



NOVA

NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL

ANTÓNIO MANUEL DIAS PINTO JORDÃO

CONTRIBUTO PARA A SELEÇÃO DE SISTEMAS DE
ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa

MARÇO, 2023



CONTRIBUTO PARA A SELEÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS

ANTÓNIO MANUEL DIAS PINTO JORDÃO

Orientador: António Gabriel Marques Duarte dos Santos,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

Júri:

Presidente: João Manuel Vicente Fradinho,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

Arguente: António José Freire Mourão,
Professor Associado, FCT-NOVA

Orientador: António Gabriel Marques Duarte dos Santos,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

Contributo para a Seleção de Sistemas de Armazenamento de Produtos

Copyright © **António Manuel Dias Pinto Jordão**, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

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

Este documento foi criado com o processador de texto Microsoft Word e o template NOVA thesis Word.

À vida e à arte.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao professor António Gabriel pela orientação desta dissertação.

Ao professor Rui Martins, pelas palavras de motivação numa fase mais difícil, e pelo desempenho e carácter de excelência, disponibilizando sempre tempo para todos os alunos.

À Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, por me ter tornado um homem mais forte.

Certamente à minha família pelo amor e apoio incondicional nestes últimos anos, permitindo as minhas divagações nesta procura que é a vida.

Aos meus grandes amigos Afonso e Vasco pela mentoria na idade mais tenra, abriram-me as portas de uma forma genuína e pura, para que eu pudesse começar a andar. Além disso pela inspiração académica, que foi importante nestes últimos tempos.

Aos meus companheiros de banda, Girbal, Zé e Janito por todas as guerras e irmandade que a música nos dá. Ainda há muito para viajar.

Aos meus amigos do mar e da vida, Ruiz, Millan, Freire, Palrão, Barahona, Apolinário, Bicudo, Gui Antunes, Victor, Gui Afonso, Heytor, Manuel, e o meu irmão Vasco. Espero que encontrêmos sempre um tempo para nos juntarmos dentro ou fora do grande azul, e sempre com o cunho pessoal tão característico de cada um, acho de facto que é um grupo especial.

Por último, mas não menos importante, ao meu comparsa de vida, Gonçalo Rocha, pela amizade, compreensão, companheirismo e vivências das mais bonitas que esta vida tem para nos dar.

Sáravá!

“Sometimes you have to play for a long time
to be able to play like yourself” Miles Davis.

RESUMO

De forma a dar resposta à elevada competitividade dos mercados, e a corresponder às expectativas dos clientes, em termos de prazos de entrega, flexibilidade nas opções de entrega, e disponibilidade e variedade de produtos, as empresas têm direcionado a sua atenção para os processos de armazenamento, permitindo a realização de grandes investimentos, no sentido dos armazéns inteligentes, em tecnologias de automação. O objetivo desta dissertação é permitir uma orientação, e facilitar as decisões perante a escolha de tecnologias a utilizar, consoante os tipos de produtos a armazenar.

São descritas, analisadas e avaliadas as tecnologias mais recentes aplicadas no contexto da automação de armazéns, e é proposta uma metodologia a aplicar durante o projeto de implementação de novas soluções, salientando os aspetos mais relevantes em cada fase.

A avaliação e comparação das tecnologias consoante o tipo de produtos a armazenar, permite uma melhor orientação na escolha de opções. A metodologia proposta permite auxiliar as fases do projeto, adequando o contexto às novas tecnologias da indústria 4.0.

Palavras chave: Armazéns Inteligentes, AS/RS, Logística, Projeto de Armazéns

ABSTRACT

To meet customers expectations on shorter lead times, flexibility in delivery, high product variety and availability, retailers have turned their attention to warehousing, and are making large investments, following smart warehousing trends. This study aims to provide some guidance, and help decision makers on which technologies to apply, based on the type of products to store.

The recent technologies are described, analyzed and evaluated in the context of automated warehousing. A methodology is proposed to apply during the project, highlining the relevant aspects of each step.

The technology evaluation and comparison, based on the type of product, enables a better overview and guidance through the options available. The methodology proposed supports new projects, contextualizing each phase to the new era of industry 4.0.

Keywords: Smart Warehouse, AS/RS, Logistics, Warehouse Design

ÍNDICE

1	PREFÁCIO	1
1.1	Contexto e motivação	1
1.2	Problema e objetivos	2
1.3	Abordagem e contribuições.....	2
1.4	Organização do documento	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Contextualização Histórica	5
2.2	Indústria 4.0.....	6
2.2.1	Tecnologias Digitais da Indústria 4.0.....	7
2.2.2	Incentivos e Dificuldades de Implementação.....	8
2.3	Armazéns Inteligentes	9
2.4	Funções de um Armazém Inteligente.....	11
3	TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO AUTOMATIZADO.....	13
3.1	Introdução aos Sistemas de Armazenamento Automatizado (AS/RS).....	13
3.2	Armazenamento Convencional em Estantes	15
3.3	Armazenamento Automatizado em Estantes (AS/RS).....	15
3.3.1	Profundidade Única ou Dupla com Transelevadores.....	16
3.3.2	Compactos Baseados em Transelevadores	18
3.3.3	Compactos Baseados em <i>Shuttles</i> (AVS/RS).....	22
3.4	Armazenamento Baseado em Robôs Autónomos	25
3.4.1	Sistema Compacto em Forma de Puzzle (Horizontal).....	25

3.4.2	Sistema Compacto Baseado em Robôs Autónomos (<i>AutoStore</i>)	26
3.5	Carrosséis, e Dispensas Dinâmicas (VLM).....	27
3.6	Prateleiras Móveis e AGV's.....	29
3.7	Sistemas de Passadeiras de Apoio ao Armazenamento.....	31
4	METODOLOGIA PARA A ESCOLHA DE EQUIPAMENTOS A UTILIZAR	33
4.1	Introdução	33
4.2	Metodologia Proposta.....	34
4.2.1	Fases da Metodologia.....	34
4.2.2	Objetivos.....	35
4.2.3	Soluções Disponíveis no Mercado.....	35
4.2.4	Requisitos Funcionais do Projeto.....	37
4.2.5	Análise Contextual	38
4.2.6	Caracterização de Produtos e Tecnologias de Armazenamento.....	39
4.2.7	Avaliação das Tecnologias Consoante os Tipos de Produtos.....	41
4.2.8	Avaliação das Restrições	48
4.2.9	Análise Financeira	49
4.2.10	Escolha das Tecnologias e Implementação	49
5	CONCLUSÃO	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Conceptualização de <i>Smart Warehouse</i>	10
Figura 2.2 – Etapas de um Armazém Automatizado. (Adaptado de [1])	12
Figura 3.1 - Esquema das Tecnologias de Armazenamento Automatizado.....	14
Figura 3.2 – Armazém completamente automatizado [19].....	14
Figura 3.3 - Transelevadores para armazenamento automatizado em estantes. [20]	16
Figura 3.4 – Armazenamento em estantes (AS/RS) para caixas (Adaptado de [23]).....	17
Figura 3.5 – Armazenamento compacto em estantes [27].....	19
Figura 3.6 – Armazenamento compacto em estantes com passadeiras duplas [29].....	20
Figura 3.7 – <i>Shuttles</i> de paletes em estantes [31].....	21
Figura 3.8 - Referencial utilizado na dissertação (adaptado de [31])	22
Figura 3.9 - Armazenamento compacto baseado em <i>shuttles</i> e elevadores [31]	23
Figura 3.10 – Armazenamento em estantes baseado em <i>shuttles</i> (Adaptado de [1]).....	24
Figura 3.11 – Esquemas de armazenamento em forma de <i>puzzle</i> [1].....	25
Figura 3.12 - Armazenamento em <i>Puzzle</i> com AGV's [1].....	26
Figura 3.13 - Armazenamento em autostore [39].....	27
Figura 3.14 – a) Carrossel horizontal b) Carrossel vertical [40, 41].....	28
Figura 3.15 - Dispensas Automatizadas (VLM) [42].....	29
Figura 3.16 - Prateleiras e AGV's [45]	30
Figura 3.17 – Sistema de passadeiras de apoio ao transporte (Adaptado de [28]).....	31
Figura 4.1 - Fases do Projeto.....	34
Figura 4.2 – Comparação da taxa de output e capacidade do inventário utilizando diferentes tecnologias de armazenamento no mesmo espaço disponível. (150m x 90m x 18m) (Adaptado de [32]).....	47

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – Especificações das Tecnologias de Armazenamento Automatizado.....	36
Tabela 4.2 - Categorização dos tipos de produtos pelo seu volume [44]	40
Tabela 4.3 – Avaliação das tecnologias adequadas a volumes muito pequenos (< 1 L)	41
Tabela 4.4 - Avaliação das tecnologias adequadas a volumes muito pequenos (< 1 L).	41
Tabela 4.5 - Avaliação das tecnologias adequadas a volumes pequenos (1 a 50 L)	43
Tabela 4.6 - Avaliação das tecnologias adequadas a volumes pequenos (1 a 50 L)	43
Tabela 4.7 - Avaliação das tecnologias adequadas a volumes médios (50 a 200 L)	44
Tabela 4.8 - Avaliação das tecnologias adequadas a volumes médios (50 a 200 L)	45
Tabela 4.9 - Avaliação das tecnologias adequadas a volumes grandes (> 200 L).....	45
Tabela 4.10 - Avaliação das tecnologias adequadas a volumes grandes (> 200 L).....	46

GLOSSÁRIO

- Shuttles* Robô autônomo utilizado para movimentar cargas ou unidades.
- Transelevador** Equipamento mecânico destinado à movimentação e armazenamento automatizado de cargas em estantes.
- Autostore* Sistema de armazenamento compacto automatizado para produtos de pequena dimensão.
- Smart Warehouse* Conceito de armazém altamente automatizado com tecnologias que visam a digitalização e automação de processos.

SIGLAS

AGV	<i>Automated Guided Vehicles</i>
AS/RS	<i>Automated Storage and Retrieval Systems</i>
AVS/RS	<i>Autonomous Vehicle-Based Storage and Retrieval Systems</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Assisted Manufacturing</i>
CNC	<i>Computed Numerical Control</i>
CPS	<i>Cyber-Physical Systems</i>
ICT	<i>Information and Communication Technologies</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
VLM	<i>Vertical Lift Module</i>
WCS	<i>Warehouse Control Systems</i>
WMS	<i>Warehouse Management Systems</i>

PREFÁCIO

Este trabalho tem o objetivo de introduzir e enquadrar o trabalho que será desenvolvido ao longo da dissertação que permite obter o grau de mestre no curso de Engenharia Mecânica na Universidade Nova de Lisboa.

O tema retratado nesta dissertação é baseado na análise das tecnologias recentes aplicáveis a sistemas de armazenamento, no contexto de indústria 4.0. É descrito o conceito de *smart warehouse*, assim como as direções possíveis a tomar.

São caracterizadas as tecnologias de armazenamento automatizado utilizadas mais frequentemente na indústria, e também as suas sub-categorias, descrevendo assim as várias opções disponíveis. Além disso são categorizados os tipos de produtos pelas suas características, e sugeridas as soluções viáveis, consoante a respectiva categorização. Deste modo, são resumidas e analisadas as informações gerais e atributos de cada solução.

É proposta uma metodologia a aplicar perante as diferentes fases do projecto, de forma a apoiar decisões e a salientar os aspectos mais relevantes a ter em consideração no processo.

A implementação de tecnologias de armazenamento automatizado (AS/RS) é bastante complexa, e a literatura disponível relativa às mesmas é, geralmente muito focada em casos específicos. Assim sendo, esta dissertação tenta englobar as tecnologias e aspectos mais relevantes deste tema, constituindo uma boa base de conhecimento, e servindo como uma mais-valia para a orientação de futuros projetos.

1.1 Contexto e motivação

É um facto que os mercados nos dias de hoje são fortemente marcados pela competitividade industrial e pelo consumismo populacional. Face a esta realidade, o sucesso das empresas está vinculado aos desafios enfrentados pela indústria. Os armazéns são elementos importantes da logística industrial, estando a sua eficiência operacional diretamente ligada à eficiência logística de uma empresa.

Os armazéns tradicionais apresentam algumas dificuldades, nomeadamente, gestão de espaço ineficiente, danos materiais, operações ineficientes e dificuldade de resposta a picos de atividade, entre outros. Problemas estes que as novas soluções de armazenamento automatizado visam resolver.

A introdução de conceitos como indústria 4.0 e armazém inteligente é acompanhada por uma forte componente de digitalização e automação de processos. No entanto existe ainda alguma falta de clareza e orientações para a adoção destas novas soluções.

A descrição das tecnologias existentes, assim como as suas particularidades e atributos, facilita a percepção e permite o enquadramento das empresas que se encontrem perante a situação de modernizar os seus armazéns.

A literatura existente é geralmente muito específica numa determinada tecnologia, deixando uma lacuna na apresentação de metodologias pelas quais os projetistas se possam guiar.

Deste modo, torna-se bastante relevante a contextualização dos problemas existentes, e criação de orientações atualizadas ao novo paradigma, de modo a facilitar a implementação adequada de novas soluções.

1.2 Problema e objetivos

Apesar do mediatismo dos novos conceitos da indústria 4.0, continua a existir falta de clareza nas direções e tecnologias a adotar consoante o tipo de produtos, e contexto das situações.

É certo que existem diversas variações das tecnologias disponíveis no mercado. Contudo, é importante apresentar o panorama das soluções mais comuns na indústria, de modo a permitir uma perspetiva globalizada, e métodos para as aplicar.

O intento desta dissertação é a recolha e compilação de informação relativa às tecnologias de armazenamento automatizado, destacando também as tecnologias que permitem a digitalização, controlo, e gestão de processos envolvidos nos sistemas de armazenamento.

Desse modo é proposta uma metodologia de projeto, onde se consideram os aspetos mais importantes em cada fase. É ainda realizada uma avaliação das soluções mais adequadas a diversas situações, facilitando assim a orientação de resposta perante os problemas existentes.

1.3 Abordagem e contribuições

Esta dissertação é dirigida a projetistas ou empresas que planeiam integrar novas tecnologias nos seus processos de logística. Além disso, pode também servir como uma plataforma para investigação futura em sistemas automatizados de armazenamento. A dissertação apresenta uma descrição das tecnologias recentes e uma metodologia que visa clarificar as diferentes fases de projeto, e auxiliar decisões na seleção de equipamentos. A análise realizada neste documento, deverá ser avaliada e adaptada ao contexto de cada situação, de forma a servir o objetivo a que se propõe.

1.4 Organização do documento

No Prefácio é apresentado um texto introdutório a esta dissertação. No Capítulo 2 é apresentado o tema da indústria 4.0 e os conceitos, tecnologias, e direções inerentes a este. No Capítulo 3 são descritas as tecnologias que permitem a automação de armazéns assim como o funcionamento de diversas variantes. No Capítulo 4 é proposta uma metodologia a seguir perante a implementação das novas tecnologias.

2.1 Contextualização Histórica

O processo de industrialização começou com a introdução de equipamentos de manufatura mecânica no fim do séc. XVIII. Acompanhados pelo desenvolvimento dos motores a vapor de James Watt, foi então revolucionada a produção de todo o tipo de produtos. A partir desse ponto foi introduzida a mudança de uma sociedade baseada na agricultura para uma sociedade orientada para a indústria. A primeira revolução industrial contribuiu em larga escala para atenuar catástrofes de escassez alimentar nos países que fizeram parte dessa transformação e, simultaneamente, resultou no desenvolvimento da população, tanto em quantidade como em qualidade de vida [1].

Esta transformação foi seguida pela segunda revolução industrial, que teve início no séc. XX, que consistiu na produção em massa potenciada pelas máquinas elétricas e pela divisão de trabalho em que cada operador se especializava em pequenas tarefas. Esta revolução foi predominantemente afetada pela implementação de linhas de montagem originadas por *Henry Ford* e pelos métodos de gestão de *Frederic Taylor*. A produção em massa foi então acelerada pela indústria química, eletrônica, mecânica e automóvel [1].

Este desenvolvimento foi substituído mais tarde pela terceira revolução industrial no início dos anos 1970 que continua até aos dias de hoje. Caracterizada pela implementação de equipamento eletrónico e tecnologias de informação. Foi então possível proceder à automação dos processos de manufatura. Por exemplo, a adoção em larga escala de controlo numérico computacional (CNC) e robôs industriais aumentou a flexibilidade dos sistemas de produção. Tecnologias como o desenho assistido por computador (CAD), fabrico assistido por computador (CAM) e planeamento de processos assistido por computador (CAPP) fizeram com que fosse possível a integração do computador nos processos de produção [2]. Deste modo, as máquinas tomaram gradualmente várias posições e diminuía em grande parte o trabalho realizado por operadores. Assim, resultante desta transformação, observaram-se efeitos no contexto socioeconómico assim como sociocultural, nomeadamente uma grande racionalização das empresas. Do ponto de vista de produtividade e flexibilidade foi observada uma grande evolução durante esta era [3].

A terceira revolução industrial continua presente, mas está neste momento num processo gradual de transformação para uma nova era da industrialização, a quarta revolução industrial [4].

Neste momento a indústria está à beira da quarta revolução industrial. A introdução de sistemas ciber físicos (CPS) apresenta-se como um dos principais fatores desta transformação. O conceito de indústria 4.0 resulta então dessa evolução, que se representa pela adoção em larga escala tanto de sistemas de armazenamento automatizado, como de sistemas digitais

de monitorização de controlo e de gestão. Tecnologias como, sistemas ciber físicos (CPS), *internet of things* (IoT) e *cloud technology*, estão ainda longe de serem aplicadas em larga escala [5]. No entanto, a evolução e a maturidade destes sistemas, levará a que sejam cada vez mais implementados no futuro [2].

Embora a terceira revolução industrial também se tenha focado na automação de máquinas e processos, a indústria 4.0 foca-se na integração de sistemas digitais em sistemas físicos, de modo a obter soluções completamente automatizadas [2].

2.2 Indústria 4.0

Existe neste momento evidência de que a quarta revolução industrial está a acontecer. É discutido por alguns se o termo “revolução” se justifica para esta mudança, visto que se trata de uma evolução e transformação que levará várias décadas e os principais elementos que a constituem já existem e serão apenas desenvolvidos para melhores soluções no futuro. Outros defendem que este termo é justificado pela similaridade de características que constituem uma mudança de era. A definição mais acertada é que se trata de uma revolução que aponta para a digitalização.

Atualmente quase todas as empresas relacionadas com tecnologia tentam encontrar a sua própria definição para este conceito. Isto faz com que seja ainda mais difícil, especialmente para empresas que se queiram modernizar, perceber e encontrar soluções standardizadas.

A indústria 4.0 representa o desenvolvimento e integração de tecnologias de informação e comunicação nos processos associados a uma empresa. De uma visão ampla a indústria 4.0 requer soluções e estruturas para conectar a dimensão física às tecnologias digitais num *cyber-physical system* (CPS) [6]. Os artigos mais referenciados apontam para quatro principais componentes da indústria 4.0, nomeadamente, e como já foi referido anteriormente, *Cyber Physical Systems* (CPS), *Internet of Things* (IoT), *Internet of Services* e o conceito de *Smart Factory* [7].

Outras tecnologias significantes são a Inteligência Artificial, Desenho Assistido por Computador (CAD), Produção Assistida por Computador (CAM), planeamento de recursos inteligente, Controladores Programáveis (PLCs), Automação, Robôs Industriais, Fabrico Aditivo, *Software* de Simulação e outros modelos inovadores de partilha de dados [6].

A indústria 4.0 engloba todo o tipo de sistemas automatizados que permitem customização, agilidade, eficiência e rapidez nos processos de fabrico e no sistema operacional, através do acesso, partilha e processamento de dados. Deste modo, promove o desenvolvimento de novas capacidades em diversas áreas, mais concretamente, projeto de produto, desenvolvimento de produto, controlo remoto, diagnóstico, previsão, manutenção, rastreio, planeamento e logística. As soluções resultantes desta evolução, beneficiam consideravelmente as empresas do ponto de vista da customização de produtos, análise de dados em tempo real, controlo e monitorização automática, produtividade e eficiência [6].

2.2.1 Tecnologias Digitais da Indústria 4.0

As tecnologias predominantes no contexto da indústria e aplicação nas empresas é explicado nas subdivisões seguintes:

Análise de Dados - A utilização de grandes volumes de dados tem como propósito otimizar a eficiência e produtividade das empresas. As tecnologias existentes ajudam a melhorar um negócio do ponto de vista da flexibilidade, agilidade, customização de produtos. A recolha, partilha e processamento de dados de vários tipos de sistemas, tornar-se-ão na norma para possibilitar e otimizar decisões em tempo real [6].

Cloud - Os grandes volumes de dados adquiridos por diversos sistemas, equipamentos e sensores são armazenados em servidores remotos. O acesso a grandes quantidades de dados em tempo real, é possibilitado por *cloud systems*. Existem necessidades de melhoria e desenvolvimento de sistemas de partilha de dados nos vários departamentos que constituem uma empresa. A *cloud technology* está em rápido desenvolvimento e a possibilitar novas capacidades em vários departamentos [6].

Simulação - Os dados adquiridos e processados podem ser utilizados para alimentar modelos virtuais, de modo a analisar um maior espectro de possibilidades no que toca a projeto e desenvolvimento de produto, produção, cadeias de fornecimento, logística e distribuição. A simulação é bastante utilizada em modelos de negócio porque permite, através de dados reais, simular as condições de trabalho num sistema virtual. Através destes modelos é possível testar e otimizar o sistema, reduzindo assim o risco de investimento, o período de instalação, e melhorando o controlo de qualidade de futuras operações e serviços, tudo isto ainda antes da implementação no mundo real [6].

Internet of Things (IoT) - Na indústria 4.0 a *Internet of Things (IoT)* possibilita a existência de um sistema de controlo centralizado que comunica e interage com diferentes tipos de sistemas e equipamentos. Possibilita também o rastreio e monitorização através de análises descentralizadas. A *Internet of Things (IoT)* facilita uma colaboração coesa entre empresas, possibilitando a automação de cadeias, que, por conseguinte, aumenta as capacidades funcionais de uma empresa [2].

RFID - É uma tecnologia que permite a identificação e *tracking* de objetos utilizando um sistema de comunicação sem-fios. Um sistema de RFID permite obter informação em tempo real juntamente com a *Internet of Things (IoT)*. Esta tecnologia é bastante utilizada desde 1980, mas com o desenvolvimento de novos equipamentos é neste momento possível ser utilizada de forma contínua e automática que elimina, em alguns casos, a necessidade de operadores no processo de recolha de dados. Desta forma permite a evolução de fábricas para uma versão mais automatizada. Apesar da utilização bem sucedida em vários sectores industriais existem ainda alguns problemas na implementação, nomeadamente a interferência de sinais e standardização [2].

Fabrico Aditivo - O fabrico aditivo e a impressão em três dimensões (3D) são utilizadas para a produção de objetos. Com a evolução da indústria 4.0, estas tecnologias de fabrico serão utilizadas em larga escala para a produção de pequenos lotes altamente customizados, resultando assim em vantagens para as empresas que as adotarem [7].

Realidade Aumentada - Com a aplicação de sistemas de realidade aumentada será possível, através de um *smartphone* ou outro *smart device*, aceder a uma variedade de utilizações. Os *smart devices* têm a capacidade de integrar sistemas de informação para partilha de dados assim como a recolha, medição e transferência de dados. Um exemplo dessas funções seria,

fazer alterações ou dar instruções remotamente durante um projeto de um armazém ou linha de produção. Estes sistemas estão ainda numa fase inicial de utilização, mas é esperado que no futuro empresas e organizações venham a adotar bastante mais estas tecnologias melhorando assim os seus procedimentos e processos de decisão [6].

Cyber-Segurança - Com a implementação das tecnologias da indústria 4.0 numa grande escala, é possível que venham a aumentar as ameaças à segurança digital. A adoção de várias estratégias de segurança digital possibilita a comunicação segura e a gestão e acesso de dados. Deste modo, torna-se essencial o desenvolvimento e aplicação destas estratégias nas tecnologias de informação, para que seja sustentável a adoção de tecnologias da indústria 4.0 [6].

Cyber-Physical Systems (CPS) - Nas décadas anteriores, os sistemas físicos e digitais tornaram-se mais interligados. As tecnologias de CPS são uma das grandes fundações da indústria 4.0. Através destes sistemas é possível uma maior integração e coordenação entre elementos físicos e digitais. Desenvolvimentos na área dos CPS, permitem atingir um nível mais elevado de adaptabilidade, resiliência, segurança, utilidade e escalabilidade. Estes sistemas conectam o espaço virtual à realidade física, desvanecendo assim as barreiras entre estes dois mundos [8].

Robôs Autónomos - Neste momento, a robótica é utilizada em várias áreas, nomeadamente no fabrico, logística, *e-commerce*, educação, etc. Os desenvolvimentos desta tecnologia permitem neste momento que os robôs interajam entre si, e trabalhem de uma forma segura e harmoniosa com os operadores. No futuro é esperado que estas tecnologias se tornem economicamente mais viáveis e abranjam uma maior variedade de funções [6].

2.2.2 Incentivos e Dificuldades de Implementação

Apesar da rápida evolução tecnológica na indústria 4.0, aparecem novas barreiras e riscos associados a essa transformação. Existe a necessidade de caracterizar melhor quais os seus benefícios e dificuldades.

Agilidade: A implementação das várias tecnologias permite o planeamento e controlo em tempo real, resultando assim em maior flexibilidade e agilidade de resposta das empresas, face às mudanças nas condições. Mais concretamente, reagindo com maior rapidez às alterações na procura, fornecimento e aos preços. Uma análise de negócio mais evoluída tem a capacidade de prever eventos futuros e padrões no comportamento dos clientes, tempos de entrega e *output* de fabrico. O controlo e monitorização em tempo real também proporciona maior flexibilidade, eficiência e agilidade nos processos logísticos [6].

Customização: Técnicas como micro-segmentação, fabrico em módulos, customização em massa e práticas de planeamento avançado ajudam as empresas a responder às necessidades do consumidor [6]. A adoção de tecnologias digitais de entrega e distribuição, assim como as tecnologias de fabrico aditivo, permitem satisfazer melhor as necessidades de cada cliente [4].

Precisão: As tecnologias da indústria 4.0 oferecem dados consistentes, precisos e em tempo real de modo a otimizar os processos de decisão. A próxima geração de sistemas de gestão irá permitir uma maior visibilidade ao longo de toda a cadeia de um produto[9, 10].

Desde a localização exata de um fornecedor, à satisfação do serviço prestado ao consumidor final [4].

Eficiência: A eficiência é potenciada pela automação de tarefas, planeamento, controlo e pela partilha de informação. Um grande número de empresas utiliza tecnologias de automação, especialmente no sector de logística. Estas tecnologias incluem robôs e gruas, sistemas automatizados de *pallet handling*, *tracking* de envios, veículos autónomos e armazéns totalmente automatizados. Através desta evolução, a cadeia de distribuição pode ser otimizada de forma contínua de modo a adaptar-se da melhor forma aos requisitos da empresa [6].

Existem também algumas resistências e barreiras na implementação das práticas da indústria 4.0. Estas barreiras podem ser classificadas em quatro dimensões: Organização, Problemas de Ética e Lei, Perspetiva Estratégica, e Tecnologia [8].

Constrangimentos Financeiros: As condições financeiras são uma das dificuldades na adoção das tecnologias da Indústria 4.0. Apesar do desenvolvimento e inovação tecnológica, a falta de formação técnica para a adoção desses recursos, afeta o nível de investimento [11]. A falta de clareza, do ponto de vista do custo-benefício destes investimentos, continua a ser um desafio preponderante para a aplicação das novas soluções tecnológicas [12].

Falta de Apoio à Implementação: As rápidas transformações tecnológicas requerem uma forte formação técnica, de forma a que os investimentos realizados apresentem os resultados esperados. Este tipo de formação pode apresentar dificuldades, por isso, deve ser suportado por um elevado nível de apoio e gestão [1].

Resistência à Mudança: As indústrias continuam ainda com alguma incerteza e pouca familiaridade no que toca às tecnologias da indústria 4.0, ignorando assim os benefícios e a adoção da transformação digital. A complexidade dos sistemas de gestão e controlo tem tendência a aumentar com a expansão dos negócios [13]. A falta de competências, tanto na gestão de dados como na inovação tecnológica, aumenta a hesitação na adoção das tecnologias da Indústria 4.0 [6].

Falta de Especialização: A literatura existente sublinha a necessidade de estudos focados nas implicações resultantes da aplicação das tecnologias da indústria 4.0. Existem falhas, no que toca a *frameworks* e instruções de referência, para o desenvolvimento e abordagem perante as dificuldades que possam aparecer durante a implementação das novas tecnologias [6].

Falhas de Regulamentação: Na maioria dos países os governos disponibilizam as infraestruturas necessárias para a transformação digital, nomeadamente, internet e serviços de comunicação. Contudo, existe falta de clareza no que toca às alterações da indústria nesta nova era [9].

Existem ainda outras barreiras presentes para as empresas que queiram implementar novas tecnologias, nomeadamente, falta de estudos, falhas de infraestrutura, fraca qualidade de dados, falta de cultura digital e falta de confiança dos seus parceiros. Para possibilitar a transformação digital é necessária uma evolução na perceção dos cargos executivos mais elevados face ao desenvolvimento da indústria 4.0 [6].

2.3 Armazéns Inteligentes

A indústria tem assistido a uma transformação digital, de modo a responder às necessidades dos clientes. Para satisfazer as expectativas atuais, as estratégias de logística, e particularmente os armazéns, acabam por ter um papel muito importante [14]. A eficiência dos

armazéns está diretamente ligada à eficiência operacional do departamento logístico [3]. Os armazéns tradicionais apresentam algumas dificuldades, como por exemplo, gestão de espaço ineficiente, danos materiais, operações ineficientes, manipulação excessiva de produtos e pouca eficiência dos equipamentos de movimentação [9, 10].

Tal como acontece em outras áreas da indústria, resultando dos avanços científicos e tecnológicos, os armazéns também estão em processo de evolução. A nova era digital da indústria 4.0 implica a introdução ao conceito de armazém inteligente, que se caracteriza pela automação de funções de um armazém. Com o aumento da complexidade de funções, espera-se que a adoção de novas tecnologias resolva e possibilite uma melhor gestão, eficiência, qualidade e acessibilidade do espaço disponível para armazenamento, minimizando os custos envolvidos no processo de armazenagem [10].

De modo a otimizar as operações de um armazém, foram realizados grandes investimentos por várias empresas em tecnologias de *automated material-handling*, sendo uma das maiores referências a *Amazon* [12]. Com o desenvolvimento de tecnologias mais fiáveis e variadas, e o aumento de competitividade, a tendência para a automação foi adotada por empresas e serviços de logística um pouco por todo o mundo.

Nesta fase torna-se importante definir o conceito de *smart warehouse*, visto que a literatura se encontra bastante fragmentada neste tema [3]. A evolução dos armazéns neste sentido pode acontecer por várias direções (ver Fig.2.1): ou pela automação de processos e armazenamento; ou pelo caminho da digitalização e *softwares* de controlo, monitorização e gestão [9].

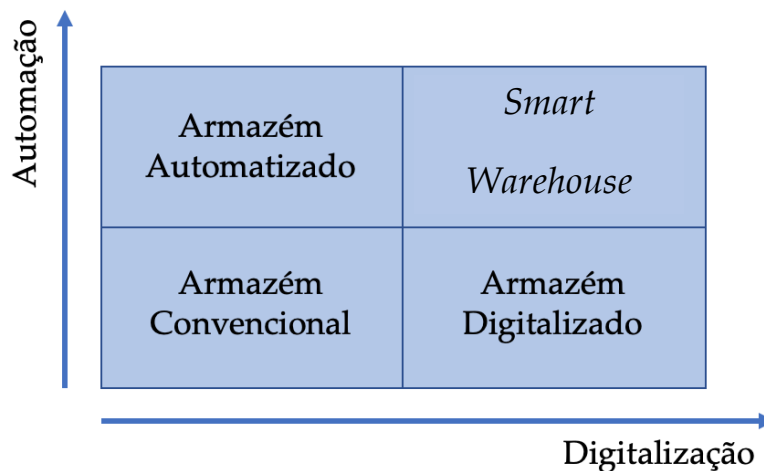


Figura 2.1 - Conceptualização de *Smart Warehouse*

Um *smart warehouse* é essencialmente um armazém que integra as estratégias e tecnologias mais avançadas, tanto digitais como de automação de processos físicos, com o propósito

de operar com o máximo de eficiência [9]. Desta forma pode funcionar ao mais alto nível e dar resposta às rápidas alterações do mercado. As operações de armazenamento, gestão de *stock* e entrega devem ser executadas de forma automática. A adoção de *Cyber-Physical Systems (CPS)*, que ajudam a construir uma cópia digital dos processos industriais, possibilita a transformação de um armazém tradicional num *smart warehouse*, possibilitando a fusão entre a automação e os processos digitais [15].

Alguns estudos sublinham a importância das diferenças contextuais perante as direções que possam ser tomadas por diferentes empresas. Como sublinhado por Kembro et Norrman [9], empresas mais direcionadas para o comércio online têm maior tendência em aplicar tecnologias digitais, enquanto que os grandes centros de distribuição mostram maior tendência para a automatização de processos. Apesar dos estudos, incentivos e investimentos realizados, ainda não existem orientações claras e consisas de como as empresas devem adotar as tecnologias no processo de transformação de um armazém convencional para um armazém inteligente [16].

2.4 Funções de um Armazém Inteligente

A transformação de um armazém tradicional para um armazém inteligente está maioritariamente associada a duas grandes vertentes. A vertente da informação, digitalização, conectividade e a vertente dos robôs automatizados para *material handling*.

Entrada de Cargas - Num armazém inteligente é essencial identificar todos os produtos que entram no sistema. Apenas com uma boa identificação se pode processar os produtos de forma eficiente. Os produtos podem ser marcados utilizando código de barras ou *RFID*. O código de barras é muito utilizado para identificar objetos, porém não consegue reter muita informação e requer uma leitura um pouco dispendiosa em termos de tempo. [17]A tecnologia de *Radio-frequency identification (RFID)*, tem tornado-se cada vez mais popular e a sua utilização tem crescido nos últimos anos. A identificação por *RFID* é mais simples, precisa e eficiente. Além disso pode reter uma grande quantidade de dados, pode ser lida a uma grande distancia, e permite um melhor gestão de dados [1].

Armazenamento de Unidades - Num armazém tradicional os produtos são transportados para os seus respetivos locais através de empilhadoras, o que se torna lento e intenso para os trabalhadores. A utilização de *automated guided vehicles (AGV's)* e *storage and retrieval systems (AS/RS)* possibilita uma maior rapidez neste processo e limita a interação humana com os produtos, reduzindo os riscos e erros que possam acontecer [3].

Planeamento - De modo a otimizar o planeamento, utilizam-se vários *softwares* que recorrem a algoritmos de ordem e *scheduling*, e priorizam certas encomendas antes de efetuar alguma operação [3].

Picking - Os robôs ou veículos autónomos (*AGV's*) e os sistemas de armazenamento automatizado (*AS/RS*), são as duas tecnologias mais adequadas para a recolha de produtos. A sua utilização aumenta a eficiência de espaço e qualidade do serviço reduzindo ainda os custos operacionais associados. Vários tipos de equipamentos têm sido desenvolvidos para este propósito [12].

Processamento e Envio - Quando a encomenda é embalada e fica disponível para distribuição podem ser utilizados diversos tipos de equipamentos de movimentação como passadeiras, empilhadores ou AGV's [3].

Sistemas de Gestão e Controlo de Armazém (WMS e WCS) - Os sistemas de gestão e controlo de armazéns são o elo de ligação das várias partes que constituem um armazém. Estes sistemas controlam e monitorizam os processos através dos dados recolhidos pelos equipamentos implementados (ver Fig. 2.2) [14].

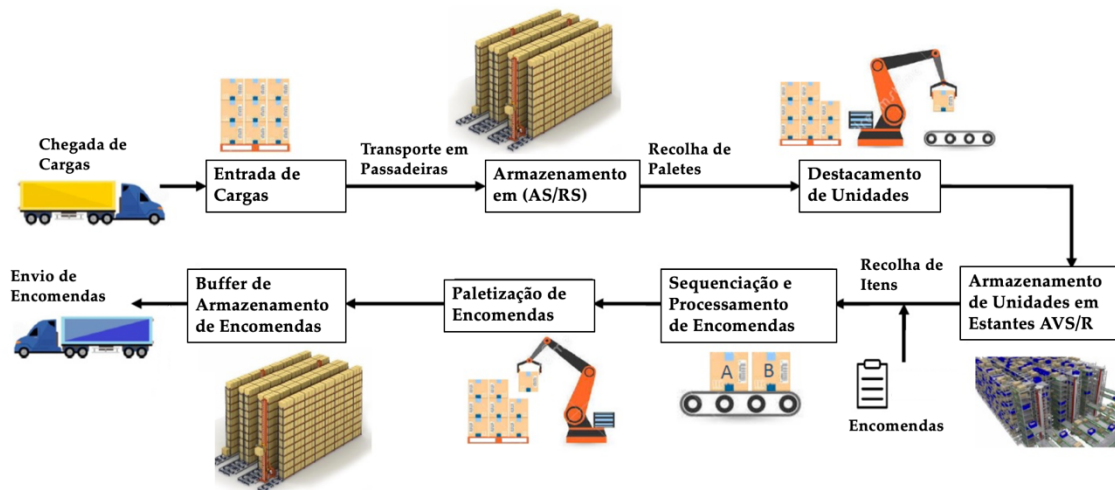


Figura 2.2 – Etapas de um Armazém Automatizado. (Adaptado de [1])

TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO AUTOMATIZADO

3.1 Introdução aos Sistemas de Armazenamento Automatizado (AS/RS)

As operações de armazém tendem a ser trabalhosas e requerem muito espaço. São necessárias grandes instalações para armazenar itens em prateleiras, movimentar *stock*, carregar e descarregar paletes ou contentores, inspecionar e embalar pedidos, e garantir todas as condições necessárias para efetuar cargas e descargas dos camiões. Com a evolução do comércio digital, as empresas armazenam uma enorme diversidade de itens e lidam com volumes variáveis de pedidos diários.

O processo de organização e separação de pedidos é bastante repetitivo, requer mão de obra qualificada a trabalhar em turnos e, frequentemente, sofre de baixa qualidade de ergonomia no posto de trabalho. Deste modo, não surpreende que os sistemas e os processos implícitos no funcionamento de um armazém, acabem por ser fortes candidatos a processos de automação [1].

Além disso, os terrenos disponíveis para armazéns devem situar-se preferencialmente em locais logisticamente favoráveis, o que devido à enorme competitividade, se tornaram cada vez mais escassos. Além disso, muitos dos armazéns necessitam de operar 24 horas por dia, 7 dias por semana, o que originou um grande impulso no desenvolvimento de novas tecnologias [18].

A automação de armazéns remonta a década de 1960, quando os primeiros armazéns de carga unitária se estabeleceram na Alemanha. Construídos em edifícios fechados com empilhadores ou guindastes destacados em cada corredor, esses sistemas conhecidos na indústria como AS/R (armazenamento e recolha automatizados) tinham a capacidade de armazenar *stock* em cargas unitárias (paletes ou caixas: sistema *mini-load*).

Desde então, a utilização de sistemas de AS/R tornou-se bastante popular, o que deu um grande incentivo à investigação académica e análise de diferentes modelos de armazenamento (ver Fig. 3.1) [14].

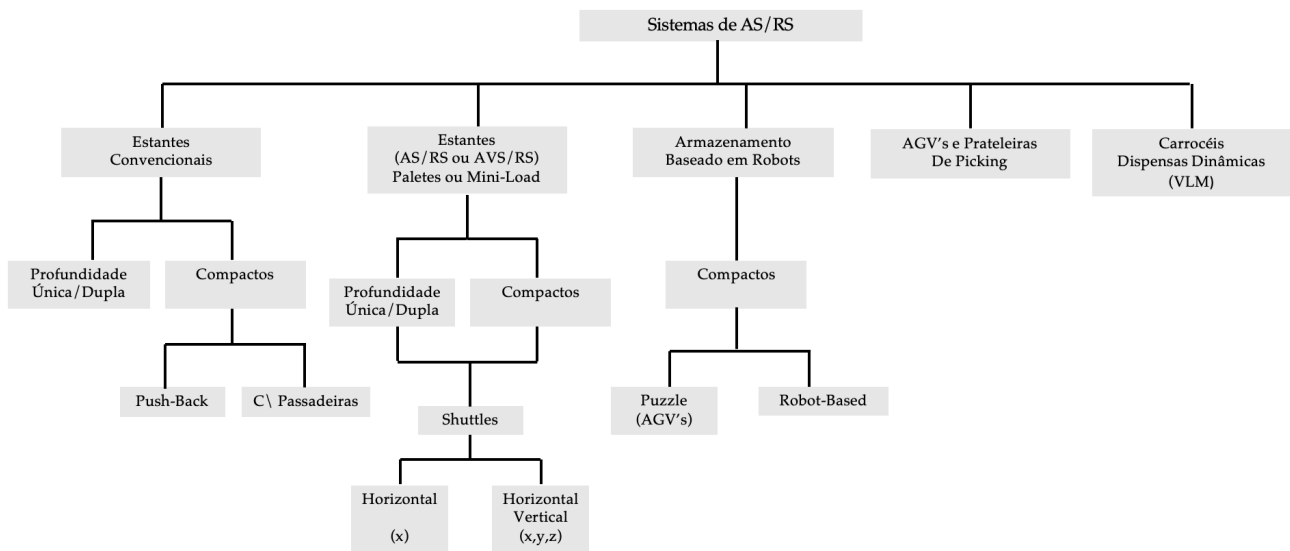


Figura 3.1 - Esquema das Tecnologias de Armazenamento Automatizado

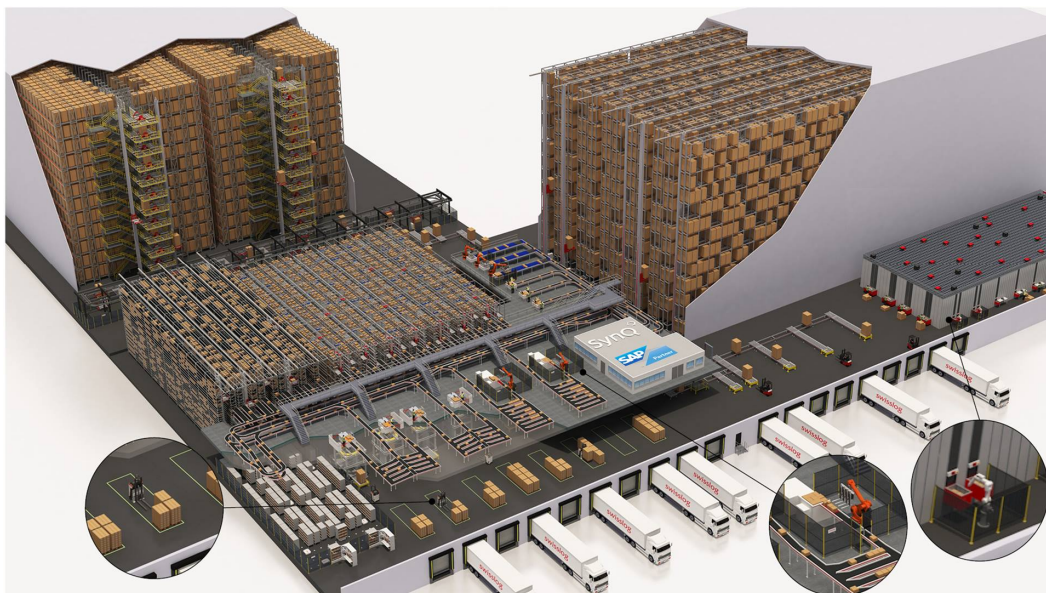


Figura 3.2 – Armazém completamente automatizado [19]

3.2 Armazenamento Convencional em Estantes

O armazenamento convencional em estantes é a solução menos automatizada disponível nos dias de hoje. No entanto pode ser a solução ideal para pequenos volumes de negócio. Utilizam-se empilhadores conduzidos por operadores para armazenar e recolher as paletes ou caixas das estantes. A distribuição e a altura das estantes são determinadas em função das características dos empilhadores, dos itens a armazenar e das dimensões do local.

Apesar dos processos de armazenamento e recolha não serem automatizados, este tipo de armazenamento pode ser assistido com equipamentos como passadeiras rolantes, sensores e *software* de gestão de armazém, de modo a otimizar a eficiência do mesmo.

Este tipo de sistema pode ser indicado quando não existem grandes limitações no aproveitamento de espaço, ou quando não são necessárias elevadas taxas de *input* e *output* de produtos.

3.3 Armazenamento Automatizado em Estantes (AS/RS)

A necessidade de aproveitamento máximo da superfície disponível nos armazéns levou à criação de transelevadores, máquinas concebidas para trabalhar em corredores mais estreitos e com alturas superiores a 30 metros (ver Fig. 3.3). A sua velocidade de deslocação, tanto na horizontal como na vertical, assim como o seu funcionamento automático, permitem triplicar a capacidade de armazenamento e extração das paletes ou caixas [1].

Os transelevadores são guiados, na sua parte superior, por um perfil colocado sobre as estantes e na sua parte inferior, por um carril fixo ao solo. São controlados digitalmente por software que automatiza as operações de entrada e saída de produtos, eliminando os erros derivados da gestão manual.



Figura 3.3 - Transelevadores para armazenamento automatizado em estantes. [20]

Existe uma enorme variedade deste tipo de sistemas o que facilita bastante a sua adaptação aos requisitos de cada armazém. Além dos transelevadores, podem ser instalados simultaneamente diferentes tipos de *shuttles* de modo a dar resposta a diferentes constrangimentos de capacidade, tempos de ciclo ou dimensões. As diferentes alternativas podem ser adaptadas a condições especiais, como por exemplo, temperaturas negativas, muito comum na indústria alimentar, ou ambientes de humidade e temperatura extrema [21].

Do ponto de vista de eficiência e sustentabilidade, estes armazéns podem ser equipados com dispositivos de poupança de energia, o que pode resultar em reduções energéticas consideráveis, tornando o projeto mais sustentável a longo prazo.

3.3.1 Profundidade Única ou Dupla com Transelevadores

Estes sistemas consistem em estantes e sistemas de movimentação automatizados, os transelevadores. A movimentação das paletes ou caixas dentro dos corredores pode ser executada através de transelevadores alocados em cada um. Fora das prateleiras, a movimentação pode ser realizada por sistemas de passadeiras e empilhadores. Para realizar uma operação de armazenamento, um transelevador levanta uma carga, geralmente de uma passadeira rolante, e armazena-o em estantes, tipicamente entre 30 m – 40 m de altura. A movimentação horizontal e vertical em cada corredor acontece simultaneamente [1]. A sequência do processo é invertida para a operação de recuperação de um item. Também é possível realizar um ciclo de comando duplo, no qual a operação de armazenamento e recolha são combinados, economizando um movimento por ciclo de comando duplo.

Se forem utilizadas caixas em vez de paletes, o sistema é descrito como *mini-load* (ver Fig. 3.4). Os armazéns de caixas, ou *mini-load*, aplicam o mesmo princípio dos armazéns de paletes, transportando as cargas até ao posto do operador e vice-versa. As unidades de carga (caixas), situadas nas estantes, são manipuladas automaticamente por um transelevador, que as deixa no posto do operário, para que este extraia ou deposite o produto. A zona de recolha e depósito de produtos nas caixas ou paletes, é normalmente auxiliada através de um sistema de passadeiras rolantes que direciona as cargas e faz a ligação entre o posto do operador e o transelevador. Em seguida, as caixas são devolvidas ao seu lugar na estante através do mesmo procedimento. O posto de trabalho, situado no final do corredor, pode estar equipado com diversas comodidades de modo a otimizar o rendimento do operário [22].

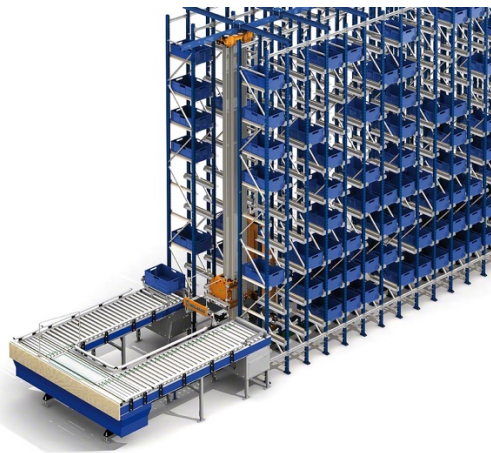


Figura 3.4 – Armazenamento em estantes (AS/RS) para caixas (Adaptado de [23])

Os sistemas de profundidade única ou dupla são normalmente indicados quando existe uma elevada variedade de referências, e alguma necessidade de aproveitamento de espaço e automação de processos. No caso de armazenamento em profundidade dupla os transelevadores podem ser equipados com braços de maior comprimento, de modo a recolher duas cargas se assim for necessário. No entanto, a taxa de input e output destes sistemas é limitada pelas características do transelevador escolhido, visto que apenas um transelevador fica responsável por cada corredor [24].

No caso de armazenamento baseado em classes, Yugang Yu, René B.M. de Koster e Xiaolong Guo [25] alertam para o facto de que se deve ter em consideração que quanto mais classes de armazenamento existirem, menos itens podem ser armazenados em cada classe. Isso pode resultar num aumento dos tempos de viagem do transelevador. Na prática o número ideal de classes situa-se entre três e cinco, sendo que o tempo de ciclo não varia consideravelmente nestes casos [25].

A versatilidade deste tipo de sistemas permite que seja integrado em qualquer tipo de processo de produção ou armazenamento.

3.3.2 Compactos Baseados em Transelevadores

Os sistemas de armazenamento com transelevadores também podem ser usados para armazenar cargas em profundidade nas estantes. Os sistemas compactos ou de multi-profundidade podem armazenar um maior número de cargas em cada faixa de armazenamento. Dependendo do tipo de produto ou tecnologia, podem suportar entre cinco a quinze unidades por faixa. Estes sistemas são particularmente utilizados quando a minimização de espaço de armazenamento é a principal preocupação, por exemplo, produtos frescos e armazéns de armazenamento a frio [1].

Num sistema de armazenamento compacto, um transelevador fica responsável pelos movimentos horizontais e verticais da estante, enquanto um mecanismo de transporte ortogonal executa o movimento de profundidade dentro de cada faixa.

Estes sistemas podem ser classificados em três categorias com base no mecanismo de movimento de profundidade utilizado: *push-back*, passadeiras, ou assistidos por *shuttles* de profundidade [26].

3.3.2.1 *Push-Back*

Nesta variante, o transelevador armazena as cargas empurrando-as mecanicamente para as faixas de armazenamento, forçando o movimento de todas as cargas armazenadas na faixa. O sistema funciona de acordo o princípio LIFO (*Last In First Out*) em que a última carga a entrar é a primeira a sair. Uma ligeira inclinação na faixa de armazenamento utiliza a gravidade de modo a garantir que uma carga esteja sempre disponível na frente de cada pista de armazenamento. A profundidade das faixas operadas em modo *push-back* é de até cerca de cinco cargas dependendo das condições do projeto (ver Fig. 3.5) [21].



Figura 3.5 – Armazenamento compacto em estantes [27]

3.3.2.2 Passadeiras

Neste tipo de solução, as estantes são equipadas com passadeiras rolantes. Se forem utilizadas apenas uma passadeira por faixa de armazenamento, o sistema funciona com o mesmo princípio LIFO (*Last In First Out*), semelhante ao sistema push-back [1, 21].

No caso de serem utilizadas duas passadeiras paralelas em cada faixa o sistema passa a poder funcionar com o princípio de primeira carga a entrar, primeira a sair, FIFO (*First In First Out*), ou pode também funcionar por rotação, apresentando a carga que for requisitada no ponto de saída. Os sistemas de passadeiras paralelas são aconselhados em situações de maior quantidade de cada tipo de item, visto que é duplicada a capacidade de armazenamento em cada faixa [21].

As passadeiras podem funcionar através de motores elétricos, ou com o auxílio da gravidade por inclinação. Devem ser utilizadas passadeiras elétricas se existir necessidade de aumentar a capacidade de armazenamento por faixa, visto que estas podem ser construídas com maior profundidade que as passadeiras de gravidade. Contudo, deve ter-se em consideração que a escolha de motores elétricos é uma alternativa mais dispendiosa por várias razões como por exemplo, investimento inicial, consumo de energia e manutenção. Além disso, a utilização de passadeiras elétricas é mais suscetível a comprometer o funcionamento do sistema em caso de avaria [28].

Através da Figura 3.6 é possível observar o funcionamento das estantes equipadas com passadeiras paralelas por gravidade, em que uma é responsável pela entrada e a outra pela saída de cargas.

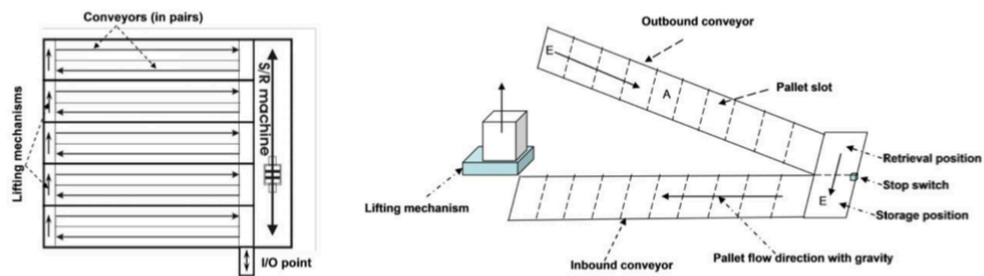


Figura 3.6 – Armazenamento compacto em estantes com passadeiras duplas [29]

As cargas unitárias fluem para a extremidade traseira da faixa através da passadeira de entrada. Posteriormente seguem para a passadeira de saída, ficando disponíveis na posição de recolha.

No caso de utilização de passadeiras de gravidade, a estante é equipada com um mecanismo de elevação simples na parte de trás de cada faixa de armazenamento, de modo a estabelecer a ligação entre as duas passadeiras de entrada e de saída. O mecanismo de elevação comanda a rotação das cargas unitárias. Sendo este o elemento mais lento, acaba por determinar a velocidade de rotação. Um interruptor de *stop* é instalado na ligação entre a posição de entrada e saída, de modo a que seja possível controlar qual a unidade a ser recolhida quando necessária pelo transelevador. Para recolher uma paleta é necessário que exista uma posição de armazenamento vazia entre as duas passadeiras paralelas [1].

Os sistemas com passadeiras elétricas não precisam de mecanismos de elevação no fim das faixas, mas utilizam motores elétricos mais caros e mais difíceis de concertar em caso de avaria.

3.3.2.3 Shuttles de Profundidade ou Satélites

São utilizados robôs de profundidade. Podem ser cativos do transelevador ou alocados nas faixas de armazenamento (ver Fig. 3.7). Estes robôs estão equipados com um mecanismo de elevação, e movimentam-se nas faixas através de carris debaixo das paletes, permitindo assim, que as unidades possam ser armazenadas e extraídas em estantes até 40 metros de profundidade [30].

Os *shuttles* de profundidade são alimentados por baterias, o que deve ser tido em consideração durante a execução do projeto. Além disso podem ter diferentes características em termos de velocidade de funcionamento, capacidade de carga, e sensores para detetar diferentes tipos de paletes [1].



Figura 3.7 – *Shuttles* de paletes em estantes [31]

Para armazenar uma carga, o transelevador eleva uma paleta ou caixa e assegura o movimento ao longo do corredor. Quando chega à faixa de armazenamento respectiva, o shuttle de profundidade levanta a carga e executa o transporte ao longo da faixa, voltando ao transelevador quando o armazenamento está concluído. Da mesma forma, a sequência é invertida para recuperar uma unidade. Em alguns casos pode ser preferível que os shuttles apenas se movimentem dentro das faixas. No caso de existirem mais faixas de armazenamento do que shuttles disponíveis, o transelevador fica encarregue de mover os robôs entre as faixas, se assim for necessário [32].

Uma das maiores desvantagens do armazenamento compacto é de que as paletes apenas sejam acessíveis por um lado, desta forma o seu princípio de funcionamento mais adequado é o LIFO (*Last In First Out*), última a entrar, primeira a sair. Se for necessária a recolha de uma unidade em específico no interior das estantes, o sistema executa um processo de realocações de modo a permitir que essa carga possa ser extraída, não sendo assim o sistema mais aconselhado para esse tipo de situações [1].

Este tipo de sistemas é indicado para armazenar cargas pesadas e assegurar uma elevada taxa de utilização de espaço.

Na figura 3.8 é apresentado o referencial escolhido para descrever os movimentos de armazenamento dentro das estantes.

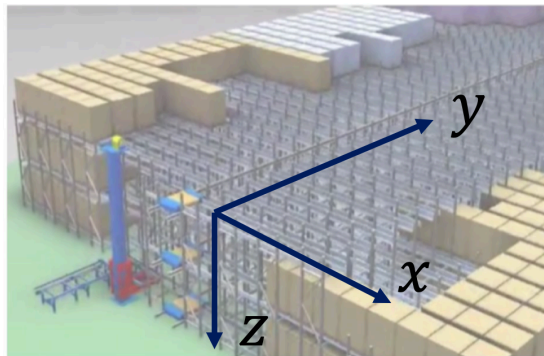


Figura 3.8 - Referencial utilizado na dissertação (adaptado de [31])

3.3.3 Compactos Baseados em *Shuttles* (AVS/RS)

A taxa de *input* e *output* de um sistema baseado em transelevador é limitada, visto que apenas um transelevador é responsável pelo movimento vertical e horizontal das cargas ao longo de um determinado corredor. Isso deu origem a uma nova geração de sistemas, os sistemas de armazenamento automatizado baseado em *shuttles* ou veículos autónomos (AVS/RS - *Automated Vehicle Storage and Retrieval Systems*) [1].

Estes sistemas tornaram-se populares porque o investimento necessário acaba por ser semelhante aos sistemas baseados em transelevadores (AS/RS), mas oferecem uma maior flexibilidade na capacidade de armazenamento e recolha de unidades. Através da instalação de mais veículos no sistema, este pode rapidamente dar resposta a maiores taxas de *input* e *output* [1, 31].

Um sistema típico de armazenamento baseado em *shuttles*, utiliza veículos que podem transportar cargas nas direções x e y de um plano horizontal nas estantes, e não apenas numa direção dentro das faixas, como explicado na secção 3.3.2.3. Nesta variante, o movimento vertical é normalmente assistido por um elevador na entrada do corredor de armazenamento.

Mais recentemente, surgiram diversas soluções robóticas nas quais os veículos autónomos têm não só a capacidade de se mover na horizontal, mas também na vertical entre os vários níveis da estante [33].

Estes sistemas podem ser projetados com diversas características, de modo a armazenar diferentes tipos de paletes ou caixas.

3.3.3.1 *Shuttles* Horizontais (x,y)

Este tipo de sistemas consiste em estantes com faixas de armazenamento em ambos os lados, e um corredor longitudinal entre as estantes (ver Fig. 3.8).

Para executar o armazenamento ou recolha de uma unidade é utilizado um elevador que assiste os movimentos verticais das cargas e disponibiliza num ponto de recolha existente em todos os planos horizontais da estante. Este elevador situa-se normalmente na entrada de

cada corredor. De seguida a carga é manipulada e transportada autonomamente por um veículo até ao seu local de armazenamento, sendo este responsável pelo movimento horizontal, tanto em longitude como em profundidade dentro das estantes. Para recuperar uma unidade, o processo é invertido [1].

Os *shuttles* podem também utilizar o elevador, subindo ou descendo, de modo a aceder todos os níveis da estante. O elevador é apoiado por um sistema de passareiras, que fazem a ligação entre o elevador e um posto de trabalho, onde ocorre a transferência de produtos ou itens [1, 31].

Charles J. Malmborg [33] enfatizam que a vantagem da utilização de um sistema baseado em *shuttles* (AVS/RS) comparado com um sistema baseado em transelevadores (AS/RS), é a capacidade de adaptar o número de veículos ativos consoante a taxa de *input* e *output* pretendida.



Figura 3.9 - Armazenamento compacto baseado em *shuttles* e elevadores [31]

Existe também a possibilidade de executar armazenamento compacto baseado em elevadores e *shuttles* horizontais. A utilização destes equipamentos em comparação com a alternativa de transelevadores, descrita na secção 3.3.2, permite ao sistema uma maior flexibilidade em termos de velocidade de entrada e saída de cargas.

Esta variante de armazenamento compacto é indicada quando se aplica o princípio de LIFO (*Last In First Out*), a não ser que seja projetada a possibilidade de recolha de unidades do lado oposto.

Kaveh Azadeh, René de Koster e Debjit Roy[1] apresentam um estudo num sistema de armazenamento de camada única, onde mostra que para minimizar o tempo de processamento se deve utilizar um rácio de profundidade/largura de 1,25.

Existem diversos modelos, estudados consoante o *layout* escolhido para o projeto, o que deve ser tido em consideração, de modo obter o maior rendimento possível com o investimento realizado.

3.3.3.2 *Shuttles* Horizontais e Verticais (x,y,z)

Nesta variante, os robôs podem percorrer independentemente as estantes de armazenamento. No caso extremo de apenas um robô disponível, continua a ser possível a recolha e

armazenamento de unidades. Estes veículos autónomos têm a capacidade de se movimentar horizontalmente e verticalmente nas três direções das estantes, sem a necessidade de auxílio de um elevador (ver Fig.3.10) [32].

O processo de armazenamento e recolha com este tipo de veículos, permite ao sistema uma maior independência entre equipamentos, comparando com o sistema de *shuttles* horizontais (x,y). Além disso, a manutenção deste tipo de sistemas é mais fácil, visto que um robô com problemas, pode ser substituído sem afetar as operações. Em comparação, no caso de falha de um *shuttle* horizontal, num ponto de movimentação de carga, existe a possibilidade de bloquear todo o funcionamento do sistema [1, 34].

Se existir necessidade de aumento da taxa de entrada e saída de unidades, esta variante oferece alguma vantagem, face à anterior, visto que a instalação de novos veículos no sistema é menos exigente tecnicamente [31, 34].

Os sistemas de *shuttles* horizontais e verticais parecem ser mais fiáveis que a alternativa de com *shuttles* horizontais apenas, no entanto não existem estudos suficientes para fazer essa afirmação.

Kaveh Azadeh, René de Koster e Debjit Roy [1] comparam o desempenho operacional e os custos de ambos os sistemas, aplicados em armazéns idênticos. Os resultados mostram que o sistema de *shuttles* de movimento trilateral produz sempre melhor rendimento e menores custos operacionais, quando comparado com a alternativa de *shuttles* horizontais (x,y) e elevadores.



Figura 3.10 – Armazenamento em estantes baseado em shuttles (Adaptado de [1])

3.4 Armazenamento Baseado em Robôs Autônomos

3.4.1 Sistema Compacto em Forma de Puzzle (Horizontal)

Os sistemas de armazenamento compacto em *puzzle*, apresentam uma alternativa moderna de armazenamento e gestão de inventário. Utilizam robôs para armazenar e recolher itens de forma eficiente. A ideia base deste tipo de solução, é armazenar unidades de uma forma compacta utilizando uma disposição em forma de *puzzle*. Esta abordagem é particularmente útil para gerir grandes inventários e maximizar a utilização de espaço. A utilização deste tipo de solução é mais adequada para espaços com pouca altura, onde o armazenamento é executado no plano horizontal [35].

Nesta alternativa, o sistema é controlado por um programa de *software* que coordena todos os movimentos dos robôs. O controlo por software permite otimizar a forma com que as unidades são armazenadas, tomando em consideração fatores como peso, tamanho e frequência de utilização [29, 35].

Para armazenar e recolher as cargas, o sistema pode ser adaptado em diferentes formatos, de forma corresponder às necessidades do armazém. Na figura 3.11e 3.12 é possível observar diferentes *layouts* utilizando este tipo de sistema [1, 35].

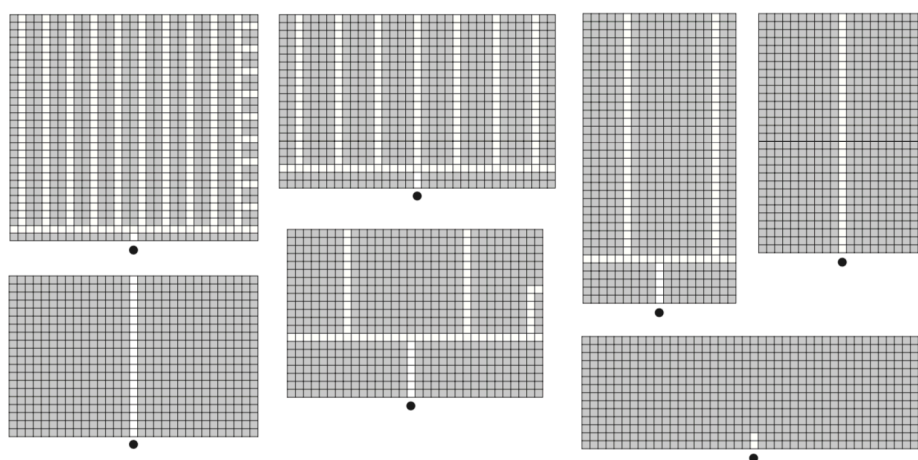


Figura 3.11 – Esquemas de armazenamento em forma de *puzzle* [1]

Para movimentar uma carga, o sistema abre uma passagem entre as unidades na grelha, para que seja possível transportar a unidade pretendida. Isto é aplicado tanto para entrada como para saída de itens do armazém.

Os robôs utilizados são normalmente pequenos, ágeis e capazes de se mover em múltiplas direções, assim como aceder a espaços pequenos. Tipicamente designados como AGV's (*Autonomous Guided Vehicles*) são equipados com diversos sensores e câmaras, que lhes permitem movimentar autonomamente e localizar itens específicos de forma rápida [36].

Uma das principais vantagens desta solução é a capacidade de poupança de espaço, o que pode beneficiar significativamente armazéns localizados em zonas urbanas, onde o valor

do espaço é mais elevado. Além disso, pode também otimizar a gestão do armazém, e aumentar a rapidez e qualidade de resposta às encomendas.

Existem muitos fabricantes de sistemas baseados em *puzzle*, oferecendo diversas alternativas e implementações [37].

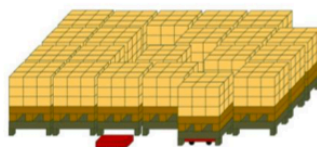


Figura 3.12 - Armazenamento em Puzzle com AGV's [1]

3.4.2 Sistema Compacto Baseado em Robôs Autônomos (*AutoStore*)

Neste tipo de sistemas, os artigos são armazenados num bloco com uma grelha no topo, permitindo um armazenamento com densidade elevada.

Em cada célula da grade superior são depositadas caixas, contendo um ou mais artigos no seu interior. As caixas são empilhadas topo a topo, formando assim faixas de armazenamento vertical dentro do bloco. Os robôs nestes sistemas são posicionados na grade superior do bloco. Têm a capacidade de elevar e extrair cargas dentro do bloco, assim como transportar as unidades até às estações de trabalho, onde um operador coloca ou recolhe os produtos requisitados (ver Fig. 3.13) [1, 29].

Na variante mais popular destes sistemas, o *Autostore*, desenvolvido pela *Hatteland*, as estações de trabalho são localizadas junto ao nível inferior do bloco. Esta solução oferece vantagens comparativamente a sistemas de armazenamento mais tradicionais, operando em espaços mais pequenos, e permitindo maior eficiência de utilização de espaço [38].

Estes sistemas são bastante utilizados na indústria farmacêutica e eletrónica, para armazenar itens de pequenas dimensões. Também podem ser utilizados para produtos de maiores dimensões, como equipamentos de automóveis. No entanto, não são a solução adequada para o armazenamento de grandes cargas, para este efeito devem ser escolhidos alguns dos sistemas descritos nas secções anteriores [39].

Para controlar as operações, os sistemas são integrados com programas de *software* de gestão de armazém (WMS – *Warehouse Management Systems*). Quando é recebido um pedido, o sistema de gestão transmite essa informação ao *Autostore*, de seguida o item é recolhido numa estação de trabalho, e dirigido para a zona de embalagem. Isto permite um processamento com uma velocidade elevada e minimização de erros, aumentando a produtividade.

A execução de um projeto utilizando esta solução, pode ser customizado, optando por diferentes *layouts* e características de modo a corresponder aos requisitos [3, 32].

Comparando esta variante de armazenamento, com a alternativa descrita na secção 3.3.3, estes sistemas apresentam uma maior velocidade de processamento, no entanto são mais adequados para itens de pequenas dimensões, enquanto que as alternativas em estantes com shuttles e elevadores permitem o armazenamento de itens mais volumosos, no entanto estas acabam por necessitar de espaços maiores que os *Autostores* [1, 39].

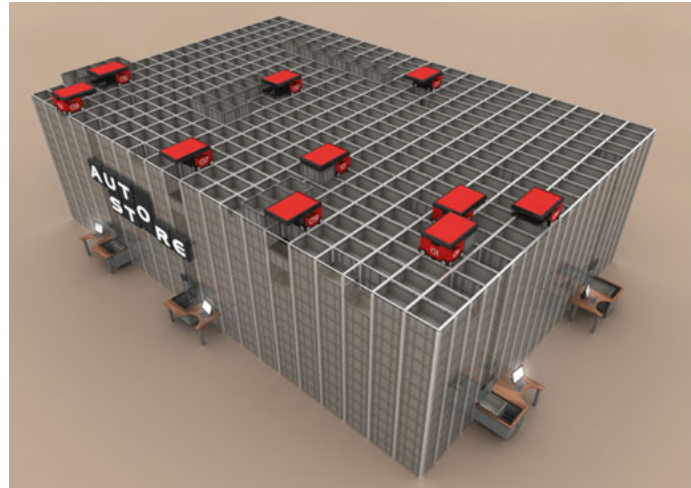


Figura 3.13 - Armazenamento em autostore [39]

3.5 Carrosséis, e Dispensas Dinâmicas (VLM)

Os carrosséis são sistemas automatizados, nos quais um sistema rotativo fechado de prateleiras executa assiste o processo de armazenamento e recolha. A rotação pode ser vertical ou horizontal, consoante o equipamento escolhido. Estes sistemas são também descritos como um tipo de solução *goods-to-person* [1].

Nestes sistemas um operador trabalha num local fixo e o carrossel transporta os itens requisitados à estação de trabalho. São bastante adequados para armazenar pequenos produtos, como livros e produtos de saúde [40, 41].



Figura 3.14 – a) Carrossel horizontal b) Carrossel vertical [40, 41]

As dispensas automatizadas, ou módulos de elevação vertical (VLM – *Vertical Lift Modules*) funcionam de uma forma bastante semelhante aos carrosséis, mas operam de forma diferente (ver Fig. 3.14 e 3.15). Esta alternativa é composta por duas colunas de bandejas e um local onde se processa a recolha ou depósito de um produto. Quando um artigo é necessário, o sistema localiza a bandeja específica e disponibiliza-a ao local de entrada e saída, onde é executada a recolha por um operador em frente ao módulo [1, 42].

A localização do ponto de recolha e armazenamento num posto estático, elimina a movimentação desnecessária dos operadores, aumentando a produtividade dos mesmos. Nos postos de trabalho é também possível instalar equipamentos de rotulagem e embalagem, de forma a rentabilizar os tempos de espera de rotação do sistema [43].



Figura 3.15 - Dispensas Automatizadas (VLM) [42]

3.6 Prateleiras Móveis e AGV's

Os sistemas de prateleiras móveis e AGV's, também descritos como RMFS (*Robotic Mobile Fulfillment Systems*), são sistemas nos quais os robôs têm a capacidade de transportar prateleiras com cápsulas de armazenamento. Estas prateleiras são movimentadas de acordo com os pedidos efetuados pelos operadores, disponibilizando as cápsulas de armazenamento nos diversos locais de trabalho de cada trabalhador. Estes executam a recolha, ou armazenamento de artigos nas cápsulas, em estações de trabalho projetadas ergonomicamente. Este princípio de utilização, onde os produtos se deslocam até aos operadores, e não o contrário, como acontece em sistemas baseados em recolha de itens manualmente, permite aumentar bastante a produtividade dos trabalhadores (ver Fig. 3.16) [1, 29].

As lojas de revenda *online*, possuem normalmente um stock com enorme variedade de pequenos produtos e este sistema é bastante útil para atuar nos centros de distribuição, acelerando o processamento de encomendas. Além disso acabam por ser uma opção bastante flexível, podendo acrescentar mais prateleiras móveis ou AGV's conforme necessário. Uma das empresas mais populares pela utilização deste tipo de equipamentos é a *Amazon*, tendo já adquirido uma empresa de fornecimento deste tipo de robôs, a *AmazonRobotics* [44].

Num sistema como este, o processo ocorre da seguinte forma. Primeiro um AGV recebe um pedido para recolher uma prateleira específica. Depois, navega pelo armazém através de sensores e câmaras, até recolher a prateleira. Em seguida, o AGV transporta a prateleira até à localização solicitada, onde a deixa disponível para o operador, e segue para executar outra tarefa. Operando deste modo, o armazenamento acaba por ser dinâmico, não tendo uma localização fixa, como acontece nas outras variantes já descritas anteriormente [1, 32].

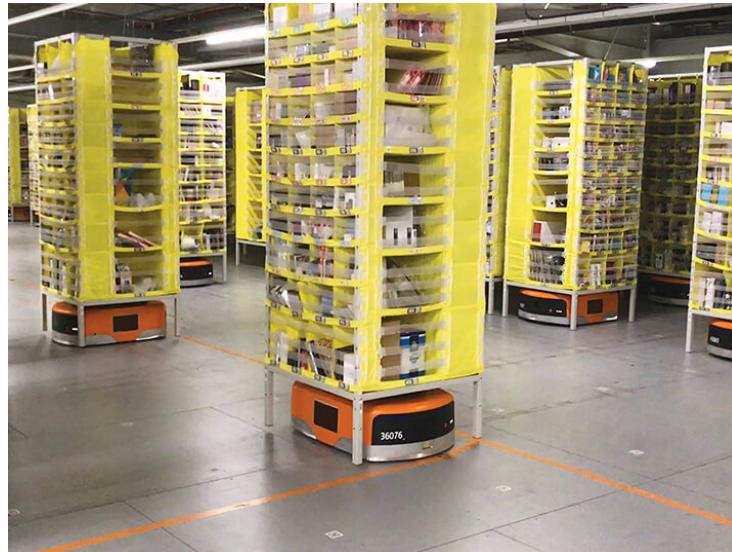


Figura 3.16 - Prateleiras e AGV's [45]

Em [1] é referenciado um estudo mostra que a eficiência dos processos é independente do comprimento e largura da área de armazenamento, a não ser que seja uma área bastante complexa. No entanto, as posições das estações de trabalho podem afetar diretamente a capacidade de processamento, o que deve ser tido em consideração durante a execução de um projeto.

As prateleiras são normalmente adquiridas em dois tamanhos *standard*, uma das opções pode carregar até 450 kg e a outra pode chegar aos 1300 kg de carga. Devido a este, e a outros fatores acima descritos, a escolha e utilização deste tipo de soluções, apresenta uma enorme flexibilidade, e garante uma forte adaptabilidade aos serviços pretendidos [29, 32, 45].

3.7 Sistemas de Passadeiras de Apoio ao Armazenamento

A utilização de passadeiras é bastante comum para movimentação de cargas dentro de um armazém. Estas podem ser utilizadas como local de rastreamento, *buffer*, permitir a rotação de cargas e direcioná-las para estações de trabalho. Existem diversos tipos de passadeiras destinadas a diversos tipos de funções, podem funcionar pela ação da gravidade, ou ser controladas por motor elétrico [28]. Podem ser reconfiguradas, o que promove a flexibilidade do sistema, e são muito eficientes do ponto de vista do consumo de energia [46].

As passadeiras requerem geralmente muito pouca manutenção, servindo assim como uma boa alternativa a empilhadores, e aumentando a fluidez do fluxo de cargas no armazém (ver Fig. 3.17) [28, 46].

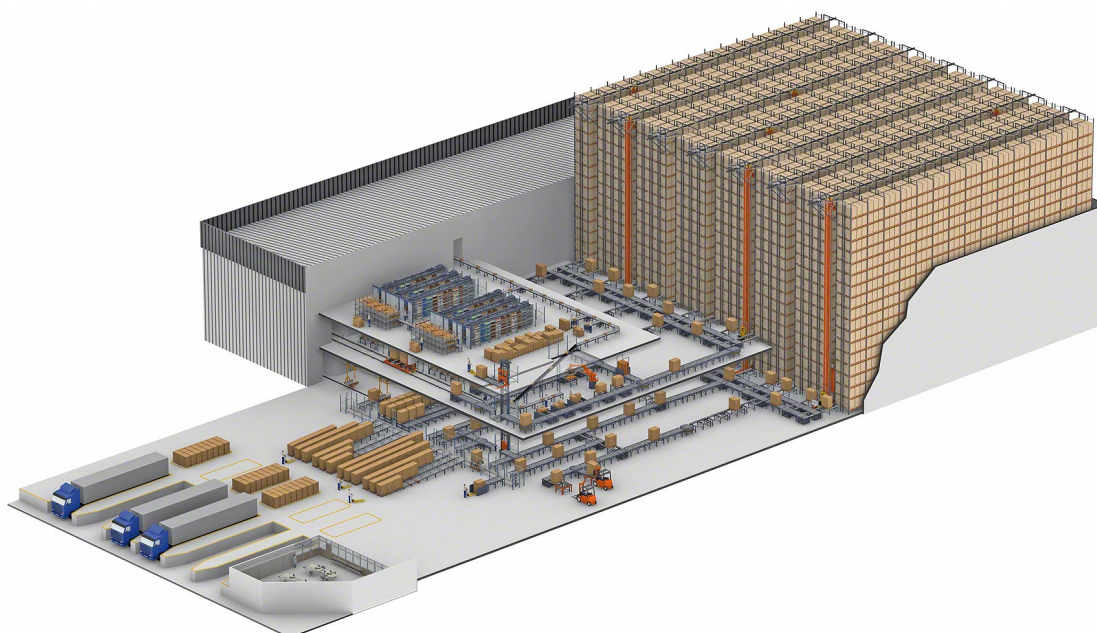


Figura 3.17 – Sistema de passadeiras de apoio ao transporte (Adaptado de [28])

METODOLOGIA PARA A ESCOLHA DE EQUIPAMENTOS A UTILIZAR

4.1 Introdução

Os armazéns atuais enfrentam alguns desafios provocados pelas alterações nos modelos de negócio em vários aspetos, como, tempo de processamento e utilização de espaço, ambos reflexo do aumento de competitividade das empresas. Estes dois aspetos acabam por ser os maiores catalisadores da adoção de novas tecnologias de armazenamento, tanto no sentido de automação de processos físicos, como no sentido de gestão e controlo digital.

No mercado atual de soluções logísticas, os sistemas de armazenamento e recolha automatizados (AS/RS), são identificados como uma solução tecnológica relevante face desafios. Estas tecnologias são adotadas pela sua capacidade de acelerar e controlar processos, oferecendo melhores condições de trabalho aos operadores. Além disso, minimizam os erros e otimizam a utilização de espaço, visto que tornam possível uma elevada densidade de armazenamento, e viabilizam o aproveitamento de espaços menos convencionais.

As ferramentas da indústria 4.0 podem ser adaptadas a diferentes processos logísticos, tanto do ponto de vista físico como de controlo digital. Resultante desta necessidade de modernização, as empresas são deparadas com as seguintes questões: Que tecnologia aplicar, e para que aplicação? Como as utilizar e adaptar de modo a darem resposta a objetivos concretos? Qual o será o seu desempenho e possíveis resultados económicos? Estas questões levam ao seguinte problema: Que metodologia seguir de modo a encontrar a melhor solução para os problemas enfrentados.

Baseado na literatura, particularmente em [43, 44, 47] e em alguns catálogos de fornecedores [48], parece existir algum consenso na forma geral de abordar os problemas envolvidos no projeto de armazéns. A metodologia proposta apresenta diversas etapas, que devem ser utilizadas como *checklist* durante a execução do projeto.

Apesar de existir algum consenso quanto ao procedimento comum de projeto, pode existir alguma variação nos métodos de trabalho de cada empresa de serviços de soluções tecnológicas. Existe também alguma possibilidade de discussão na escolha de processos específicos, assim como variações na sequência de execução dos mesmos, visto que um projeto acaba por ser um processo iterativo e contínuo.

Os modelos de simulação são bastante relevantes, tanto do ponto de vista económico, como do funcionamento do sistema em concreto. Estes modelos devem servir como auxílio durante o projeto, sendo evidente que, perante a escolha de determinadas opções, a tomada de decisões seja confiada a projetistas mais experientes. Só deste modo, pode ser obtida a melhor solução, tanto em termos de sustentabilidade do projeto a longo prazo, como de rapidez na implementação do sistema.

4.2 Metodologia Proposta

4.2.1 Fases da Metodologia

A metodologia proposta segue as orientações apresentadas por Christine Bauer e Anind K. Dey [49] que está mais adaptada para projetos de adoção de novas tecnologias, contudo são acrescentados pontos relevantes a cada uma das etapas, baseados na literatura [3, 15, 47, 48, 50].

As etapas propostas para a metodologia são representadas na figura 4.1.

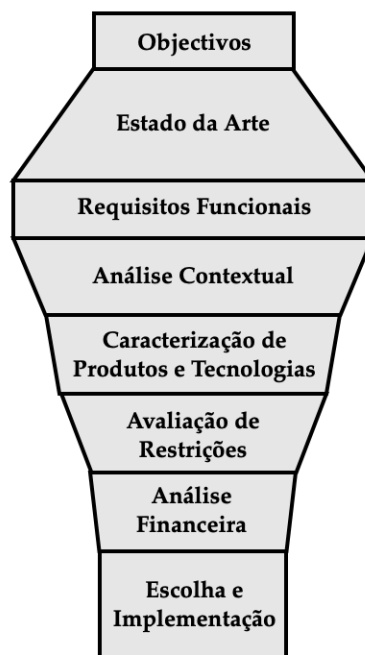


Figura 4.1 - Fases do Projeto

4.2.2 Objetivos

Nesta etapa devem ser definidos os objetivos da empresa, de modo a dar resposta às necessidades atuais, e sustentar o projeto a médio e longo prazo. Os motivos pelos quais as empresas recorrem a soluções automatizadas são geralmente os seguintes [4, 12, 26, 38, 43, 47, 48]:

- Previsão de crescimento
- Aumento de capacidade de armazenamento
- Eliminação de erros
- Otimização de tempos de processamento
- Aumento de procura
- Realocação de instalações
- Elevado número de perdas ou danos
- Otimização de controlo e gestão
- Variação do tipo de produtos

4.2.3 Soluções Disponíveis no Mercado

Esta secção permite perceber as opções existentes para projeto. No capítulo 3, são descritas, mais detalhadamente, as tecnologias e soluções disponíveis para armazenamento automatizado.

A investigação de projetos semelhantes permite analisar os desafios encontrados, e analisar as opções mais adequadas para o caso em concreto.

De modo a orientar o projetista, é proposta a tabela 4.1 onde se resumem os atributos das várias tecnologias abordadas no capítulo 3. Apoiado na literatura revista e em alguns catálogos de fabricantes, apresentam-se as características gerais das várias tecnologias de armazenamento abordadas.

É de referir que, por consequência da pouca literatura neste tema em concreto, e pela variabilidade dos modelos e fabricantes de equipamentos de armazenamento automatizados, as características apresentadas, tentam representar de uma forma generalizada as soluções mais comuns aplicadas na indústria. Sendo muito difícil abranger todas as possibilidades e variações disponíveis para cada uma das soluções, estas observações devem ser tomadas como um ponto de partida, perante as fases iniciais de eliminação de opções que não contribuem ao projeto, e não como objeto de decisão final entre as várias soluções.

Tabela 4.1 – Especificações das Tecnologias de Armazenamento Automatizado

Tipo de Armazenamento	Sub-Categorias	Peso Suportado (Cada Compartimento)	Dimensões gerais de cada compartimento (Comprimento, Largura, Altura)	Altura de Armazenamento Possível
Estantes (Euro Paletes) [21, 27, 30, 48, 51]	Profundidade Única ou dupla com Transelevadores	até 1500 kg por palete	1,00 x 0,80 x 1,50 (m) * altura variável	Muito Elevado (até 40 m)
	Compacto com Transelevadores (Push-Back, Passadeiras)	até 1500 kg por palete	1,00 x 0,80 x 1,50 (m) * altura variável	Elevado (geralmente menor que a alternativa anterior)
	Baseado em Shuttles e Elevadores (AVS/RS)	até 1500 kg por palete	1,00 x 0,80 x 1,50 (m) * altura variável	Elevado (geralmente até 15m)
Estantes (Caixas Mini-Load) [15, 23, 48]	Baseado em Transelevador	até 50 kg por caixa	0,60 x 0,40 x 0,40 (m)	Muito Elevado (até 40 m)
	Baseado em Shuttles em Elevadores (AVS/RS)	até 50 kg por caixa	0,60 x 0,40 x 0,40 (m)	Elevado (geralmente até 15m)
Carrrosséis e Dispensas Dinâmicas (VLM) [1, 40-42]	Horizontais	até 100 kg	1,00 x 0,60 x 0,50 (m) * variáveis	Médio (3 a 10 metros) (dependendo dos modelos)
	Verticais	até 1000 kg	até 3,50 x 0,80 x 0,70 (m) * variáveis	Médio (3 a 10 metros) (dependendo dos modelos)
	Dispensas Dinâmicas (VLM)	até 500 kg	2,50 x 0,80 x 0,70 (m) * variáveis	Médio - Entre 3 e 10 metros (dependendo dos modelos)
Armazenamento Robotizado [1, 22, 29, 39]	AutoStore	até 30 kg por caixa	0,65 x 0,45 x 0,45 (m) * variáveis	Médio (até 7 metros)
	AGV's e Prateleiras Móveis	até 1300 kg por prateleira (vários compartimentos)	1,00 x 0,60 x 0,50 (m) * variáveis	Baixo (até 2 m)

4.2.4 Requisitos Funcionais do Projeto

A definição dos requisitos funcionais deve ser feita de acordo com as necessidades e objetivos do projeto. De modo a perceber os contornos do mesmo, é recolhida informação, e avaliada a relevância de vários aspetos, assim como [3, 12, 26, 44, 47]:

- **Requisitos de espaço** - Avaliação do espaço necessário para armazenar todo o inventário, assim como permitir a utilização de equipamentos e movimentação de cargas de uma forma eficiente e segura.
- **Layout** - Deve ser avaliado o *layout* existente, de modo a perceber as características do armazém em termos de: eficiência de processos, estações de trabalho, número de operadores, movimentação de unidades e equipamentos, locais de armazenamento, acessibilidade e pontos de entrada e saída de carga.
- **Equipamentos e tecnologias** - Recolha de informação acerca dos equipamentos e sistemas de controlo utilizados, tendo em consideração a compatibilidade ou adaptação de tecnologias que venham a ser instaladas no futuro.
- **Segurança** - Este aspeto deve ser priorizado durante o projeto do *layout*. A integração de sistemas de prevenção de incêndio, saídas de emergência e aspetos de consumo de energia e segurança no trabalho, devem respeitar as normas e regulamentação necessária. A instalação de câmaras de vigilância, alarmes, ou até áreas de acesso restrito, devem ser consideradas. Além disso, devem ser analisadas as práticas de armazenamento e movimentação de carga, para que, se necessário, seja dada formação aos operários durante a implementação de novos sistemas.
- **Climatização** - Dependendo do tipo de produtos e materiais armazenados, o controlo de temperatura e humidade pode ser relevante para assegurar as condições necessárias de armazenamento.
- **Flexibilidade** - A avaliação do projeto em termos de flexibilidade deve ser considerada, permitindo ao sistema a adaptação a condições variáveis de funcionamento. Tendo em conta o contexto em que está inserido, a sustentabilidade do projeto, a longo prazo, pode ser dependente desta característica.

Além destes aspetos, devem ser recolhidas informações relativas às cargas. Mais especificamente, dimensões, peso, número de referências, princípios utilizados (por exemplo LIFO ou FIFO), rastreamento, condições de armazenamento e existência de materiais perigosos. As componentes legais e técnicas, a quantidade e tipos de produtos, a capacidade estática e dinâmica do armazém, as taxas de *input* e *output*, assim como o número de ciclo necessários também devem ser avaliados.

Com estas informações podem ser realizadas bases de dados e executadas análises estatísticas, contruindo assim o perfil do cliente. Devem ser consideradas as seguintes variáveis: perfil de encomendas, perfil da atividade de produtos, perfil do inventário, perfil de sazonalidade e atividades diárias, perfil de relevância de processos e perfil de investimento, por exemplo, salários, impostos e retorno exigido [3, 44, 47].

Deste modo torna-se possível avaliar a relevância de certos aspetos, e orientar o projeto na direção mais apropriada, personalizando as características às necessidades do cliente. A lista seguinte apresenta, de uma forma geral, alguns dos motivos e direções mais comuns:

- Acomodar o maior número de referências (quantidade, tamanho, tipo, peso)
- Adaptar às variações de mercado
- Permitir a movimentação e armazenamento de forma mais precisa e eficiente
- Melhorar a segurança e locais de trabalho dos operadores
- Elevar a capacidade de resposta a picos de procura
- Reduzir a sobrecarga de mão de obra
- Aumentar as taxas de input e output do sistema
- Simplificar o armazenamento e otimizar a organização e controlo
- Permitir maior densidade de armazenamento
- Otimizar a fluidez entre processos
- Melhorar a gestão e controlo do sistema
- Reduzir o consumo de energia e atingir metas de sustentabilidade

4.2.5 Análise Contextual

Nesta fase, os requisitos funcionais já devem ter sido considerados e avaliados por ordem de relevância de acordo com os desafios apresentados. O objetivo desta etapa é eliminar opções que não sejam relevantes para o sistema em consideração. Contudo, deve ser tomada com alguma ponderação, e aconselhamento de projetistas experientes.

Como já foi referido anteriormente, a sustentabilidade do projeto a longo prazo, pode ser comprometida por decisões tomadas na escolha dos tipos de equipamentos utilizados, ou na forma como são aplicados. A competitividade dos mercados atuais exige uma maior flexibilidade e adaptabilidade dos sistemas. Desse modo, deve ser executada uma análise bastante detalhada dos tipos de tecnologias e os seus atributos. Pode-se recorrer a árvores de decisão, geralmente disponibilizadas pelos fornecedores deste tipo de soluções [3, 12, 47].

É aconselhável observar e investigar os caminhos tomados por empresas semelhantes e mais avançadas no processo de automação dos seus armazéns. Joakim Kembro e Andreas Norrman [12] apresentam um estudo bastante pertinente, onde indicam as características e direções tomadas por várias empresas no mercado atual, e sugerem as tendências para os próximos cinco anos. Através da análise de dados, de 50 empresas suecas, conseguem abranger variados tipos de indústrias, com diferentes níveis de automação, desde distribuidores pequenos a centros de distribuição de larga escala. Além disso, apresentam resultados de forma prudente e pouco enviesada, tendo em conta os fatores contextuais e as diferenças no funcionamento de cadeias de distribuição.

Através da análise estatística efetuada, [12] destacam várias proposições:

- Quanto maior for a intensidade de mão-de-obra num processo, maior é a prioridade de o automatizar, onde se destacam os processos de recolha de unidades, embalagem e processamento de saída de encomendas.
- Quanto menores forem os produtos, e maior for a variedade a rotatividade dos mesmos, mais os distribuidores investem em automação, para melhorar os processos de movimentação de cargas.
- Quanto menor for a influência de fatores contextuais nas atividades do armazém, mais estandardizadas são as soluções, e vice-versa.
- A escolha de soluções de armazenamento estático, reduz a capacidade de adaptação a alterações contextuais futuras, por exemplo, reduzir os tempos de processamento, ou permitir maior variedade de produtos.
- Do ponto de vista da digitalização, os *softwares* de controlo e gestão (WCS, WMS), constituem os pilares do processamento de armazéns, enquanto que as tecnologias mais mediáticas como RFID, IoT, entre outras, terão um desempenho limitado nos próximos anos.
- Quanto maior for o foco para comércio *online*, maior é a tendência para investir em tecnologias de gestão de dados, conectividade e análise em tempo real.
- Empresas com diferentes estratégias de funcionamento, optam por diferentes caminhos em relação ao conceito de *smart warehouse*. Fornecedores com várias cadeias integradas de abastecimento tendem a seguir o caminho da automação de processos, enquanto que fornecedores com cadeias de abastecimento menos complexas, como os de comércio digital, optam pelo caminho da digitalização.

4.2.6 Caracterização de Produtos e Tecnologias de Armazenamento

Nesta secção, é proposta uma categorização dos tipos de produtos e uma avaliação qualitativa dos tipos de soluções de armazenamento disponíveis no mercado atual.

Esta proposta, é baseada na literatura disponível mais atualizada. Apesar da extensa literatura relacionada com logística e armazenamento, existem muito poucos artigos direcionados às condições e tecnologias atuais, de onde se destacam as referências [1, 3, 12, 44].

A caracterização dos produtos em termos de tamanho segue a sugestão de Joakim Kembro e Andreas Norrman [43], onde se categorizam as classes apresentadas na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 - Categorização dos tipos de produtos pelo seu volume [44]

Tipo	Volume (l)	Observações
Muito Pequenos	< 1 litro	
Pequenos	1 – 50 litros	
Médios	50 – 200 litros	
Grandes	> 200 litros	Suportados por paletes (EUR)
Outros	-	Não suportados por paletes

Além desta categorização, os produtos, no projeto em questão, devem ser ainda avaliados em termos de variabilidade, número de referências e rotatividade. Estas características podem determinar a escolha da tecnologia a utilizar. Destacam-se as seguintes proposições [12]:

- Quanto maior for a variedade de produtos pequenos, maior é a tendência para optar por armazenamento compacto robotizado (*AutoStores*), e tecnologias orientadas ao funcionamento *goods-to-person*, de forma a melhorar a utilização de espaço, e eficiência de armazenamento e recolha.
- Quanto maior for a quantidade de produtos pequenos, maior é a tendência para optar por sistemas de carrossel e dispensas (VLM), de modo a reduzir os custos e os tempos de processamento.
- Quanto maior for a quantidade e variedade de produtos de média e grande dimensão, maior é a tendência para soluções de armazenamento estático automatizado em estantes, permitindo maior eficácia, eficiência, e taxas de output elevadas para os vários tipos de produtos.

Nas secções seguintes é apresentada uma orientação para a escolha das tecnologias consoante o tipo de produto. Esta interpretação é algo subjetiva, visto que é muito difícil, e não existem, avaliações comparativas de qualidade entre as várias tecnologias e modelos disponíveis, no entanto pode servir como orientação rápida para projetistas ou futuras pesquisas. Esta interpretação foi baseada nos seguintes artigos e catálogos [1, 19, 20, 23, 27, 31, 32, 39, 41–44, 46, 48]:

4.2.7 Avaliação das Tecnologias Consoante os Tipos de Produtos

A avaliação realizada foi baseada em artigos e catálogos consultados, mediante alguma análise e juízo de cariz pessoal, pela sensibilidade obtida no tema ao longo da escrita da dissertação. O esforço em compilar e comparar as tecnologias oferece uma noção mais generalizada destas soluções, no entanto pode não corresponder a casos mais específicos de armazenamento, o que deve ser tido em consideração.

Os sinais de mais (+) representam a qualidade de resposta face às diferentes características. Quatro sinais (++++) representam uma resposta muito forte em termos de adequação à característica, e um sinal (+) significa fraca adequação face à característica.

4.2.7.1 Volumes Muito Pequenos (menor que 1 L)

Para este tipo de volumes existem diversas opções. Nas tabelas 4.3 e 4.4, apresentam-se as características das tecnologias mais apropriadas [1, 12, 22, 39–41].

Tabela 4.3 – Avaliação das tecnologias adequadas a volumes muito pequenos (< 1 L)

Tecnologia	Quantidade	Nº de Referências / Variedade	Taxa de Output	Densidade de Armazenamento
Carrosséis Horizontais	+++	++	+	++
Carrosséis Verticais Dispensas (VLM)	++	+++	++ *	+++
AutoStores	++	++++	++ *	+++
AGV's	++	++++	++++ *	+

Tabela 4.4 - Avaliação das tecnologias adequadas a volumes muito pequenos (< 1 L)

Tecnologia	Modularidade	Manutenção	Investimento
Carrosséis Horizontais	+	Pouca	Médio
Carrosséis Verticais Dispensas (VLM)	+++	Média	Elevado
AutoStores	++++	Média*	Elevado*
AGV's	++++	Elevada *	Elevado*

Nota: Um asterisco (*) significa dependência do número de robôs utilizados.

Resumindo a interpretação, os carrosséis horizontais são uma tecnologia mais antiga face às outras, desse modo oferecem uma boa opção em termos de investimento e custos operacionais, devido à pouca manutenção. Como são sistemas estáticos, o seu *layout* não pode ser alterado facilmente resultando numa densidade moderada, fraca modularidade, e taxa de output fixa e dependente da velocidade de rotação do modelo, contudo são bastante adequados para armazenar em quantidade.

Os carrosséis verticais e dispensas dinâmicas acabam por ser mais modulares e permitem um armazenamento com maior densidade que os carrosséis horizontais. Contudo, requerem um nível de investimento e manutenção mais elevada, devido a uma maior complexidade do sistema. São bastante mais adequados para armazenar uma elevada variedade de referências, e com capacidade para armazenar grandes quantidades dependendo do número de módulos utilizados. O seu funcionamento beneficia de uma boa taxa de *output* e *input*, e de elevada densidade, podendo rentabilizar o espaço disponível verticalmente.

Os *autostores*, são uma das tecnologias mais recentes e com maior nível de automação. A utilização de mais ou menos robôs no sistema, permite adaptar à taxa de output pretendida, além disso em caso de avaria de um robô, a substituição por outro é bastante simples, contudo este sistema acaba por requerer um nível de investimento mais elevado devido à forte componente tecnológica. São bastante bons no que toca à modularidade e densidade, além disso adequam-se bastante para armazenamento de muitos tipos de produtos e referências. Não se adequam tanto a armazenamento em quantidade devido à existência de opções menos dispendiosas para esse propósito.

O armazenamento em robôs e prateleiras móveis é geralmente utilizado em largas superfícies quando existe limitação vertical de armazenamento. Os AGV's permitem elevadas taxas de processamento, consoante o número de robôs utilizados e são bastante utilizados para servir encomendas detalhadas, levando produtos pequenos em prateleiras aos operadores. As suas maiores desvantagens acabam por ser o elevado investimento e manutenção, assim como uma fraca densidade de armazenamento.

É de referir que os compartimentos de carrosséis, dispensas (VLM) e AGV's suportam cargas bastante mais elevadas, por compartimento, que os *autostores*.

4.2.7.2 Volumes Pequenos (1 a 50 L)

Para este tipo de volumes podem ser utilizadas as tecnologias anteriores, e passa a ser viável o armazenamento em estantes para caixas (*mini-load*) tanto por transelevadores como com shuttles (Ver Tabela 4.5 e 4.6) [1, 22, 26, 30, 32, 33, 39–41, 43, 44, 47, 52, 53].

Tabela 4.5 - Avaliação das tecnologias adequadas a volumes pequenos (1 a 50 L)

Tecnologia	Quantidade	Nº de Referências / Variedade	Taxa de Output	Densidade de Armazenamento
Carrosséis Horizontais	+++	++	+	++
Carrosséis Verticais Dispensas (VLM)	++	+++	++ *	+++
AutoStores	++	++++	++ *	+++
AGV's (Prateleiras)	++	++++	++++ *	+
Estantes (Transelevador) Mini-Load	+++	++**	++ **	+++**
Estantes (Shuttles) Mini-Load	+++	++++	++++ *	++++**

Tabela 4.6 - Avaliação das tecnologias adequadas a volumes pequenos (1 a 50 L)

Tecnologia	Modularidade	Manutenção	Investimento
Carrosséis Horizontais	+	Pouca	Médio
Carrosséis Verticais Dispensas (VLM)	+++	Média	Elevado
AutoStores	++++	Média*	Elevado*
AGV's (Prateleiras)	++++	Elevada *	Elevado*
Estantes (Transelevador) Mini-Load	+	Elevada **	Elevado**
Estantes (Shuttles) Mini-Load	++	Elevada *	Muito Elevado*

Nota: Um asterisco (*) significa dependência do número de robôs utilizados. Dois asteriscos (**) significa dependência do tipo de profundidade (Única/Dupla/Compacto).

Para o armazenamento deste tipo de produtos, passam agora a ser consideradas as tecnologias de armazenamento automatizado em estantes para caixas (*mini-load*).

A utilização de estantes permite utilizar verticalmente espaços com dimensões muito elevadas, sendo mais adequados para negócios de larga escala, comparativamente com as alternativas anteriores. As variações de única, dupla ou multi-profundidade podem diminuir ou aumentar a densidade de armazenamento respetivamente. No caso de maior quantidade e menor variedade de produtos, deve -se optar pela opção de multi-profundidade ou compacto. No caso de maior variedade e menor quantidade de cada tipo de produto, opta-se normalmente pelas alternativas de profundidade única ou dupla. A taxa de *output* fica limitada à velocidade de funcionamento dos transelevadores utilizados, sendo que em caso de falha de um transelevador, o acesso a produtos dentro de um corredor fica bloqueado. No caso de necessidade de elevadas taxas de *output*, elevado número de referências e elevadas quantidades, devem ser analisadas as opções de armazenamento baseado em *shuttles*.

As restantes tecnologias já foram abordadas anteriormente. Ainda assim é de salientar que o estudo apresentado no artigo [12] ,indica uma tendência para a utilização de armazenamento estacionário, como, carrosséis, estantes e autostores.

4.2.7.3 Volumes Médios (50 a 200 L)

Os volumes médios são normalmente armazenados com sistemas automatizados em estantes. Podem ser feitos, dependendo das condições do projeto, utilizando caixas (*mini-load*) ou paletes. Além destes, é também possível proceder ao armazenamento em forma de *puzzle* com AGV's e paletes, em vez de prateleiras. O sistema de *puzzle* não tem um grande aproveitamento de espaço na vertical, por isso deve ser utilizado quando existem grandes superfícies e pouca altura disponível (Ver Tabelas 4.7 e 4.8) [1, 23, 25, 27, 30–32, 43, 44, 53].

Tabela 4.7 - Avaliação das tecnologias adequadas a volumes médios (50 a 200 L)

Tecnologia	Quantidade	Nº de Referências / Variedade	Taxa de Output	Densidade de Armazenamento
AGV's (Puzzle) Paletes	++	+++	+++ *	+
Estantes (Transelevador) Mini-Load	+++	++	++ *	+++**
Estantes (Shuttles) Mini-Load	+++	++++	++++ *	++++**
Estantes (Transelevador) Paletes	++++	++ **	++ **	+++**
Estantes (Shuttles) Paletes	++++	++++	+++ *	++++**

Tabela 4.8 - Avaliação das tecnologias adequadas a volumes médios (50 a 200 L)

Tecnologia	Modularidade	Manutenção	Investimento
AGV's (Puzzle) Paletes	+++	Média *	Elevado*
Estantes (Transelevador) Mini-Load	+	Elevada **	Elevado**
Estantes (Shuttles) Mini-Load	++	Elevada *	Muito Elevado*
Estantes (Transelevador) Paletes	+	Muito Elevada**	Muito Elevado**
Estantes (Shuttles) Paletes	++	Muito Elevada*	Muito Elevado*

Nota: Um asterisco (*) significa dependência do número de robôs utilizados. Dois asteriscos (**) significa dependência do tipo de profundidade (Única/Dupla/Compacto).

A escolha entre sistemas para caixas ou paletes, assim como o seu nível de automação, deve ser baseada no investimento disponível, capacidade de armazenamento, número de referências e as taxas de output necessárias. Além disso, podem ser instaladas diferentes tecnologias em diferentes partes do armazém, para se adaptar e otimizar o projeto da melhor forma aos requisitos pretendidos.

4.2.7.1 Volumes Grandes (maiores que 200 L em paletes)

Para este tipo de volumes avaliam-se apenas as tecnologias de armazenamento em paletes (Ver Tabelas 4.9 e 4.10) [1, 23, 25, 27, 30–32, 43, 44].

Tabela 4.9 - Avaliação das tecnologias adequadas a volumes grandes (> 200 L)

Tecnologia	Quantidade	Nº de Referências / Variedade	Taxa de Output	Densidade de Armazenamento
AGV's (Puzzle) Paletes	++	+++	+++ *	++
Estantes (Transelevador) Paletes	++++	++ **	++ **	+++**
Estantes (Shuttles) Paletes	++++	++++	++++ *	++++**

Tabela 4.10 - Avaliação das tecnologias adequadas a volumes grandes (> 200 L)

Tecnologia	Modularidade	Manutenção	Investimento
AGV's (Puzzle) Paletes	+++	Média *	Elevado*
Estantes (Transelevador) Paletes	+	Muito Elevada**	Muito Elevado**
Estantes (Shuttles) Paletes	++	Muito Elevada*	Muito Elevado*

Nota: Um asterisco (*) significa dependência do número de robôs utilizados. Dois asteriscos (**) significa dependência do tipo de profundidade (Única/Dupla/Compacto).

Como já foi referido anteriormente, os sistemas de armazenamento em forma de *puzzle*, têm um baixo nível de aproveitamento de espaço na vertical, sendo assim mais aconselhados para grandes superfícies. As tecnologias de armazenamento automatizado em estantes podem ser adaptadas à altura do armazém e ainda adaptadas nas restantes características. Podem-se, por exemplo, instalar diferentes modelos de transelevador em diferentes corredores, adequando as taxas de output necessárias aos diferentes produtos armazenados. Existe também, como descrito no capítulo 3, a possibilidade de utilizar menos corredores e transelevadores, possibilitando armazenamento mais compacto, contudo, mais adaptado a maior quantidade de menos referencias. O retorno de investimento das tecnologias de AS/RS em estantes é normalmente de 5 anos, desse modo, deve ser ponderado a alteração do mercado, ou a direção do negócio de modo a que o projeto seja adaptado às condições futuras. A utilização de *shuttles* contribui para uma maior independência dos equipamentos, visto que se pode trocar um robô avariado por outro, ou simplesmente eliminá-lo do sistema. Tal não acontece com os transelevadores, que bloqueiam totalmente o armazenamento e recolha de artigos numa determinada área. Além disso os sistemas com *shuttles* podem têm maior adaptabilidade, sendo mais fácil alterar o sistema conforme seja necessário.

No gráfico da Fig. 4.2 é apresentada uma análise entre algumas das tecnologias abordadas, comparando as opções, para as mesmas dimensões de armazém. Mostra, tal como já foi referido, as características de output e capacidade dos diversos sistemas. Contudo, é apenas um caso particular e não considera outras tecnologias como carrosséis, ou armazenamento compacto em estantes.

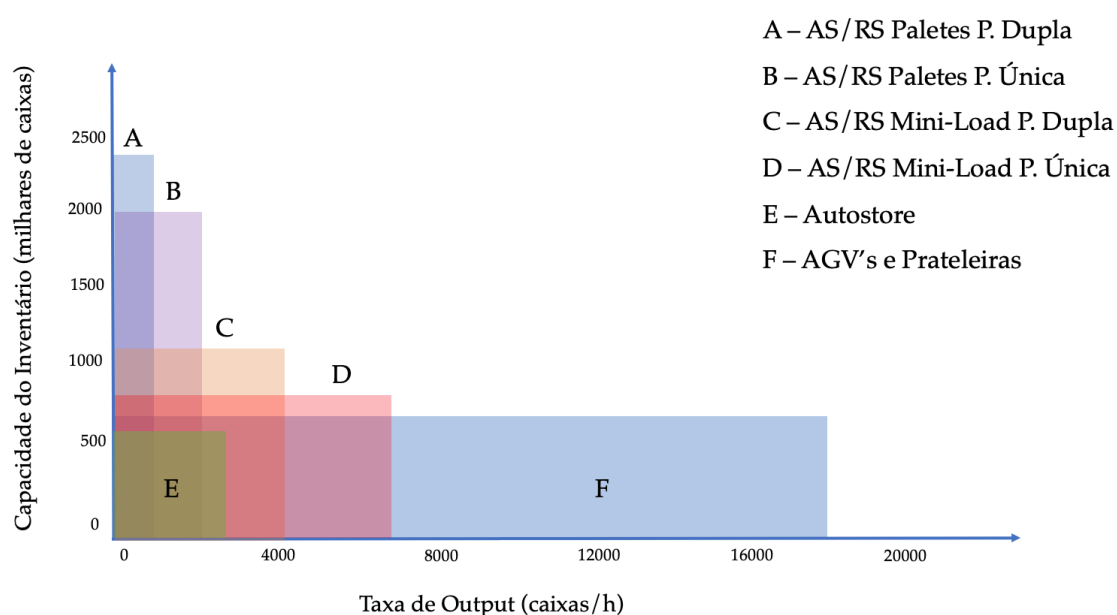


Figura 4.2 – Comparação da taxa de output e capacidade do inventário utilizando diferentes tecnologias de armazenamento no mesmo espaço disponível. (150m x 90m x 18m) (Adaptado de [32])

4.2.7.2 Outros Tipos de Produtos

Para esta secção consideram-se produtos cujo o armazenamento necessita de condições muito específicas, daí ainda não existirem práticas standardizadas de automação. Para contextualizar um pouco, estes casos podem ser vacinas, ou produtos químicos com determinadas condições de temperatura, armazenamento e transporte, ou por exemplo componentes de largas dimensões como pás de turbinas eólicas, ou partes de embarcações.

A implementação de tecnologias de automação está a ficar cada vez mais madura, mas é predominante em produtos mais pequenos. No entanto, a tendência indica que deverá ser adotada progressivamente em produtos maiores, onde ainda não é, muitas vezes, a mais apelativa em termos económicos [1, 9, 32, 43, 48].

4.2.8 Avaliação das Restrições

Esta fase deve determinar se certas tecnologias são viáveis ou não para o projeto. Os constrangimentos podem ser técnicos, de investimento, temporais, legais, éticos ou físicos.

Edouard A, et al. e Baker P, et al. [44, 47] afirmam que os projetistas mais experientes são importantes nesta fase do projeto, de forma a ter em conta os pormenores de cada projeto. As características do cliente passam por:

- Número de referências
- Dimensões dos artigos (menores e maiores)
- Peso dos artigos (menores e maiores)
- Número médio de encomendas
- Número médio de artigos por encomenda
- Dimensões médias das encomendas

Depois consideram-se os parâmetros relativos ao espaço selecionado para o sistema de armazenamento, como por exemplo:

- Geometria
- Área
- Altura
- Características e resistência do pavimento

É também necessário analisar as questões relativas às encomendas, como por exemplo, perfil de encomendas, padrões de entrada e saída de encomendas e custos operacionais [44, 47].

Do ponto de vista das tecnologias de automação mais concretamente, Adriane Turner [32] sugere as seguintes questões perante um novo projeto:

- Qual o aumento de velocidade necessário ao armazém?
- Será que a otimização de processos permite aumentar a velocidade, ou é realmente necessário implementar automação?
- Quais são as condições atuais de distribuição e fluidez de volumes?
- Quais são as necessidades em termos de inventário e taxa de output?
- Quais são as tecnologias mais adequadas à infraestrutura?
- Será que se pode direcionar o projeto para uma opção mais modular, de modo a ter maior adaptabilidade no futuro?

Apesar de alguma redundância, a contribuição de uma análise cuidada de todos estes aspetos, promove uma implementação mais facilitada e torna o projeto mais estável a longo prazo.

4.2.9 Análise Financeira

Deve ser efetuada uma análise dos custos totais das opções consideradas como viáveis até esta fase. Avaliam-se e comparam-se as opções, em termos de custo e benefício para os requisitos e funcionalidades propostas, considerando também os aspetos legais e regulamentação em vigor.

Existem diversos modelos de análise, alguns mais gerais e outros mais adequados ao projeto de armazéns. Estas ferramentas podem ser utilizadas diretamente pelos distribuidores tecnológicos, ou por serviços externos de consultoria.

A utilização de modelos de simulação permite considerar diferentes tipos de situações e testar a flexibilidade do armazém. Estes cenários incluem, diferentes previsões de crescimento, variações do tipo de encomendas ou qualidade de resposta a picos de procura [44, 47].

A decisão do tempo necessário para retorno de investimento acaba por ter um peso significativo nesta fase. Adriane Turner [32] resume alguns dos aspetos que podem influenciar o retorno de investimento:

- Precisão do Inventário
- Custo de Implementação
- Formação e Eficiência dos Operadores
- Custos de Manutenção
- Custo das Tecnologias de Armazenamento
- Custos de Espaço e Construção
- Custos de Software e Tecnologias de Digitalização

De qualquer forma, a análise financeira ultrapassa o âmbito desta dissertação, pelo que se deve recorrer a outros artigos ou especialistas nesta área, como distribuidores, fornecedores ou consultoras.

4.2.10 Escolha das Tecnologias e Implementação

A digitalização e a implementação de *softwares* de controlo e gestão (WCS e WMS, respetivamente) representa normalmente melhorias significativas na eficiência de processos dentro de um armazém. A adoção de tecnologias de armazenamento automatizado (AS/RS), implica geralmente a instalação destes sistemas digitais, permitindo maior precisão e controlo dos processos de armazenamento, assim como uma gestão de *stock* mais detalhada e eficiente.

É de referir que um projeto de armazém pode utilizar diferentes tecnologias para diferentes propósitos em diferentes postos, e não está condicionado apenas a uma tecnologia de armazenamento automatizado.

Nesta fase devem ser escolhidas exatamente as tecnologias a implementar e quais os modelos e características necessárias. A lista seguinte apresenta alguns aspetos relevantes [32, 44, 47, 48]:

- *Layout* dos Equipamentos
- Especificações dos Equipamentos (Dimensões, Velocidade, Peso Suportado)
- Tamanho e Profundidade das Estantes
- Número de Paletes e Caixas
- Tipos de Paletes e Caixas
- Número de Passadeiras
- Número de Veículos Autónomos (*Shuttles* ou AGV's)
- Número de Operadores
- Posição das Estações de Trabalho
- Medidas de Segurança
- Projeto de Manutenção

O aperfeiçoamento das características e opções deve também ter em consideração futuras alterações no sistema, aumentando a flexibilidade do mesmo no futuro. Todos estes aspetos devem ser considerados com prudência e aconselhamento de profissionais experientes na indústria.

Apesar da possibilidade de automação de muitos processos, o trabalho realizado por operadores continua a ser necessário, desta forma, deve existir um cuidado especial na participação, motivação, e formação dos trabalhadores envolvidos de modo a obter melhores resultados.

CONCLUSÃO

Esta dissertação apresenta uma visão geral das tendências recentes na área do armazenamento. Mais concretamente na utilização de tecnologias automatizadas. O caminho no sentido do conceito de *smart warehouse*, é bastante complexo e pode tomar duas direções. A direção da digitalização e a direção da automação. Na perspectiva digital, as tecnologias mais mediáticas como, *IoT*, *RFID*, Inteligência Artificial e Computação em *Cloud*, tomam ainda poucas proporções, sendo que os softwares de gestão, controlo, e monitorização de processos, (WMS e WCS) constituem a base de formação.

Na perspectiva da automação, existe uma grande oferta de tecnologias. O elevado número de opções e modelos disponíveis dificulta uma análise generalizada das mesmas. Estas soluções oferecem vantagens maioritariamente relacionadas com, aproveitamento de espaço, redução de custos operacionais, e disponibilidade de funcionamento 24 horas por dia. Além disso, permitem maior escalabilidade e flexibilidade nas taxas de *output*, que são os fatores predominantes em ambientes direcionados ao comércio *online*. A automação de processos de armazenamento requer alguma ponderação na escolha de soluções, visto que, devido ao nível de investimento, a sustentabilidade dos projetos necessita de algum planeamento a longo prazo. Considerando a elevada competitividade dos mercados nos dias de hoje, as empresas vêm-se pressionadas a adotar novas tecnologias de forma a otimizar as suas cadeias de distribuição. Contudo, existe ainda pouca clareza nas orientações a adotar perante este novo paradigma. Assim sendo, torna-se crucial desenvolver ferramentas que apoiem a tomada de decisões, de modo a encontrar a solução mais adequada para os armazéns em questão.

Neste documento são descritas diferentes soluções de armazenamento automatizado disponíveis na atualidade, são explicados os atributos e o funcionamento das diversas variantes analisadas dentro da mesma categoria. A metodologia proposta, visa a concentrar os aspetos mais relevantes a ter em consideração, e a proporcionar um método claro e objetivo a adotar nas diferentes fases de desenvolvimento do sistema. Os fatores contextuais de cada caso, assim como a avaliação de restrições, têm um peso considerável na tomada de decisões. Devem ser avaliados os objetivos concretos, e considerados os aspetos relacionados com a flexibilidade e modularidade, de modo a que o sistema desenvolvido seja o mais adaptável a condições futuras. Foi observado que empresas ou centros de distribuição mais direcionados para o comércio *online*, têm maior tendência a adotar o caminho da digitalização. Enquanto que distribuidores com cadeias mais complexas tendem a seguir o caminho da automação de processos.

A automação está a ser adotada na maior parte em armazenamento de produtos pequenos, contudo, a literatura indica que a adoção destas tecnologias em produtos de maiores dimensões acontecerá gradualmente. Foram então categorizados os tipos de produtos pelo seu volume, e feita uma análise das tecnologias automatizadas mais adequadas a cada uma das categorias. A avaliação das tecnologias foi realizada através de um esforço, tomado no sentido da generalização das características de várias variantes, de modo a oferecer uma visão mais

ampla das possibilidades. A comparação das tecnologias, permite uma orientação sobre o grau adequabilidade de cada uma a diferentes propósitos. Foram avaliados os seguintes aspetos: capacidade de armazenamento, variedade de referências, taxa de *output*, densidade de armazenamento, modularidade, necessidade de manutenção, e nível de investimento. Além destes fatores, foram também observadas as tendências na escolha das tecnologias nos próximos cinco anos, possibilitando alguma orientação a médio prazo.

De modo implementar a melhor solução, os sistemas podem ser incorporados com diferentes tecnologias, para diferentes propósitos, e diferentes produtos, em diferentes zonas de processamento.

Em conclusão, o ritmo de desenvolvimento e adoção de tecnologias no sentido da automatização de armazéns vai aumentar nos próximos anos. A elaboração desta dissertação torna-se relevante tanto para futura investigação académica, como para projetistas e empresas que planeiem implementar novas tecnologias nos seus armazéns, possibilitando assim uma orientação adequada, de acordo com as novas tendências da indústria 4.0.

BIBLIOGRAFIJA

- [1] Azadeh K, De Koster R, Roy D. *Robotized Warehouse Systems: Developments and Research Opportunities*.
- [2] Li Da Xu, Eric L. Industry 4.0: state of the art and future trends. *Li Da Xu, Eric L Xu & Ling Li (2018) Industry 40: state of the art and future trends, International Journal of Production Research, 56:8, 2941-2962, DOI: 101080/0020754320181444806* .
- [3] van Geest M, Tekinerdogan B, Catal C. Design of a reference architecture for developing smart warehouses in industry 4.0. *Comput Ind*; 124. Epub ahead of print 1 January 2021. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103343.
- [4] Frank AG, Dalenogare LS, Ayala NF. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *Int J Prod Econ* 2019; 210: 15–26.
- [5] Liao Y, Deschamps F, Loures E de FR, et al. Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research* 2017; 55: 3609–3629.
- [6] Ghadge A, Er Kara M, Moradlou H, et al. The impact of Industry 4.0 implementation on supply chains. *Journal of Manufacturing Technology Management* 2020; 31: 669–686.
- [7] Dalenogare LS, Benitez GB, Ayala NF, et al. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *Int J Prod Econ* 2018; 204: 383–394.
- [8] de Koster RBM. Automated and Robotic Warehouses: Developments and Research Opportunities. *Logistics and Transport* 2018; 38: 33.
- [9] Kembro J, Norrman A. Exploring trends, implications and challenges for logistics information systems in omni-channels: Swedish retailers' perception. *International Journal of Retail and Distribution Management* 2019; 47: 384–411.
- [10] Cimini C, Lagorio A, Romero D, et al. Smart logistics and the logistics operator 4.0. In: *IFAC-PapersOnLine*. Elsevier B.V., 2020, pp. 10615–10620.
- [11] Buntak K, Kovačić M, Mutavdžija M. Internet of things and smart warehouses as the future of logistics. *Tehnički glasnik* 2019; 13: 248–253.

- [12] Kembro J, Norrman A. The transformation from manual to smart warehousing: an exploratory study with Swedish retailers. *The International Journal of Logistics Management* 2022; 33: 107–135.
- [13] Hozdić E. *SMART FACTORY FOR INDUSTRY 4.0: A REVIEW*. 2015.
- [14] van Geest M, Tekinerdogan B, Catal C. Smart warehouses: Rationale, challenges and solution directions. *Applied Sciences (Switzerland)*; 12. Epub ahead of print 1 January 2022. DOI: 10.3390/app12010219.
- [15] De Koster RBM, Johnson AL, Roy D. Warehouse design and management. *International Journal of Production Research* 2017; 55: 6327–6330.
- [16] Frank AG, Dalenogare LS, Ayala NF. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *Int J Prod Econ* 2019; 210: 15–26.
- [17] Buntak K, Kovačić M, Mutavdžija M. Internet of things and smart warehouses as the future of logistics. *Tehnički glasnik* 2019; 13: 248–253.
- [18] Ghadge A, Er Kara M, Moradlou H, et al. The impact of Industry 4.0 implementation on supply chains. *Journal of Manufacturing Technology Management* 2020; 31: 669–686.
- [19] Swisslog: Robotic & Data-Driven Solutions | KUKA AG, <https://www.swisslog.com/fr-fr/about-swisslog/our-offering> (accessed 28 March 2023).
- [20] Exyz AS/RS Pallet Crane | Schaefer Shelving, https://www.schaefer shelving.com/t-warehouse_pallets_as_rs_pallet_crane.aspx (accessed 31 March 2023).
- [21] *Soluciones de almacenaje para paletas*, www.mecalux.es (accessed 23 March 2023).
- [22] Lorson F, Fügener A, Hübner A. New team mates in the warehouse: Human interactions with automated and robotized systems. *IISE Trans* 2022; 1–18.
- [23] Mini-Load Systems - Interlake Mecalux, <https://www.interlakemecalux.com/automated-storage-retrieval-systems-asrs/arsr-boxes-miniload> (accessed 28 March 2023).
- [24] Kees Jan Roodbergen, Iris F.A., Vis. A survey of literature on automated storage and retrieval systems | Elsevier Enhanced Reader. *Eur J Oper Res* 2009; Volume 194: 343–362.
- [25] Yu Y, De Koster RBM, Guo X. Class-Based Storage with a Finite Number of Items: Using More Classes is not Always Better. *Prod Oper Manag* 2015; 24: 1235–1247.

- [26] Adriane Turner B, Graves S, Supervisor Abraham Seigel Professor of Management TJ, et al. *Evaluation of Automated Storage and Retrieval in a Distribution Center*. 2020.
- [27] Single, Double-Deep And Multiple-Deep AS/RS Systems - Westfalia Technologies, Inc., <https://www.westfaliausa.com/products/automated-storage-retrieval-systems/storage-density> (accessed 28 March 2023).
- [28] Pallet Conveyor Systems | Automated warehouses - Mecalux.com, <https://www.mecalux.com/automated-warehouses-for-pallets/pallet-conveyor-systems> (accessed 29 March 2023).
- [29] De Koster RBM. LOGISTIC INFRASTRUCTURE Automated and Robotic Warehouses: Developments... Automated and Robotic Warehouses: Developments and Research Opportunities. DOI: 10.26411/83-1734-2015-2-38-4-18.
- [30] De Koster RBM, Le-Duc T, Yugang Y. Optimal storage rack design for a 3-dimensional compact AS/RS. *Int J Prod Res* 2008; 46: 1495–1514.
- [31] Interlake Storage Racking w/ Pallet Shuttle System, 2019- 720 Pallets Spaces, 3 Pallet Shuttles - Revelation Machinery, <https://revelationmachinery.com/product/interlake-storage-racking-w-pallet-shuttle-system-2019-720-pallets-spaces-3-pallet-shuttles/> (accessed 28 March 2023).
- [32] Adriane Turner B, Graves S, Supervisor Abraham Seigel Professor of Management TJ, et al. *Evaluation of Automated Storage and Retrieval in a Distribution Center*. 2020.
- [33] Malmborg CJ. Design optimization models for storage and retrieval systems using rail guided vehicles. *Appl Math Model* 2003; 27: 929–941.
- [34] Yetkin Ekren B. Graph-based solution for performance evaluation of shuttle-based storage and retrieval system. *Int J Prod Res* 2017; 55: 6516–6526.
- [35] Gue KR, Furmans K, Seibold Z, et al. GridStore: A puzzle-based storage system with decentralized control. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 2014; 11: 429–438.
- [36] D’Antonio G, Maddis M De, Bedolla JS, et al. Analytical models for the evaluation of deep-lane autonomous vehicle storage and retrieval system performance. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2018; 94: 1811–1824.
- [37] Gue KR, Kim BS. *Puzzle-Based Storage Systems*. 2007.
- [38] Issaoui Y, Khiat A, Bahnasse A, et al. Toward Smart Logistics: Engineering Insights and Emerging Trends. *Archives of Computational Methods in Engineering* 2021; 28: 3183–3210.

- [39] Avnet Logistics opts for AutoStore by Swisslog | Manufacturing & Logistics IT Magazine, <https://www.logisticsit.com/articles/2010/08/04/5140-avnet-logistics-opts-for-autostore-by> (accessed 29 March 2023).
- [40] Horizontal Carousel Modules - Automated Storage System | Modula, <https://modula.us/storage-solutions/modula-horizontal-carousel/> (accessed 29 March 2023).
- [41] Hänel Rotomat® Industrial Vertical Carousels » Mazzella Companies, <https://www.mazzellacompanies.com/solutions/product/hanel-rotomat-industrial-vertical-carousels/> (accessed 29 March 2023).
- [42] Vertical Lift Modules (VLM) - Automated Storage System | Modula, <https://modula.us/storage-solutions/vertical-lift-modules/> (accessed 29 March 2023).
- [43] Kembro J, Norrman A. The transformation from manual to smart warehousing: an exploratory study with Swedish retailers. *International Journal of Logistics Management* 2022; 33: 107–135.
- [44] Edouard A, Sallez Y, Fortineau V, et al. Automated Storage and Retrieval Systems: An Attractive Solution for an Urban Warehouse's Sustainable Development. *Sustainability (Switzerland)*; 14. Epub ahead of print 1 August 2022. DOI: 10.3390/su14159518.
- [45] Flooring Panels for AGV and AMR Traffic - ResinDek, <https://www.resindek.com/solutions/traffic/mobile-robot-flooring-overview> (accessed 29 March 2023).
- [46] ProMove Automated Pallet Conveying System - Swisslog Transport Solutions - Swisslog, <https://www.swisslog.com/en-gb/products-systems-solutions/transport-conveyor-systems/promove-pallet-conveyor> (accessed 29 March 2023).
- [47] Baker P, Canessa M. Warehouse design: A structured approach. *Eur J Oper Res* 2009; 193: 425–436.
- [48] Mecalux Catalog. *Automated warehouses*, https://mecaluxpt.cdnwm.com/documents/20128/2758610/Catalog++4++Armazens-automaticos++pt_PT.pdf/e116df8a-4107-d5a2-b5f6-3dd86f4a403a?t=1673941325846 (2019, accessed 23 January 2023).
- [49] Bauer C, Dey AK. Considering context in the design of intelligent systems: Current practices and suggestions for improvement. In: *Journal of Systems and Software*. Elsevier Inc., 2016, pp. 26–47.

- [50] van Geest M, Tekinerdogan B, Catal C. Design of a reference architecture for developing smart warehouses in industry 4.0. *Comput Ind*; 124. Epub ahead of print 1 January 2021. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103343.
- [51] Ramtin F, Pazour JA. Product allocation problem for an AS/RS with multiple in-the-aisle pick positions. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)* 2015; 47: 1379–1396.
- [52] Baker P, Halim Z. An exploration of warehouse automation implementations: Cost, service and flexibility issues. *Supply Chain Management* 2007; 12: 129–138.
- [53] Marchet G, Melacini M, Perotti S, et al. Development of a framework for the design of autonomous vehicle storage and retrieval systems. *Int J Prod Res* 2013; 51: 4365–4387.



ANTÓNIO JORDÃO

CONTRIBUTO PARA A SELEÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS