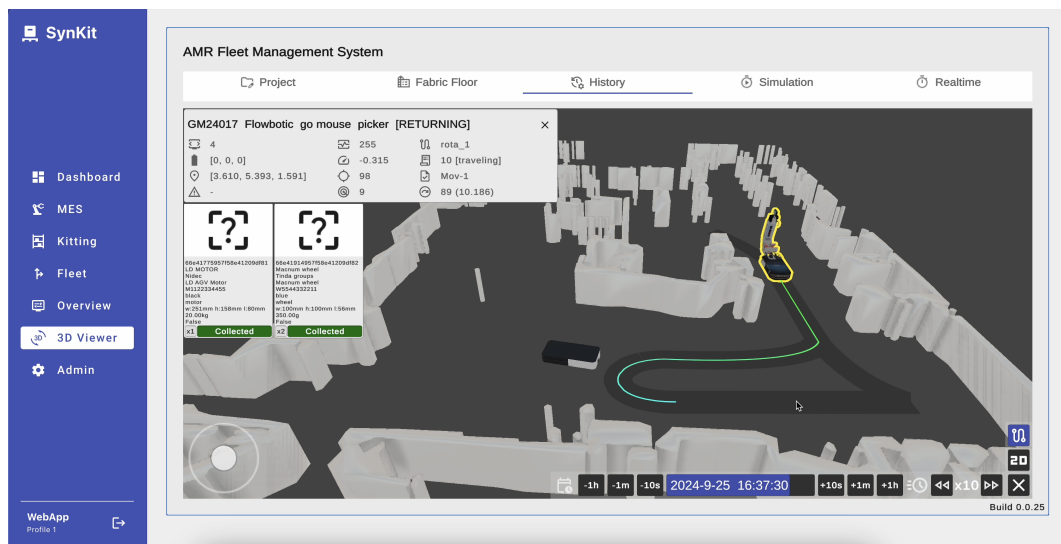
O botão *3D Viewer* do menu principal, permite aceder à representação 3D do processo e dos estados dos componentes em tempo real, que pode ser visto como um passo fundamental para a criação de um DT. Esta funcionalidade foi desenvolvida externamente e está perfeitamente integrada com o resto do sistema, como mostra a figura 4.16.

Esta funcionalidade permite representar os mapas das áreas envolvidas e dos veículos, num ambiente em 3D com possibilidade de navegar pelo espaço e analisar em mais detalhe determinados comportamentos. Além disso, também é possível consultar o histórico armazenado e representar neste ambiente 3D como se fosse uma máquina do tempo, possibilitando assim uma análise mais detalhada e fundamentada de alguns pontos específicos.



Fonte: SynKit

Figura 4.15: Página de acesso às informações relacionadas com a consulta e simulação



Fonte: SynKit

Figura 4.16: Página de acesso às informações relacionadas com o DT

Por fim, o botão *Admin* do menu principal, que dá acesso ao painel de administração do *Data Broker*, onde é possível definir os acessos, regras para os tópicos, criar fluxos de dados específicos, conectores externos e outros tipos de informações referentes ao mesmo.

A validação desde microsserviço foi sendo efetuada ao longo do desenvolvimento de cada microsserviço indicado anteriormente (iMES, mZone, mAMR e mSim). Nesses testes foram utilizados diferentes dispositivos desde os tradicionais computadores portáteis, passando pelos tablets e terminando nos dispositivos móveis, bastante utilizados nos dias que correm. Para a adaptação aos dispositivos móveis, a interface recorre a técnicas de responsividade que permitem dispor a informação e adaptar os componentes visuais, de forma a melhorar a leitura para o utilizador e tornar uma experiência de utilização mais agradável.

## 4.7 Testes

A fase de testes é a altura ideal para observar o comportamento do sistema como um todo, observar falhas ou potenciais pontos de falha, assim como identificar pontos de melhoria em vários aspetos, tais como utilização e desempenho. Conforme referido anteriormente, ao longo do desenvolvimento de cada módulo foram efetuados vários testes de conformidade de dados e validação de tarefas. Este tipo de testes permite que a cada incremento na solução se mantenha a qualidade e bom funcionamento do sistema. Porém, tornou-se necessário testar o comportamento global do sistema desenvolvido e para tal foram criados vários cenários de testes onde o grau de complexidade vai aumentando a cada novo cenário. De seguida serão apresentados os vários cenários de testes, assim como os resultados esperados versus os resultados obtidos.

### 4.7.1 Cenário 1 - Validação das fichas e atribuição ao AMR

Neste primeiro cenário de testes os objetivos principais passam por validar a criação das fichas de *kitting* e a movimentação automática do AMR. Tendo em conta a lista de Resultados Esperados definidos no Capítulo 3, tratam-se do item R1 e uma pequena parte do item R4, no que diz respeito à comunicação com o AMR.

Em primeiro lugar foi criado um produto constituído por duas peças distintas. De seguida foi criada uma zona de *kitting*, que continha as duas peças do produto. Por fim foi enviado um plano de produção teórico constituído por apenas 2 produtos. O resultado foi de encontro às expectativas e não foi verificado nenhum problema, dado que foi gerada uma ficha de *kitting* com as respetivas peças. Com base na ficha de *kitting*, observou-se que foi criada a respetiva missão de *picking* e entrega na linha de produção.

O segundo ponto a validar era a atribuição automática das missões ao AMR. Para tal, foi necessário recorrer a um equipamento de testes, apresentado na figura 4.17.



Fonte: Flowbotic

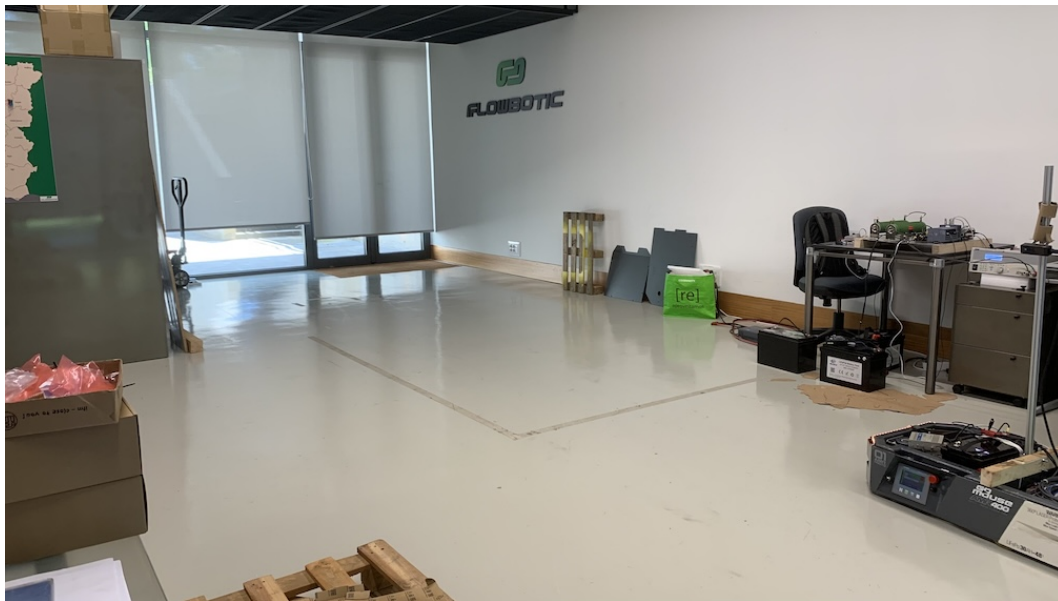
Figura 4.17: AMR de testes

Utilizou-se o espaço disponível no escritório da *Flowbotic*, em Coimbra, mostrado na figura 4.18, para simular o deslocamento do AMR até ao ponto de entrada da zona de *kitting* (espaço mais à esquerda) e posteriormente até ao ponto de entrega que será a linha de produção (espaço ao fundo do escritório, próximo do logótipo da *Flowbotic*).

Nesta primeira fase não era essencial que fosse executada a missão de *picking* completa, mas apenas a deslocação até à zona de *kitting* e, posteriormente, a deslocação até ao ponto de entrega. Mais uma vez, o resultado obtido foi bom, com o AMR a deslocar-se automaticamente após a atribuição de uma missão. Também se aproveitou a ocasião para realizar mais alguns testes isolados, desta vez relacionados com a movimentação do AMR, com base em pontos de referência e de forma sucessiva. Desta forma os pontos eram enviados manualmente e observado o comportamento do equipamento. O intuito era conhecer melhor o equipamento e ganhar mais confiança e experiência na atribuição de tarefas. Esta abordagem mais livre foi bastante benéfica para os próximos cenários de testes, abordados posteriormente.

#### 4.7.2 Cenário 2 - Validação das missões

O segundo cenário de testes teve o objetivo de validar a atribuição automática de missões ao AMR e a execução dessa mesma missão, através do deslocamento até



Fonte: Flowbotic

Figura 4.18: Espaço de testes no escritório da Flowbotic

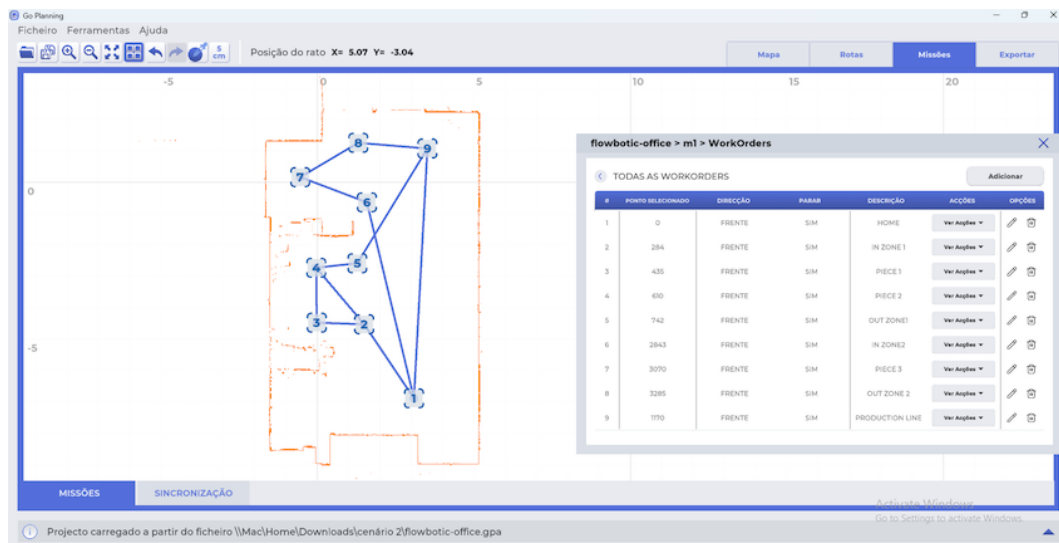
à zona de *kitting*, recolha de peças e posterior entrega na linha de produção. Com base nos Resultados Esperado definidos no Capítulo 3, trata-se do item R4.

Paralelamente ao que foi definido no cenário anterior, foi criado um produto constituído por três peças. Foi criada uma zona de *kitting* que continha duas peças do produto e outra zona que continha apenas uma peça do produto. No fim, foi enviado um plano de produção teórico constituído por 3 produtos. Assim como ocorreu no cenário anterior, a geração das fichas de *kitting* e respetivas missões foram executadas com sucesso, sem nenhuma ressalva.

Validada esta primeira etapa, passou-se à etapa de atribuição automática das missões ao AMR de testes, o mesmo que foi utilizado anteriormente, figura 4.17. Antes da execução da missão, foi necessário criar as rotas de entrega no software do *GoPlanning*, proprietário da *Flowbotic*, que se assemelha a uma ferramenta *low-code/no-code* para programar os AMR. Este software tem por base o mapa do espaço do escritório, figura 4.18, e possibilita a definição das rotas de navegação, os *checkpoints* e outras configurações inerentes tais como velocidades, sentidos de orientação e tarefas em cada *checkpoint*, como mostrado na figura 4.19.

Sempre com o intuito de aumentar a complexidade a cada cenário de testes, criou-se as duas zonas de *kitting* e o respetivo ponto de entrega representando a linha de produção. O *checkpoint* 1 representa o ponto de partida ou repouso dos AMR. A primeira zona de *kitting* está representada pelos *checkpoints* 2, 3, 4 e 5, sendo que:

- *checkpoint* 2: entrada da zona 1.
- *checkpoint* 3: local da peça 1.



Fonte: GoPlanning

Figura 4.19: Definição das rotas e *checkpoints* no GoPlanning, em Coimbra

- *checkpoint* 4: local da peça 2.
- *checkpoint* 5: saída da zona 1.

Por outro lado, a segunda zona de *kitting* está representada pelos *checkpoints* 6, 7 e 8, sendo que:

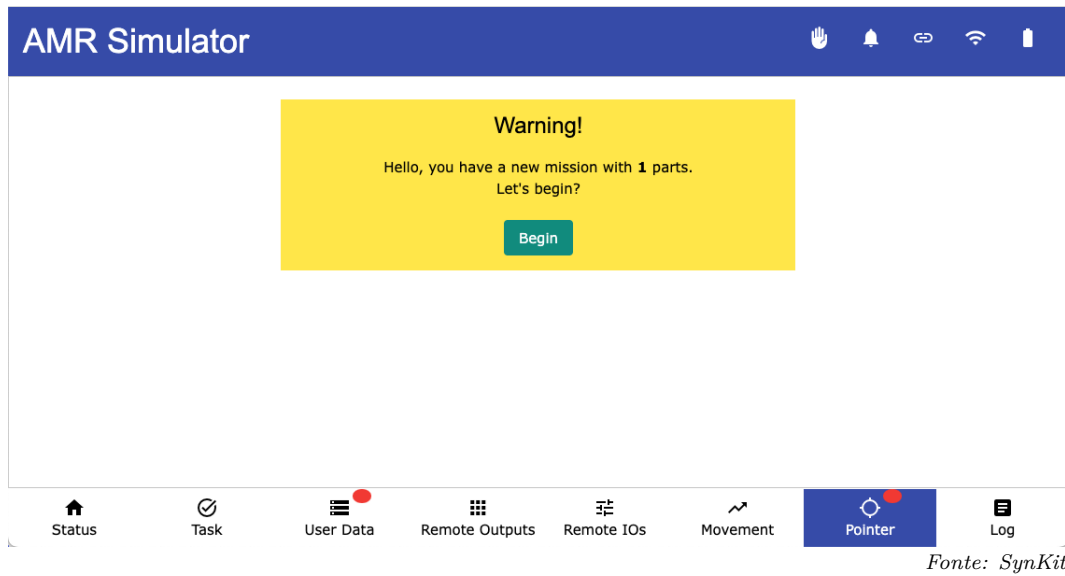
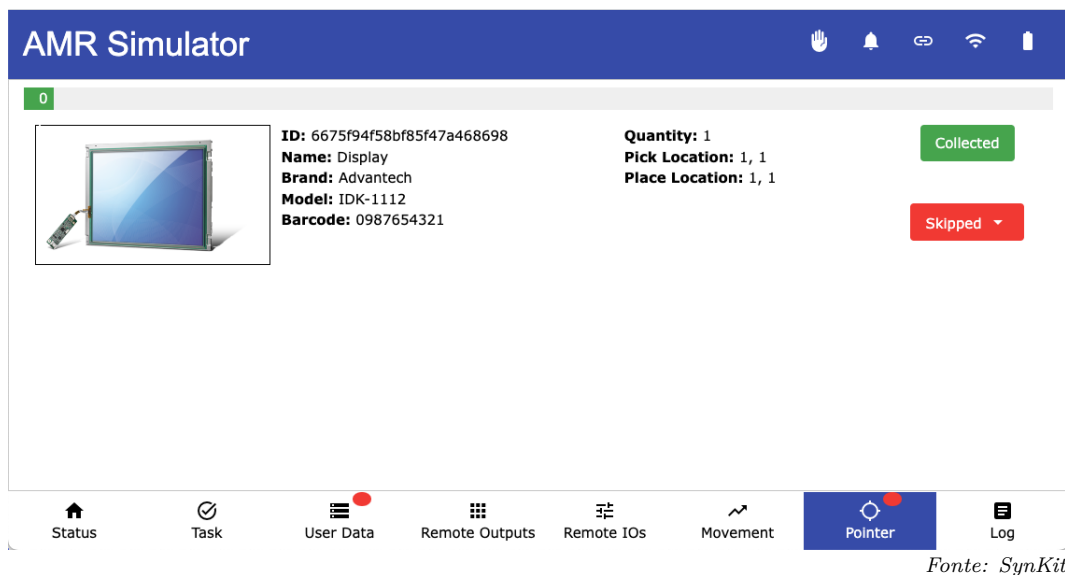
- *checkpoint* 6: entrada da zona 2.
- *checkpoint* 7: local da peça 3.
- *checkpoint* 8: saída da zona 2.

E, por fim, o *checkpoint* 9 que representa a linha de produção.

Dado que o periférico *Pointer* ainda não estava finalizado nesta altura e pronto para ser utilizado, foi desenvolvido um simulador deste periférico, como já referido, figuras 4.20 e 4.21, de modo a colmatar este problema.

Com o uso deste simulador seria possível realizar os testes propostos para este cenário, para não criar atraso no plano de trabalhos estabelecido. O *feedback* obtido neste cenário serviu para ajustar aspetos do *Pointer* que ainda não tinham sido desenvolvidos, mais concretamente a disposição dos elementos no ecrã e a possibilidade de se colocar motivos para a não recolha da peça.

Os primeiros ensaios foram realizados com apenas um AMR a executar a missão de *kitting*, onde foram obtidos bons resultados. Foi necessário realizar alguns ajustes nos *checkpoints* relacionados com as peças, devido à aproximação com o mobiliário do escritório. Ao nível do microserviço *WebApp* também foi necessário realizar alguns

Figura 4.20: Simulador do *Pointer* a sinalizar o início da recolhaFigura 4.21: Simulador do *Pointer* a apresentar o detalhe da peça

ajustes na apresentação da informação e criar uma funcionalidade para atribuir manualmente uma missão a um AMR específico.

Já os segundos ensaios foram realizados com a adição de outro veículo AMR disponível no escritório, para desta forma testar a concorrência entre equipamentos e missões. Os resultados também foram bons, não se verificando conflitos na atribuição de missões e observando-se com sucesso a execução em paralelo das missões, como mostra a figura 4.22.



Fonte: Flowbotic

Figura 4.22: Execução simultânea de missões por dois AMR

Na base da figura temos um computador portátil a consultar o microserviço *WebApp* e, do lado esquerdo deste, uma consola a consultar o componente *3DViewer* que nada mais é que um DT desenvolvido para o efeito. Ao centro da figura temos um AMR a executar a missão na zona de *kitting 1* e ao fundo vemos um segundo AMR a realizar a entrega das peças, referente à missão na zona de *kitting 2*.

No geral, os resultados obtidos foram bastante bons e geraram bastante *feedback* para melhor aspetos relacionados com a apresentação e organização da informação.

### 4.7.3 Cenário 3 - Validação do Pointer

Este novo cenário de testes visa validar o funcionamento do periférico *Pointer*, assim como os restantes elementos, Sistema Informático e AMR num novo ambiente. Para tal foram escolhidas as outras instalações da *Flowbotic*, em Mangualde, por possuir um espaço maior e possibilitar maior diversidade de testes.

O aspeto visual do AMR de testes mudou bastante, uma vez que já possui o periférico *Pointer* acoplado, como mostra a figura 4.23.



Fonte: Flowbotic

Figura 4.23: AMR de testes com o periférico *Pointer* acoplado

Tal como aconteceu nos cenários anteriores, foi criado um produto com as respectivas peças e estas foram distribuídas pela zona de *kitting* criada para o efeito. Desta vez foram gerados código de barras e colocados nas prateleiras das estantes, para simular a localização física das peças, e testar o periférico *Pointer* na identificação e posterior sinalização com recurso ao *laser*.

Como se tratava de um novo espaço, foi necessário recorrer novamente ao software *GoPlanning* para criar as rotas no mapa gerado pelo AMR. O resultado é mostrado pela figura 4.24.

O checkpoint 11 representa o ponto de partida ou repouso do AMR. A zona de *kitting* está representada pelos *checkpoints* 6, 7 e 8, sendo que:

- *checkpoint* 6: entrada e saída da zona.
- *checkpoint* 7: local da peça 1.
- *checkpoint* 8: local da peça 2.

Neste novo cenário foi ainda testada uma zona intermediária, para passagem do kit para outro AMR que vai fazer a entrega na linha de produção. Em virtude dessa nova realidade foram criados novos *checkpoints* 13, 14 e 15, sendo:

- *checkpoint* 13: rotação do AMR.
- *checkpoint* 14: entrega do kit na zona intermediária.
- *checkpoint* 15: espera do AMR que transporta para a linha de produção.



Fonte: GoPlanning

Figura 4.24: Definição das rotas e *checkpoints* no *GoPlanning*, em Mangualde

O primeiro lote de testes foi focado no funcionamento do *Pointer* e resultaram num conjunto de ajustes no funcionamento interno deste e na comunicação para com o microserviço *mAMR*. Estes ajustes foram aplicados no momento e validados a cada repetição da missão de testes. Também foi identificado um ponto de melhoria, de modo a evitar que o *Pointer* estivesse sempre a analisar a câmara e a tentar apontar o laser. A melhoria passa por informar o *Pointer* no momento que o AMR chega ao ponto de coleta, como mostra a figura 4.25.

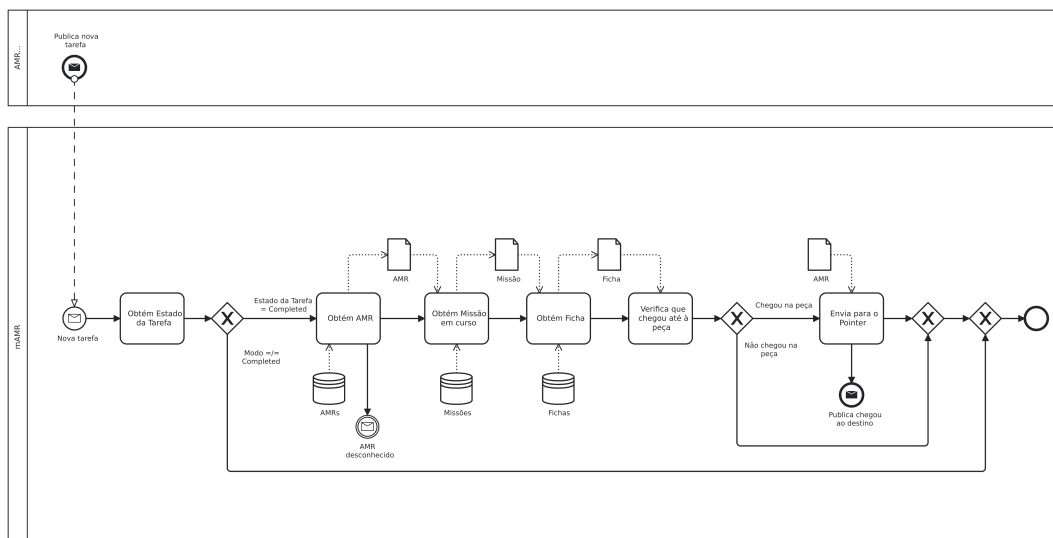


Figura 4.25: Sinaliza que o AMR chegou ao ponto de coleta da peça

A origem do tratamento é a publicação do estado da tarefa por parte do AMR, quando esta possui o valor *Completed*. De seguida são efetuadas as verificações ao

nível do AMR, missão atribuída e respetiva ficha de *kitting*. Após isso, é analisado se o ponto onde o AMR está localizado é um ponto de coleta de alguma peça da ficha de *kitting*. Se sim, é publicada a informação para o *Pointer*, de que o AMR chegou no ponto de coleta. Senão, nada acontece e o processo termina.

No presente contexto também houve uma decisão importante que vale a pena ressaltar, referente a manter o sistema como o único interlocutor com os AMR, visando simplificar o desenvolvimento interno do *Pointer* e possibilitar que haja uma abstração dos veículos autónomos.

Ultrapassados esses ajustes críticos, e obtendo bons resultados nos testes, passou-se a um novo lote que seria a utilização da zona intermediária para a passagem de kits entre os AMR. O modo de funcionamento desta zona intermediária é bastante simples: o AMR que realiza a tarefa de *picking* deixa o kit num ponto dessa zona, e retorna ao ponto de partida; após a saída do primeiro AMR, outro AMR que está previamente no ponto de espera, vai até ao ponto que contém o kit e transporta-o até à linha de produção; depois da entrega, o segundo AMR volta para o ponto de espera da zona intermediária. A figura 4.26 apresenta essa mesma zona intermediária, com os dois AMR.



Fonte: Flowbotic

Figura 4.26: Zona intermediária para passagem de kit entre AMR

O segundo lote de testes também decorreu bem, tendo resultado em alguns ajustes na localização dos pontos referentes à zona intermediária. Também foram realizados ajustes no microsserviço *mAMR*, que realiza a gestão dos veículos autónomos, de modo a coordenar da melhor forma o momento da saída do primeiro AMR com o momento de carga do kit pelo segundo AMR, evitando assim qualquer tipo de colisão ou bloqueio dos veículos.

#### 4.7.4 Testes de Carga

Outro resultado diretamente relacionado com a divisão dos módulos da aplicação em microsserviços é a possibilidade de alocar recursos a um módulo específico. Esta arquitetura evita um aumento concertado e excessivo dos recursos alocados devido à necessidade de mais do que um componente. Garante que os recursos alocados são os necessários no momento e serão libertados no futuro, devido à redução da procura. Esta alocação direcionada de recursos provoca um desequilíbrio em relação ao número de instâncias que cada microsserviço possui, como mostra a figura 4.27.

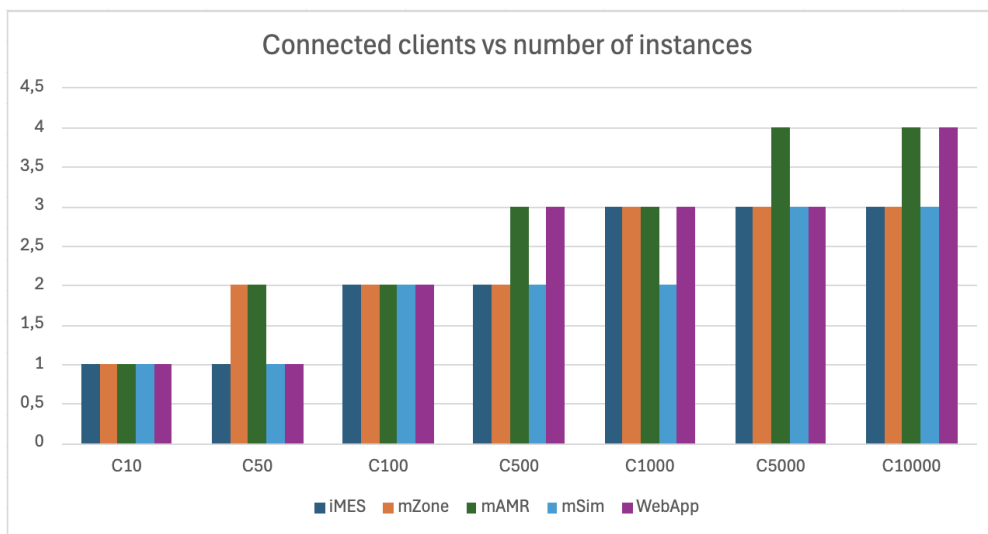


Figura 4.27: Clientes ligados versus número de instâncias dos microsserviços

Ao longo dos vários cenários de utilização, ordenados desde o menor número de utilizadores (C10) até ao maior número de utilizadores (C10000), verifica-se que os módulos mais utilizados na execução do processo são o mAMR e o WebApp, uma vez que são estes que tratam diretamente com a frota de AMR e os utilizadores, seguindo-se o mZone e o iMES, que tratam da geração dos registos de *kitting* e da interface com o MES.

Esta forma de gerir os recursos necessários à aplicação de forma modular e elástica em função da procura existente no momento potencia a redução do consumo de energia para manter a infraestrutura operacional, melhorar a eficiência e consequentemente reduzir a pegada de carbono associada. Além disso, permite também que sejam alocados recursos não utilizados a outras aplicações que necessitem, o que, ao analisar cuidadosamente a situação das aplicações e das suas respetivas cargas com o parque de servidores disponível, pode levar à redução de equipamentos necessários ao funcionamento, o que impulsionará a redução dos custos operacionais.

### 4.7.5 Verificação dos Requisitos Funcionais

Após os vários cenários de testes e as várias integrações do sistema, vale a pena fazer uma recapitulação dos requisitos definidos anteriormente na secção 3.3 do capítulo 3, e comparar com o sistema desenvolvido, por forma a validar que todos eles estão implementados e respondem da melhor forma. A tabela 4.2 visa apresentar esse balanço dos Requisitos Funcionais definidos versus os implementados.

Requisito	Implementado	Função/Microsserviço
<b>RF1</b>	Sim	mZone + iMES + WebApp
<b>RF1.1</b>	Sim	mZone + WebApp
<b>RF1.2</b>	Sim	mZone + iMES + WebApp
<b>RF1.3</b>	Sim	mZone + WebApp
<b>RF2</b>	Sim	mAMR + WebApp
<b>RF2.1</b>	Sim	mAMR + WebApp
<b>RF2.2</b>	Sim	mAMR + WebApp
<b>RF2.3</b>	Sim	mAMR + WebApp
<b>RF3</b>	Sim	mSim + iMES + WebApp
<b>RF3.1</b>	Sim	mSim + iMES + WebApp
<b>RF3.2</b>	Sim	mSim + WebApp
<b>RF3.3</b>	Sim	mSim + WebApp
<b>RF3.4</b>	Sim	mSim + iMES + WebApp

Tabela 4.2: Requisitos Funcionais definidos vs implementados

Assim como os Requisitos Funcionais, também é possível efetuar o mesmo género de balanço para os Requisitos Não Funcionais. A tabela 4.3 demonstra esse balanço.

### 4.7.6 Divulgação na Feira Internacional Motek 2024

Durante a execução do projeto houve a oportunidade de participar na Feira Internacional *Motek 2024* [Motek, 2024] a convite da empresa *InKlusion Entertainment* [InKlusion, 2024] e do consórcio *Produtech R3* [ProdutechR3, 2024]. No anexo C é possível consultar mais detalhes sobre a feira, assim como o *stand* referente ao *SynKit*.

<b>Requisito</b>	<b>Implementado</b>	<b>Modo/Forma</b>
<b>RNF1</b>	Sim	Containers <i>Docker</i> + <i>Kubernetes</i>
<b>RNF1.1</b>	Sim	Containers <i>Docker</i> + <i>Kubernetes</i>
<b>RNF1.2</b>	Sim	Containers <i>Docker</i> + <i>Kubernetes</i>
<b>RNF1.3</b>	Sim	Containers <i>Docker</i> + <i>Kubernetes</i>
<b>RNF2</b>	Sim	Protocolos MQTTS + HTTPS
<b>RNF2.1</b>	Sim	<i>Data Broker EMQX</i>
<b>RNF2.2</b>	Sim	Logs + <i>Historian</i>
<b>RNF2.3</b>	Sim	Protocolos MQTTS + HTTPS
<b>RNF3</b>	Sim	<i>Kubernetes</i>
<b>RNF3.1</b>	Sim	<i>Kubernetes</i>
<b>RNF3.2</b>	Sim	<i>Kubernetes</i>
<b>RNF4</b>	Sim	Microserviço WebApp
<b>RNF4.1</b>	Sim	Microserviço WebApp
<b>RNF4.2</b>	Sim	Sessões de apresentação e formação
<b>RNF5</b>	Sim	Arquitetura distribuída + Documentação
<b>RNF5.1</b>	Sim	Arquitetura distribuída
<b>RNF5.2</b>	Sim	Documentação
<b>RNF6</b>	Sim	Containers <i>Docker</i> + <i>Kubernetes</i>
<b>RNF6.1</b>	Sim	<i>Data Broker EMQX</i>
<b>RNF6.2</b>	Sim	Containers <i>Docker</i> + <i>Kubernetes</i>
<b>RNF6.3</b>	Sim	Biblioteca <i>SWAGGER</i> no iMES

Tabela 4.3: Requisitos Não Funcionais definidos vs implementados



## Capítulo 5

# Conclusão e Trabalho Futuro

O trabalho realizado ao longo desta tese consistiu no desenvolvimento de uma prova de conceito para a gestão das zonas de kitting. Para tal, foi necessário compreender o processo industrial, tanto o modo de funcionamento atual como o modo de funcionamento pretendido para o futuro, além de todos os participantes nas várias operações que compõem o processo em questão.

Os objetivos principais dividiam-se em três eixos principais: a gestão das zonas de kitting, a gestão da frota de AMR e a simulação do processo. O primeiro eixo foi desenvolvido e aplicado corretamente, respeitando a organização interna da empresa e a composição dos produtos. A interligação com o sistema MES permitiu a criação do referencial de informação sobre os produtos e os planos de produção. O segundo eixo também foi escrupulosamente desenvolvido e aplicado, de modo a fazer a ponte entre a necessidade de realizar os kits, e gerir a frota de AMR disponíveis para o efeito. O sincronismo entre as operações e a movimentação dos veículos autónomos foi uma peça chave para obter um bom resultado. O terceiro eixo tirou proveito dos dois eixos referidos anteriormente, e possibilitou a criação de um ambiente de testes controlados com grande potencial para validar hipóteses de melhoria de processo, mas também para encontrar vertentes de evolução do processo produtivo que antes pareciam ser difíceis de visualizar ou até mesmo impossíveis de validar.

Ao longo da execução do projeto foram identificados uma panóplia de desafios, principalmente relacionados com a disponibilização do protótipo do AMR e do protótipo do *Pointer*, para a realização de testes e validações. Ambos os desafios foram ultrapassados, através da criação de um simulador tendo como base os protocolos de

comunicação definidos, tanto para o AMR como para o *Pointer*. Este mesmo simulador demonstrou-se ser uma mais valia em todo o projeto na medida em que evitou que houvessem atrasos na execução, e ainda permitiu aprimorar a comunicação com o *Pointer* e até melhorar o protocolo de comunicação definido inicialmente.

O desenvolvimento deste projeto gerou contribuições valiosas, algumas das quais permitiram capacitar o protótipo com funcionalidades avançadas, que o tornam diferenciador e inovador. Um caso concreto diz respeito à arquitetura do sistema ser baseada em microsserviços e orientada a eventos, o que torna o sistema robusto, escalável e resiliente. Este resultado torna-se mais visível na sincronização de processos entre o operador, o sistema e o AMR, com uma fluidez notável e uma boa sinergia entre todos. Outra contribuição a salientar é a componente de simulação, que permite a análise e melhoria do processo produtivo de uma forma mais ágil e rápida, evitando assim a complexidade atual de criar cenários de teste, e validar hipóteses muitas vezes com recurso a tentativa e erro. Paralelamente a tudo e isto, e do ponto de vista de conhecimento e experiência, vale a pena enaltecer a contribuição dos orientadores e da equipa da *InKlusion Entertainment* que permitiu afinar aspetos relacionados com a componente prática do projeto, e com o modo de funcionamento no contexto real.

A execução deste projeto também se deparou com algumas limitações, desde logo a conciliação das agendas e da disponibilidade entre as várias entidades para a realização de testes presenciais. Outra limitação encontrada foi o espaço físico necessário para realizar os testes de integração, uma vez que é preciso recriar a zona de *kitting* com as estantes e as peças e ou as respetivas caixas, a linha de produção para a entrega dos kits e as respetivas rotas de abastecimento. Esta limitação foi sendo ultrapassada gradativamente graças à estratégia de testes ser incremental, o que permitiu uma validação sustentável do protótipo.

Ainda a salientar dois aspetos importantes nesta tese que estão relacionados com as dimensões do projeto em causa. A primeira dimensão compreende as questões relacionadas com a componente de Investigação e Desenvolvimento, e tem como objetivo explorar e criar novas abordagens que permitam dar resposta ao problema em causa, mas possuam uma componente inovadora que permita torna-se diferenciadora. Neste âmbito, pode-se referir o trabalho de pesquisa do estado atual de soluções para gestão de *kitting*, que comprova a existência de uma lacuna e a vertente inovadora de aspetos do protótipo proposto, fundamentada pela publicação de, pelo menos um artigo [Nascimento et al., 2024], que descreve este sistema. A segunda dimensão diz respeito ao projeto prático que visa implementar as abordagens analisadas na dimensão anterior, e seguidamente materializar sob a forma de uma prova de conceito, para que possa demonstrar os resultados obtidos e seja aplicado em contexto real e prático, mais concretamente fora do ambiente laboratorial.

No que respeita a trabalho futuro, após a implementação bem-sucedida numa

fábrica, o próximo passo do lado operacional será aplicar o sistema noutras fábricas do grupo para tornar a solução mais madura e robusta. A diversidade de produtos e as especificidades locais de cada fábrica contribuem significativamente para refinar e valorizar a solução, pois permitem que a solução seja testada e adaptada a diferentes cenários, aumentando a sua versatilidade e fiabilidade.

Para dar continuidade ao trabalho realizado até ao momento, do ponto de vista tecnológico, o próximo passo será explorar o conceito de nuvem híbrida, que combina a infraestrutura local com serviços baseados na nuvem. Esta abordagem visa reduzir os custos de infraestrutura local e, ao mesmo tempo, aproveitar a flexibilidade e a escalabilidade da nuvem. Além disso, poderá ser possível responder a futuras flutuações na procura ou a problemas que possam ocorrer localmente.

Uma vez implementado o conceito de nuvem híbrida, é possível explorar outro eixo de investigação: a partilha de um conjunto de instâncias. O conceito envolve um conjunto de instâncias de nuvem que podem responder a múltiplas plantas devido à elevada procura local, problemas particulares ou necessidades específicas, como manutenção ou migração.

Um aspeto crítico da investigação futura será a melhoria da componente DT, com a representação 3D do ambiente industrial e a possibilidade de imersão no chão de fábrica com recurso a tecnologias de VR. Além da visão em tempo real, torna possível dar vida às simulações geradas. Desta forma, será possível olhar para a simulação de um outro ponto de vista e analisar os resultados sob diferentes perspetivas. Por outro lado, esta tecnologia permite a utilização de óculos VR para permitir uma maior imersão.

Outra área de investigação está relacionada com a IA e como estes modelos de IA podem contribuir para melhorar a simulação gerada. Esta tecnologia permitirá a introdução de mais fatores que impactam ou podem impactar o processo em análise. Além disso, estes mesmos modelos podem analisar as simulações geradas e propor melhorias do ponto de vista da eficiência. Em alternativa, talvez explorar outras abordagens que atendam aos parâmetros de entrada e a tornem viável do ponto de vista da aplicabilidade.



# Referências

- [Abouzied et al., 2024] Abouzied, A. A., Kouta, H. K., Elhadek, M. A., and Aly, S. (2024). Unlocking the potential of industry 4.0 technologies in the egyptian industry. *Port-Said Engineering Research Journal*. [Citado na página 48]
- [Adel, 2022] Adel, A. (2022). Future of industry 5.0 in society: Human-centric solutions, challenges and prospective research areas. *Journal of Cloud Computing*, 11(1):1–15. [Citado na página 14]
- [Adib et al., 2021] Adib, M. Y. M., Razia, J., and Rahman, M. T. (2021). Experimental comparison between genetic algorithm and ant colony optimization on traveling salesman problem. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 8(1):155–162. [Citado na página 52]
- [Akhtar et al., 2022] Akhtar, A., Bakhtawar, B., and Akhtar, S. (2022). Extreme programming vs scrum: A comparison of agile models. *International Journal of Technology, Innovation and Management (IJTIM)*, 2(2):80–96. [Citado na página 27]
- [Akundi et al., 2022] Akundi, A., Euresti, D., Luna, S., Ankobiah, W., Lopes, A., and Edinbarough, I. (2022). State of industry 5.0—analysis and identification of current research trends. *Applied System Innovation*, 5(1):27. [Citado na página 13]
- [Al Jawarneh et al., 2019] Al Jawarneh, I. M., Bellavista, P., Bosi, F., Foschini, L., Martuscelli, G., Montanari, R., and Palopoli, A. (2019). Container orchestration engines: A thorough functional and performance comparison. In *ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6. IEEE. [Citado na página 32]
- [Alatise and Hancke, 2020] Alatise, M. B. and Hancke, G. P. (2020). A review on challenges of autonomous mobile robot and sensor fusion methods. *IEEE Access*, 8:39830–39846. [Citado na página 2]
- [Aljawawdeh et al., 2023] Aljawawdeh, H., Sabri, M., and Maghrabi, L. (2023). Toward serverless and microservices architecture: Literature, methods, and best practices. In *Artificial Intelligence, Internet of Things, and Society 5.0*, pages 573–584. Springer. [Citado na página 46]

- [Ameller et al., 2019] Ameller, D., Franch, X., Gómez, C., Martínez-Fernández, S., Araújo, J., Biffi, S., Cabot, J., Cortellessa, V., Fernández, D. M., Moreira, A., et al. (2019). Dealing with non-functional requirements in model-driven development: A survey. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 47(4):818–835. [Citado na página 38]
- [Aron et al., 2023] Aron, C., Sgarbossa, F., Ballot, E., and Ivanov, D. (2023). Cloud material handling systems: a cyber-physical system to enable dynamic resource allocation and digital interoperability. *Journal of Intelligent Manufacturing*, pages 1–22. [Citado na página 22]
- [Arundel and Domingus, 2019] Arundel, J. and Domingus, J. (2019). *Cloud Native DevOps with Kubernetes: building, deploying, and scaling modern applications in the Cloud*. O’Reilly Media. [Citado na página 17]
- [Astigarraga et al., 2020] Astigarraga, A., Lopez-Gasso, A., Golpe, D., Beriain, A., Solar, H., Del Rio, D., and Berenguer, R. (2020). A 21 m operation range rfid tag for “pick to light” applications with a photovoltaic harvester. *Micromachines*, 11(11):1013. [Citado na página 5]
- [Banno and Yoshizawa, 2021] Banno, R. and Yoshizawa, T. (2021). A scalable iot data collection method by shared-subscription with distributed mqtt brokers. In *International Conference on Mobile Networks and Management*, pages 218–226. Springer. [Citado na página 48]
- [Baškarada et al., 2020] Baškarada, S., Nguyen, V., and Koronios, A. (2020). Architecting microservices: Practical opportunities and challenges. *Journal of Computer Information Systems*. [Citado na página 46]
- [Cao et al., 2020] Cao, Y., Wang, B., Zhao, W., Zhang, X., and Wang, H. (2020). Research on searching algorithms for unstructured grid remapping based on kd tree. In *2020 IEEE 3rd International Conference on Computer and Communication Engineering Technology (CCET)*, pages 29–33. IEEE. [Citado na página 53]
- [Chien and Wang, 2022] Chien, H.-Y. and Wang, N.-Z. (2022). A novel mqtt 5.0-based over-the-air updating architecture facilitating stronger security. *Electronics*, 11(23):3899. [Citado na página 48]
- [de Melo Costa and Leite, 2017] de Melo Costa, L. A. and Leite, S. (2017). Melhoria de operações logísticas num armazém de retalho. Master’s thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. [Citado na página 20]
- [de Paula Ferreira et al., 2020] de Paula Ferreira, W., Armellini, F., and De Santa-Eulalia, L. A. (2020). Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. *Computers & Industrial Engineering*, 149:106868. [Citado na página 20]

- [De Ryck et al., 2020] De Ryck, M., Versteyhe, M., and Debrouwere, F. (2020). Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques. *Journal of Manufacturing Systems*, 54:152–173. [Citado nas páginas 3 e 47]
- [Detty and Yingling, 2000] Detty, R. B. and Yingling, J. C. (2000). Quantifying benefits of conversion to lean manufacturing with discrete event simulation: a case study. *International journal of production research*, 38(2):429–445. [Citado na página 19]
- [Dias, 2022] Dias, S. C. M. (2022). Digital twins in iiot. Master’s thesis, Universidade de Aveiro. [Citado na página 21]
- [Docker, 2023] Docker (2023). Docker: Accelerated container application development. [Citado na página 32]
- [Erasmus et al., 2020] Erasmus, J., Vanderfeesten, I., Traganos, K., and Grefen, P. (2020). Using business process models for the specification of manufacturing operations. *Computers in Industry*, 123:103297. [Citado na página 31]
- [Flowbotic, 2024] Flowbotic (2024). Flowbotic - streamline your logistics flow with our next-generation amrs. [Citado na página 47]
- [Fragapane et al., 2021] Fragapane, G., De Koster, R., Sgarbossa, F., and Strandhagen, J. O. (2021). Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research*, 294(2):405–426. [Citado nas páginas 3 e 47]
- [Friederich et al., 2022] Friederich, J., Francis, D. P., Lazarova-Molnar, S., and Mohamed, N. (2022). A framework for data-driven digital twins of smart manufacturing systems. *Computers in Industry*, 136:103586. [Citado na página 20]
- [Gartner, 2023] Gartner (2023). Magic quadrant for manufacturing execution systems. [Citado na página 6]
- [GBT, 2024] GBT (2024). Gbt solutions. [Citado na página 47]
- [Ghodsian et al., 2024] Ghodsian, N., Benfriha, K., Olabi, A., Gopinath, V., Talhi, E., Hof, L., and Arnou, A. (2024). Msoa: A modular service-oriented architecture to integrate mobile manipulators as cyber-physical systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, pages 1–20. [Citado na página 23]
- [Ghodsian et al., 2023] Ghodsian, N., Benfriha, K., Olabi, A., Gopinath, V., Talhi, E., Hof, L. A., and Arnou, A. (2023). A framework to integrate mobile manipulators as cyber-physical systems into existing production systems in the context of industry 4.0. *Robotics and Autonomous Systems*, 169:104526. [Citado nas páginas 22 e 23]

- [Gkamas et al., 2022] Gkamas, T., Karaiskos, V., and Kontogiannis, S. (2022). Performance evaluation of distributed database strategies using docker as a service for industrial iot data: Application to industry 4.0. *Information*, 13(4):190. [Citado na página 16]
- [Gong et al., 2020] Gong, Y., Gu, F., Chen, K., and Wang, F. (2020). The architecture of micro-services and the separation of front-end and back-end applied in a campus information system. In *2020 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA)*, pages 321–324. IEEE. [Citado nas páginas 15 e 31]
- [Google, 2023] Google (2023). Angular - deliver web apps with confidence. [Citado na página 29]
- [Gupta and Srivastava, 2020] Gupta, A. and Srivastava, S. (2020). Comparative analysis of ant colony and particle swarm optimization algorithms for distance optimization. *Procedia Computer Science*, 173:245–253. [Citado na página 52]
- [Hayat et al., 2019] Hayat, F., Rehman, A. U., Arif, K. S., Wahab, K., and Abbas, M. (2019). The influence of agile methodology (scrum) on software project management. In *2019 20th IEEE/ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD)*, pages 145–149. IEEE. [Citado nas páginas 9, 28 e 36]
- [He and Bai, 2021] He, B. and Bai, K.-J. (2021). Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: A review. *Advances in Manufacturing*, 9:1–21. [Citado na página 18]
- [Helmold, 2020a] Helmold, M. (2020a). Kaizen: Continuous improvements in small steps. In *Lean Management and Kaizen: Fundamentals from Cases and Examples in Operations and Supply Chain Management*, pages 25–30. Springer. [Citado na página 2]
- [Helmold, 2020b] Helmold, M. (2020b). Principles of a lean production system. In *Lean Management and Kaizen: Fundamentals from Cases and Examples in Operations and Supply Chain Management*, pages 79–89. Springer. [Citado na página 1]
- [Huang et al., 2022] Huang, S., Wang, B., Li, X., Zheng, P., Mourtzis, D., and Wang, L. (2022). Industry 5.0 and society 5.0—comparison, complementation and co-evolution. *Journal of manufacturing systems*, 64:424–428. [Citado na página 14]
- [InKlusion, 2024] InKlusion (2024). Inklusion - you dream it, we build it. [Citado nas páginas 78 e 113]

- [Jaskó et al., 2020] Jaskó, S., Skrop, A., Holczinger, T., Chován, T., and Abonyi, J. (2020). Development of manufacturing execution systems in accordance with industry 4.0 requirements: A review of standard-and ontology-based methodologies and tools. *Computers in industry*, 123:103300. [Citado na página 3]
- [Kamble et al., 2020] Kamble, S., Gunasekaran, A., and Dhone, N. C. (2020). Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in indian manufacturing companies. *International journal of production research*, 58(5):1319–1337. [Citado na página 12]
- [Khajavi et al., 2019] Khajavi, S. H., Motlagh, N. H., Jaribion, A., Werner, L. C., and Holmström, J. (2019). Digital twin: vision, benefits, boundaries, and creation for buildings. *IEEE access*, 7:147406–147419. [Citado na página 4]
- [Khasanah and Sarmini, 2023] Khasanah, F. and Sarmini, S. (2023). Implementation of scrum method for keep wallet application design. *International Journal of Informatics and Information Systems*, 6(3):103–113. [Citado na página 28]
- [Kubernetes, 2023] Kubernetes (2023). Kubernetes: Production-grade container orchestration. [Citado na página 32]
- [Kumar et al., 2022] Kumar, N., Hasan, S. S., Srivastava, K., Akhtar, R., Yadav, R. K., and Choubey, V. K. (2022). Lean manufacturing techniques and its implementation: A review. *Materials Today: Proceedings*, 64:1188–1192. [Citado na página 2]
- [Leng et al., 2022] Leng, J., Sha, W., Wang, B., Zheng, P., Zhuang, C., Liu, Q., Wu, T., Mourtzis, D., and Wang, L. (2022). Industry 5.0: Prospect and retrospect. *Journal of Manufacturing Systems*, 65:279–295. [Citado na página 13]
- [Leng et al., 2021] Leng, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q., and Chen, X. (2021). Digital twins-based smart manufacturing system design in industry 4.0: A review. *Journal of manufacturing systems*, 60:119–137. [Citado na página 19]
- [Li et al., 2022] Li, L., Lei, B., and Mao, C. (2022). Digital twin in smart manufacturing. *Journal of Industrial Information Integration*, 26:100289. [Citado na página 4]
- [Lu et al., 2020] Lu, Y., Liu, C., Kevin, I., Wang, K., Huang, H., and Xu, X. (2020). Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 61:101837. [Citado na página 18]
- [Maddikunta et al., 2022] Maddikunta, P. K. R., Pham, Q.-V., Prabadevi, B., Depepa, N., Dev, K., Gadekallu, T. R., Ruby, R., and Liyanage, M. (2022). Industry

- 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. *Journal of Industrial Information Integration*, 26:100257. [Citado na página 13]
- [Mantravadi and Møller, 2019] Mantravadi, S. and Møller, C. (2019). An overview of next-generation manufacturing execution systems: How important is mes for industry 4.0? *Procedia manufacturing*, 30:588–595. [Citado na página 3]
- [Manufacturing, 2023] Manufacturing, C. (2023). Critical manufacturing mes. [Citado na página 22]
- [Mao et al., 2020] Mao, Y., Fu, Y., Gu, S., Vhaduri, S., Cheng, L., and Liu, Q. (2020). Resource management schemes for cloud-native platforms with computing containers of docker and kubernetes. *arXiv preprint arXiv:2010.10350*. [Citado na página 16]
- [Markkanen, 2023] Markkanen, N. (2023). Industry 4.0 automation system and network architecture to enhance data transmission and availability of information in industry automation. [Citado na página 48]
- [Matic et al., 2021] Matic, M., Antic, M., Istvan, P., and Ivanovic, S. (2021). Optimization of mqtt communication between microservices in the iot cloud. In *2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pages 1–3. IEEE. [Citado na página 48]
- [Miao et al., 2021] Miao, C., Chen, G., Yan, C., and Wu, Y. (2021). Path planning optimization of indoor mobile robot based on adaptive ant colony algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 156:107230. [Citado na página 50]
- [Microsoft, 2023] Microsoft (2023). C#documentation. [Citado na página 29]
- [Mishra and Otaiwi, 2020] Mishra, A. and Otaiwi, Z. (2020). Devops and software quality: A systematic mapping. *Computer Science Review*, 38:100308. [Citado na página 33]
- [Mishra and Kertesz, 2020] Mishra, B. and Kertesz, A. (2020). The use of mqtt in m2m and iot systems: A survey. *IEEE Access*, 8:201071–201086. [Citado nas páginas 15 e 48]
- [Mishra et al., 2021] Mishra, B., Mishra, B., and Kertesz, A. (2021). Stress-testing mqtt brokers: A comparative analysis of performance measurements. *Energies*, 14(18):5817. [Citado na página 48]
- [Mkansi et al., 2020] Mkansi, M., de Leeuw, S., and Amosun, O. (2020). Mobile application supported urban-township e-grocery distribution. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 50(1):26–53. [Citado na página 5]

- [Motek, 2024] Motek (2024). Motek international trade fair for automation in production and assembly. [Citado nas páginas 78 e 113]
- [Mourtzis, 2020] Mourtzis, D. (2020). Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends. *International Journal of Production Research*, 58(7):1927–1949. [Citado na página 20]
- [Nascimento et al., 2024] Nascimento, B., Wanzeller, C., Silva, J., Dias, J. A., Barbosa, A., and Ribeiro, J. (2024). Synkit: A event-driven and scalable microservices-based kitting system. *International Journal of Computer and Information Engineering*, 18(10):245–253. [Citado na página 82]
- [Oracle, 2023] Oracle (2023). Oracle supply chain management. [Citado na página 22]
- [Pagliosa et al., 2021] Pagliosa, M., Tortorella, G., and Ferreira, J. C. E. (2021). Industry 4.0 and lean manufacturing: A systematic literature review and future research directions. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(3):543–569. [Citado na página 12]
- [Pan et al., 2024] Pan, Y., Zhong, R. Y., Qu, T., Ding, L., and Zhang, J. (2024). Multi-level digital twin-driven kitting-synchronized optimization for production logistics system. *International Journal of Production Economics*, 271:109176. [Citado na página 23]
- [Pang et al., 2021] Pang, T. Y., Pelaez Restrepo, J. D., Cheng, C.-T., Yasin, A., Lim, H., and Miletic, M. (2021). Developing a digital twin and digital thread framework for an ‘industry 4.0’shipyard. *Applied Sciences*, 11(3):1097. [Citado nas páginas 19 e 33]
- [Plakas et al., 2020] Plakas, G., Ponis, S., Agalianos, K., Aretoulaki, E., and Gayialis, S. (2020). Augmented reality in manufacturing and logistics: Lessons learnt from a real-life industrial application. *Procedia Manufacturing*, 51:1629–1635. [Citado na página 5]
- [Potdar et al., 2020] Potdar, A. M., Narayan, D., Kengond, S., and Mulla, M. M. (2020). Performance evaluation of docker container and virtual machine. *Procedia Computer Science*, 171:1419–1428. [Citado na página 32]
- [ProdutechR3, 2024] ProdutechR3 (2024). Produtech r3 - recuperação-resiliência-reindustrialização. [Citado nas páginas 78 e 113]
- [Qi et al., 2021] Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L., and Nee, A. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58:3–21. [Citado nas páginas 17 e 33]

- [Rahmatulloh et al., 2022] Rahmatulloh, A., Nugraha, F., Gunawan, R., and Darmawan, I. (2022). Event-driven architecture to improve performance and scalability in microservices-based systems. In *2022 International Conference Advancement in Data Science, E-learning and Information Systems (ICADEIS)*, pages 01–06. IEEE. [Citado nas páginas 17 e 45]
- [Ramos, 2017] Ramos, F. (2017). *Melhoria de atividade de picking-um caso de estudo na distribuição de peças paraa veículos automóveis*. PhD thesis, Instituto Politecnico do Porto (Portugal). [Citado na página 21]
- [Rocha, 2021] Rocha, H. F. O. (2021). *Practical event-driven microservices architecture: building sustainable and highly scalable event-driven microservices*. Springer. [Citado na página 45]
- [SAP, 2023] SAP (2023). Sap extended warehouse management. [Citado na página 21]
- [Schäfer et al., 2023] Schäfer, G., Waclawek, H., Riedmann, S., Binder, C., Neureiter, C., and Huber, S. (2023). It/ot integration by design. *arXiv preprint arXiv:2305.19735*. [Citado na página 44]
- [Semeraro et al., 2021] Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., and Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 130:103469. [Citado na página 4]
- [ServiceMax, 2023] ServiceMax, a. P. T. (2023). After the fall: The costs, causes & consequences os unplanned downtime. [Citado na página 3]
- [Setiawan et al., 2021] Setiawan, S., Setiawan, I., Jaqin, C., Prabowo, H. A., and Purba, H. H. (2021). Integration of waste assessment model and lean automation to improve process cycle efficiency in the automotive industry. *Quality Innovation Prosperity*, 25(3):48–64. [Citado na página 34]
- [Sgarbossa et al., 2020] Sgarbossa, F., Grosse, E. H., Neumann, W. P., Battini, D., and Glock, C. H. (2020). Human factors in production and logistics systems of the future. *Annual Reviews in Control*, 49:295–305. [Citado na página 3]
- [Shah et al., 2021] Shah, K., Prabhakar, T., Sarweshkumar, C., Abhishek, S., et al. (2021). Construction of a digital twin framework using free and open-source software programs. *IEEE Internet Computing*, 26(5):50–59. [Citado na página 18]
- [Shojaeinasab et al., 2022] Shojaeinasab, A., Charter, T., Jalayer, M., Khadivi, M., Ogunfowora, O., Raiyani, N., Yaghoubi, M., and Najjaran, H. (2022). Intelligent manufacturing execution systems: A systematic review. *Journal of Manufacturing Systems*, 62:503–522. [Citado na página 2]

- [Siemens, 2022] Siemens (2022). Senseye predictive maintenance - whitepaper true cost of downtime 2022. [Citado na página 4]
- [Socconini, 2019a] Socconini, L. (2019a). *Lean manufacturing. Paso a paso*. Marge books. [Citado na página 4]
- [Socconini, 2019b] Socconini, L. (2019b). *Lean manufacturing. Paso a paso*. Marge books. [Citado na página 4]
- [Socconini, 2019c] Socconini, L. (2019c). *Lean manufacturing. Paso a paso*. Marge books. [Citado na página 4]
- [Stockinger et al., 2020] Stockinger, C., Steinebach, T., Petrat, D., Bruns, R., and Zöller, I. (2020). The effect of pick-by-light-systems on situation awareness in order picking activities. *Procedia Manufacturing*, 45:96–101. [Citado na página 5]
- [Tetik et al., 2021] Tetik, M., Peltokorpi, A., Seppänen, O., Leväniemi, M., and Holmström, J. (2021). Kitting logistics solution for improving on-site work performance in construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(1):05020020. [Citado na página 3]
- [Tsui et al., 2022] Tsui, F., Karam, O., and Bernal, B. (2022). *Essentials of software engineering*. Jones & Bartlett Learning. [Citado na página 37]
- [Valduriez et al., 2021] Valduriez, P., Jiménez-Peris, R., and Özsu, M. T. (2021). Distributed database systems: The case for newsql. In *Transactions on Large-Scale Data-and Knowledge-Centered Systems XLVIII: Special Issue In Memory of Univ. Prof. Dr. Roland Wagner*, pages 1–15. Springer. [Citado na página 16]
- [Vinodh, 2022] Vinodh, S. (2022). *Lean Manufacturing: Fundamentals, Tools, Approaches, and Industry 4.0 Integration*. CRC Press. [Citado na página 11]
- [Wan et al., 2022] Wan, G., Dong, X., Dong, Q., He, Y., and Zeng, P. (2022). Design and implementation of agent-based robotic system for agile manufacturing: A case study of ariac 2021. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 77:102349. [Citado na página 1]
- [Xavier et al., 2023] Xavier, R. N. G., Cuarelli, C., Kaneshiro, P. J. I., Asato, O. L., Moro, J. R., and Nakamoto, F. Y. (2023). Architecture proposal for smt production line in the context of industry 4.0. In *2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, pages 518–524. IEEE. [Citado na página 48]
- [Xu et al., 2021] Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., and Wang, L. (2021). Industry 4.0 and industry 5.0—inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61:530–535. [Citado na página 12]

- [Zafarzadeh et al., 2023] Zafarzadeh, M., Jeong, Y., and Wiktorsson, M. (2023). Data flow structure for multimodal human-robot collaboration in material handling. In *2023 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, pages 1–8. IEEE. [Citado na página 24]
- [Zheng et al., 2021] Zheng, T., Ardolino, M., Bacchetti, A., and Perona, M. (2021). The applications of industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 59(6):1922–1954. [Citado na página 12]
- [Zizic et al., 2022] Zizic, M. C., Mladineo, M., Gjeldum, N., and Celent, L. (2022). From industry 4.0 towards industry 5.0: A review and analysis of paradigm shift for the people, organization and technology. *Energies*, 15(14):5221. [Citado na página 13]

## Anexo A

# Protocolo de Comunicação com o *AMR*

Este anexo tem como objetivo apresentar a lista de eventos que o AMR vai realizar durante as operações de navegação, e estados. Os eventos estarão agrupados por tipologia de modo a auxiliar na compreensão do leitor.

### A.1 Meio de comunicação

O meio de comunicação utilizado para este sistema é baseado num Data Broker organizado por tópicos, com recurso ao protocolo de comunicação MQTT versão 5. Os tópicos estão organizados por categorias e de forma hierárquica, de modo a implementar o conceito de UNS.

Dados de autenticação:

<b>Servidor</b>	<b>Porta</b>	<b>Protocolo</b>	<b>Username</b>	<b>Password</b>
20.86.16.171	8883	mqtt secure	< amr name >	—

*Fonte: SynKit*

Tabela A.1: Dados de autenticação do AMR

Tópico base: equipments/amr/< amr name >

Exemplo: equipments/amr/AMR01

## A.2 Eventos

Lista de eventos para o funcionamento do AMR, agrupados em dois tipos: Publicação e Subscrição. Publicação são responsáveis por difundir a informação interna. Subscrição são responsáveis por receber informação dos outros sistemas/soluções, presentes no mesmo ambiente.

## A.3 Subscrição

Subscrição de tópicos para receber informações do sistema de gestão.

### A.3.1 Estado de emergência

Ativar ou desativar o estado de emergência no equipamento.

#### Mensagem

Tópico: equipments/amr/< amr name >/v1/toAMR/status

Tipo: lista de objetos JSON

Formato:

Campo	Tipo	Descrição
Heartbeat	Int	Contador circular de 0 a 255
Emcy	Boolean	Estado de emergência: 0 ou 1

*Fonte: Flowbotic*

Tabela A.2: Formato da mensagem para alterar o estado de emergência

Exemplo:

```

1 {
2   "Heartbeat": 13,
3   "Emcy": 1
4 }
```

### A.3.2 Variáveis internas

Modificação das variáveis internas do AMR que possibilitam a navegação entre *checkpoints*, controlo de sensores internos e gestão remota de outros componentes.

#### Mensagem

Tópico: equipments/amr/< amr name >/v1/toAMR/userData

Tipo: objeto JSON

Formato:

Campo	Tipo	Descrição
Outputs	String	Sinais para controlar variáveis de saída. 0: desativa, 1: ativa, X: mantém estado
UserBits	String	Sinais para controlar os <i>bits</i> do utilizador. 0: desativa, 1: ativa, X: mantém estado
UserVars	Array	Lista de valores inteiros para as variáveis do utilizador

Fonte: Flowbotic

Tabela A.3: Formato da mensagem para modificar as variáveis internas

Exemplo:

```

1 {
2   "Outputs": "X1XX0XXX",
3   "UserBits": "1XXX0XXX",
4   "UserVars": [1, 0, 0]
5 }
```

## A.4 Publicação

Publicação de mensagens que representam os estados e operações do AMR.

### A.4.1 Tarefa em curso

Publicação da mensagem referente à tarefa que está em curso pelo AMR.

#### Mensagem

Tópico: equipments/amr/< amr name >/v1/fromAMR/curTask

Tipo: objeto JSON

Formato:

Campo	Tipo	Descrição
Mission	String	Nome da missão em curso
WorkOrder	Int	Número da ordem de trabalho em curso
Task	String	Descrição da tarefa em curso
GoingTo	Int	Número do <i>checkpoint</i> de destino
Dist2target	Double	Distância até ao <i>checkpoint</i> de destino
WoState	String	Estado da tarefa em curso

Fonte: Flowbotic

Tabela A.4: Formato da mensagem da tarefa em curso

Exemplo:

```

1 {
2   "Mission": "rota_1",
3   "WorkOrder": 3,
4   "Task": "Mov-1",
5   "GoingTo": 4,
6   "Dist2target": 4.628,
7   "WoState": 3
8 }
```

#### A.4.2 Estado do AMR

Publicação da mensagem do estado atual do AMR.

##### Mensagem

Tópico: equipments/amr/< amr name >/v1/fromAMR/status

Tipo: objeto JSON

Formato:

Campo	Tipo	Descrição
Mode	Int	Modo de operação
Heartbeat	Int	Contador circular de 0 a 255
Confidence	Int	Porcentagem do nível de confiança da localização
Pose	Array	Lista de valores com localização e orientação
Battery	Array	Lista de valores com informação da bateria (corrente, voltagem, carga)
Errors	Array	Lista de valores dos erros internos
Speed	Double	Velocidade atual em metros por segundo
Lidars_profile	Int	Perfil dos sensores Lidar ativo

*Fonte: Flowbotic*

Tabela A.5: Formato da mensagem do estado atual

Exemplo:

```

1 {
2   "Mode": 4,
3   "Heartbeat": 48,
4   "Confidence": 98,
5   "Pose": [3.044, -6.493, -2.287],
6   "Battery": [100, 100, 90],
```

```

7  "Errors": [],
8  "Speed": 0.092,
9  "Lidars_profile": 21
10 }

```

### A.4.3 Variáveis internas

Publicação da mensagem com informação das variáveis internas do AMR.

#### Mensagem

Tópico: equipments/amr/< amr name >/v1/fromAMR/userData

Tipo: objeto JSON

Formato:

Campo	Tipo	Descrição
Inputs	String	Sinais das variáveis de saída. 0: desativa, 1: ativa, X: mantém estado
Outputs	String	Sinais das variáveis de saída. 0: desativa, 1: ativa, X: mantém estado
UserBits	String	Sinais dos <i>bits</i> do utilizador. 0: desativa, 1: ativa, X: mantém estado
UserVars	Array	Lista de valores inteiros das variáveis do utilizador
RouteVars	Array	Lista de valores inteiros das variáveis de rota

*Fonte: Flowbotic*

Tabela A.6: Formato da mensagem das variáveis internas

Exemplo:

```

1  {
2    "Inputs": "X1XX0XXX",
3    "Outputs": "X1XX0XXX",
4    "UserBits": "X1XX0XXX",
5    "UserVars": [1, 0, 0],
6    "RouteVars": [0, 0, 0]
7  }

```



## Anexo B

# Protocolo de Comunicação com o *Pointer*

Este anexo tem como objetivo apresentar a lista de eventos que o *Pointer* vai realizar durante as operações de coleta das peças. Os eventos estarão agrupados por tipologia de modo a auxiliar na compreensão do leitor.

### B.1 Meio de comunicação

O meio de comunicação utilizado para este sistema é baseado num Data Broker organizado por tópicos, com recurso ao protocolo de comunicação MQTT versão 5. Os tópicos estão organizados por categorias e de forma hierárquica, de modo a implementar o conceito de UNS.

Dados de autenticação:

Servidor	Porta	Protocolo	Username	Password
20.86.16.171	8883	mqtt secure	< amr name >_pointer	—

*Fonte: SynKit*

Tabela B.1: Dados de autenticação do *Pointer*

Tópico base: equipments/amr/< amr name >/pointer

Exemplo: equipments/amr/AMR01/pointer

## B.2 Eventos

Lista de eventos para o funcionamento da solução, agrupados em dois tipos: Publicação e Subscrição. Publicação são responsáveis por difundir a informação interna. Subscrição são responsáveis por receber informação dos outros sistemas/-soluções, presentes no mesmo ambiente.

## B.3 Subscrição

Subscrição de tópicos para receber informações do sistema de gestão.

### B.3.1 Lista de peças a coletar

Receção da lista de peças, e respetiva quantidade, que constituem a ficha de kitting.

#### Mensagem

Tópico: equipments/amr/< amr name >/pointer/parts

Tipo: lista de objetos JSON

Formato:

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
Quantity	Double	Quantidade de peças
ProductId	String	Id da peça
PickLocation	Object	Ponto de recolha na estante
PickLocation.X	Double	Coordenada X
PickLocation.Y	Double	Coordenada Y
PickLocation.Z	Double	Coordenada Z
PickLocation.Checkpoint	Int	Ponto de paragem do AMR (sistema GoPlanning)
PlaceLocation	Object	Ponto de depósito no carrinho
PlaceLocation.X	Double	Coordenada X
PlaceLocation.Y	Double	Coordenada Y
PlaceLocation.Z	Double	Coordenada Z
PlaceLocation.Checkpoint	Int	Ignorar

*Fonte: SynKit*

Tabela B.2: Formato da mensagem com lista de peças a coletar

Exemplo:

```

1  [{
2    "Quantity": 13,
3    "ProductId": "660d62761780d2412f5d154d",

```

```

4   "PickLocation": {
5       "X": 4.0, "Y": 1.0, "Z": 0.0, "Checkpoint": 3
6   },
7   "PlaceLocation": {
8       "X": 1.0, "Y": 1.0, "Z": 0.0, "Checkpoint": 0
9   }
10 },
11 {
12     "Quantity": 10,
13     "ProductId": "660d62811780d2412f5d154e",
14     "PickLocation": {
15         "X": 5.0, "Y": 1.0, "Z": 0.0, "Checkpoint": 4
16     },
17     "PlaceLocation": {
18         "X": 2.0, "Y": 1.0, "Z": 0.0, "Checkpoint": 0
19     }
20 }]
```

### B.3.2 AMR chegou ao ponto de coleta

Notificação que o AMR chegou ao ponto de coleta.

#### Mensagem

Tópico: equipments/amr/< amr name >/arrive

Tipo: objeto JSON

Formato:

Campo	Tipo	Descrição
Checkpoint	Int	Ponto de paragem do AMR (sistema GoPlanning)

*Fonte: SynKit*

Tabela B.3: Formato da mensagem de chegada do AMR num *Checkpoint*

Exemplo:

```

1 {
2     "Checkpoint": 3
3 }
```

### B.3.3 Alerta do sistema de gestão

Notificação que existe um alerta do sistema de gestão, por exemplo: o tempo de operação ultrapassou o tempo previsto.

#### Mensagem

Tópico: equipments/amr/< amr name >/alert

Tipo: objeto JSON

Formato:

Campo	Tipo	Descrição
Code	String	Código do alerta
Message	String	Descrição do alerta

*Fonte: SynKit*

Tabela B.4: Formato da mensagem de alerta do sistema

Exemplo:

```

1 {
2   "Code": "EXCEEDED_TIME",
3   "Message": "O tempo previsto para a operacao foi
                ultrapassado"
4 }
```

## B.4 Publicação

Publicação de mensagens que representam as operações durante a coleta de peças, além de outras informações internas relevantes. As operações são: início, peça coletada, peça ignorada e fim.

### B.4.1 Check-up interno

Publicação da mensagem que sinaliza um erro num componente interno do apontador (câmara, laser, servomotores, leitor RFID ou outro). Caso contrário publica OK.

#### Mensagem

Tópico: equipments/amr/< amr name >/pointer/status

Mensagem retida: sim

Tipo: objeto JSON

Formato:

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
Code	String	Código do erro interno
Message	String	Descrição do erro interno

*Fonte: SynKit*

Tabela B.5: Formato da mensagem de estado do *Pointer*

Códigos possíveis:

<b>Campo</b>	<b>Descrição</b>
CAMERA_KO	Erro ao aceder à câmara
LASER_KO	Erro no laser
MOTOR_KO	Erro nos servomotores
RFID_KO	Erro no leitor de RFID
COMPONENT_KO	Erro no componente XYZ
OK	Nenhum erro encontrado

*Fonte: SynKit*

Tabela B.6: Lista de códigos de erros do *Pointer*

Exemplo:

```

1 {
2   "Code": "CAMERA_KO",
3   "Message": "Erro ao tentar aceder a camara"
4 }
```

## B.4.2 Início da missão de coleta

Publicação da mensagem que sinaliza o início da coleta de peças.

### Mensagem

Tópico: equipments/amr/< amr name >/pointer/operation

Tipo: objeto JSON

Formato:

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
NfcTag	String	Id da tag NFC atribuída ao operador
Operation	String	Descrição da operação

*Fonte: SynKit*

Tabela B.7: Formato da mensagem de início de operação do *Pointer*

Exemplo:

---

```

1 {
2   "NfcTag": "044F7132214B80",
3   "Operation": "Begin"
4 }

```

### B.4.3 Peça coletada

Publicação da mensagem que sinaliza a coleta de uma peça.

#### Mensagem

Tópico: equipments/amr/< amr name >/pointer/operation

Tipo: objeto JSON

Formato:

Campo	Tipo	Descrição
NfcTag	String	Id da tag NFC atribuída ao operador
Operation	String	Descrição da operação
ProductId	String	Id da peça

Fonte: SynKit

Tabela B.8: Formato da mensagem de peça coletada do *Pointer*

Exemplo:

```

1 {
2   "NfcTag": "044F7132214B80",
3   "Operation": "Collected",
4   "ProductId": "660d62351780d2412f5d154a"
5 }

```

### B.4.4 Peça coletada com falha na leitura do código QR

Publicação da mensagem que sinaliza a coleta de uma peça, mas houve uma falha na leitura do código QR.

#### Mensagem

Tópico: equipments/amr/< amr name >/pointer/operation

Tipo: objeto JSON

Formato:

Exemplo:

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
NfcTag	String	Id da tag NFC atribuída ao operador
Operation	String	Descrição da operação
ProductId	String	Id da peça
Reason	String	Anomalia detetada durante a coleta da peça

Fonte: SynKit

Tabela B.9: Formato da mensagem de peça coletada com falha do *Pointer*

```

1 {
2   "NfcTag": "044F7132214B80",
3   "Operation": "Collected",
4   "ProductId": "660d62351780d2412f5d154a",
5   "Reason": "Falha na leitura do código QR"
6 }
```

### B.4.5 Peça ignorada

Publicação da mensagem que sinaliza uma peça ignorada durante a coleta.

#### Mensagem

Tópico: equipments/amr/< amr name >/pointer/operation

Tipo: objeto JSON

Formato:

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
NfcTag	String	Id da tag NFC atribuída ao operador
Operation	String	Descrição da operação
ProductId	String	Id da peça
Reason	String	Anomalia detetada durante a coleta da peça

Fonte: SynKit

Tabela B.10: Formato da mensagem de peça ignorada do *Pointer*

Exemplo:

```

1 {
2   "NfcTag": "044F7132214B80",
3   "Operation": "Skipped",
4   "ProductId": "660d62351780d2412f5d154a",
5   "Reason": "Nao encontrada"
6 }
```

### B.4.6 Fim da missão de coleta

Publicação da mensagem que sinaliza o fim da coleta de peças.

#### Mensagem

Tópico: equipments/amr/< amr name >/pointer/operation

Tipo: objeto JSON

Formato:

Campo	Tipo	Descrição
NfcTag	String	Id da tag NFC atribuída ao operador
Operation	String	Descrição da operação

Fonte: SynKit

Tabela B.11: Formato da mensagem de fim de operação do *Pointer*

Exemplo:

```

1 {
2   "NfcTag": "044F7132214B80",
3   "Operation": "End"
4 }
```

### B.4.7 Detalhes da peça

Pesquisa de peças com base em determinados campos, tais como Id, Código de barras ou outros. É devolvida uma lista de peças com base nos valores dos campos indicados.

#### Mensagem de envio

Tópico: apps/iMES/Product/get

Tópico de resposta: equipments/amr/< amr name >/pointer/<uid>-<timestamp>

Tipo: objeto JSON

Formato:

Exemplo:

```

1 {
2   "Id": "660d62351780d2412f5d154a"
3 }
```

#### Mensagem de resposta

Tópico: equipments/amr/< amr name >/pointer/<uid>-<timestamp>

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
Id	String	Id da peça
Name	String	Nome da peça
Brand	String	Marca da peça
Model	String	Modelo da peça
Barcode	String	Código de barras
Color	String	Cor do produto
Category	String	Categoria da peça
PartId	String	Id da peça interna
FinalProduct	Boolean	Indica se é um produto final

*Fonte: SynKit*

Tabela B.12: Formato da mensagem de pedido de detalhes da peça

Tipo: lista de objetos JSON

Formato:

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
Id	String	Id da peça
Name	String	Nome da peça
Brand	String	Marca da peça
Model	String	Modelo da peça
Barcode	String	Código de barras
Color	String	Cor do produto
Category	String	Categoria da peça
Size	Object	Objeto com os detalhes do tamanho
Size.Width	Double	Comprimento da peça
Size.Height	Double	Altura da peça
Size.Length	Double	Largura da peça
Size.Unit	String	Unidade do tamanho
Weight	Double	Peso da peça
WeightUnit	String	Unidade do peso
Parts	List<String>	Lista de peças internas
PhotUrl	String	Link para fotografia
FinalProduct	Boolean	Indica se é um produto final

*Fonte: SynKit*

Tabela B.13: Formato da mensagem de detalhes da peça

Exemplo:

```

1  [{
2    "Id": "660d62351780d2412f5d154a",
3    "Name": "Mola Zig-Zag 570x3,8mm (27 curvas)",
4    "Brand": "SeS",
5    "Model": "Zig-Zag 3,8mm",

```

```

6  "Barcode": "M002012",
7  "Color": "Cinza",
8  "Category": "Mola",
9  "Size": {
10     "Width": 10.0,
11     "Height": 3.8,
12     "Length": 570.0,
13     "Unit": "mm"
14 },
15 "Weight": 132.0,
16 "WeightUnit": "g",
17 "Parts": [ ],
18 "PhotoUrl": "https://imes/uploads/2023/09/
    zig_zag_direita.jpg",
19 "FinalProduct": false
20 }]
```

#### B.4.8 Lista de anomalias

Anomalias durante a coleta da peça, com a possibilidade de efetuar uma pesquisa com base em determinados campos, tais como Id e Nome. É devolvida uma lista de anomalias com base nos valores dos campos indicados.

##### Mensagem de envio

Tópico: apps/mZone/Reason/get

Tópico de resposta: equipments/amr/< amr name >/pointer/<uid>-<timestamp>

Tipo: objeto JSON

Formato:

Campo	Tipo	Descrição
Id	String	Id da peça
Name	String	Nome da peça

*Fonte: SynKit*

Tabela B.14: Formato da mensagem de pedido de anomalias

Exemplo:

```

1  {
2  }
```

### Mensagem de resposta

Tópico: equipments/amr/< amr name >/pointer/<uid>-<timestamp>

Tipo: lista de objetos JSON

Formato:

Campo	Tipo	Descrição
Id	String	Id da peça
Name	String	Nome da peça

*Fonte: SynKit*

Tabela B.15: Formato da mensagem de lista de anomalias

Exemplo:

```
1  [{
2    "Id": "669c2ae2287812ba6afea516",
3    "Name": "Sem stock"
4  },
5  {
6    "Id": "669c2b30287812ba6afea522",
7    "Name": "Nao encontrada"
8  }]
```



## Anexo C

# Participação na Feira Internacional *Motek* 2024

Durante a fase de testes do *SynKit*, houve a oportunidade de participar na Feira Internacional *Motek* 2024 [Motek, 2024], que decorreu de 08 a 11 de Outubro de 2024, em Estugarda (Alemanha), como mostra a figura C.1. A Feira Internacional *Motek* é o evento líder mundial nas áreas de automação da produção e montagem, tecnologia de fluxo de materiais, racionalização através da tecnologia de manuseamento e manuseamento industrial. Isto faz da *Motek* a única feira que se concentra claramente em todos os aspetos da engenharia mecânica e automação, bem como na apresentação de cadeias de processos completas.

Lá foi possível apresentar o protótipo aos visitantes, como demonstram as figuras C.2 e C.3, assim como analisar futuros casos de aplicação e oportunidades para integrar com outros fabricantes de AMR. Neste evento também foi possível analisar outras soluções voltadas para o sector industrial que possuem algum tipo de DT, analisar o sentido que o mercado está a tomar e, como abordar as questões relacionadas com os DT. Aproveita-se ainda a oportunidade para agradecer à *InKlusion Entertainment* [InKlusion, 2024] e ao consorcio *Produtech R3* [ProdutechR3, 2024], o convite para participar da feira.



Fonte: inKlusion

Figura C.1: Stand na feira Motek 2024, em Stuttgart (Alemanha)



Fonte: inKlusion

Figura C.2: Página Overview apresentada na feira Motek 2024



Fonte: inKlusion

Figura C.3: Página Kitting e vídeo dos testes na feira Motek 2024