



Desenvolvimento de uma Fábrica de Aprendizagem para a Indústria 5.0 baseada em Open Design

RITA MIGUEL AMARAL

outubro de 2024

Desenvolvimento de uma Fábrica de Aprendizagem para a Indústria 5.0 baseada em Open Design

Rita Miguel Amaral

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Gestão Industrial**

Orientador: Hélio Cristiano Gomes Alves de Castro

Co-orientador: Filipe Alexandre de Sousa Pereira

Júri:

Presidente do júri: António Gonçalves Magalhães, Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Politécnico do Porto

Vogais: Cátia Filipa Veiga Alves, Professor Adjunto, Instituto Politécnico do Cávado e Ave |
Hélio Cristiano Gomes Alves de Castro, Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Politécnico do Porto

Porto, setembro 2024

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu sincero agradecimento ao Professor Engenheiro Hélio Castro, meu orientador, e ao Professor Engenheiro Filipe Pereira, meu coorientador, pela orientação, apoio e disponibilidade ao longo de todo este trabalho.

Aos meus amigos, que me acompanharam ao longo destes cinco anos de estudo, agradeço pelo apoio constante, pela amizade e pelo companheirismo.

À minha Mãe, ao meu Pai, à Marta, ao Dinis, à minha Tia Marta e a toda a restante família, o meu mais profundo obrigado pelo apoio incondicional e por estarem sempre ao meu lado, tanto neste projeto como ao longo da vida.

Por fim, um especial agradecimento ao Diogo, por toda a paciência, motivação e auxílio nas horas de maior azáfama. O teu apoio constante foi imprescindível para que este trabalho fosse possível.

Resumo

O objetivo desta dissertação é propor a implementação da Mini LF 5.0, uma fábrica de aprendizagem, no laboratório OSLab4Man, localizado no ISEP. Este projeto, orientado pelos princípios da Indústria 5.0, *Open Design* e *Open Source*, visa desenvolver um ambiente de formação inovador que permita aos alunos adquirir competências práticas alinhadas com os requisitos da nova era industrial. A Mini LF 5.0 é projetada para integrar tecnologias emergentes e colocar o ser humano no centro do processo produtivo, destacando-se pela sua customização, resiliência e sustentabilidade. A metodologia utilizada para a realização deste trabalho baseia-se na abordagem da Ciência do *Design*, conhecida como *Design Science Research*. Esta metodologia inclui a identificação do problema, definição dos objetivos, desenvolvimento e avaliação de artefactos e a reflexão e iteração dos resultados. A *Design Science Research* foi escolhida para permitir a criação e avaliação de soluções tangíveis que resolvam problemas práticos e relevantes na área de Engenharia. Os métodos incluíram uma análise detalhada da literatura sobre *Learning Factories*, Indústria 5.0, Sistemas Ciberfísicos e *Open Design*, e a identificação de lacunas nas abordagens existentes. A partir daí, foi desenvolvido o projeto da Mini LF 5.0, focado na implementação e integração de componentes físicos e computacionais. Os resultados mostram que a Mini LF 5.0 não só se alinha com os objetivos estabelecidos, como também demonstra viabilidade técnica e financeira, com um custo de implementação de 511€, cerca de 20% do valor total que seria necessário se o projeto não seguisse as diretrizes de *open design*, sustentabilidade e reutilização de materiais e equipamentos. A utilização de soluções *low cost* e *open source* garante a acessibilidade, a sustentabilidade e a replicabilidade do projeto, promovendo uma abordagem inovadora e colaborativa na formação de futuros profissionais.

Palavras-Chave: Fábrica de Aprendizagem, Indústria 5.0, *Open Design*, *Open Source*, Sistema Ciberfísico.

Abstract

The aim of this dissertation is to propose the implementation of Mini LF 5.0, a learning factory, in the OSLab4Man laboratory located at ISEP. This project, guided by the principles of Industry 5.0, *Open Design* and *Open Source*, aims to develop an innovative training environment that allows students to acquire practical skills in line with the requirements of the new industrial era. Mini LF 5.0 is designed to integrate emerging technologies and place the human being at the centre of the production process, standing out for its customisation, resilience and sustainability. The methodology used to carry out this work is based on *Design Science Research*. This methodology includes identifying the problem, defining the objectives, developing and evaluating artefacts and reflecting on and iterating the results. *Design Science Research* was chosen to enable the creation and evaluation of tangible solutions that solve practical and relevant problems in the field of Engineering. The methods included a detailed analysis of the literature on *Learning Factories*, Industry 5.0, Cyber-Physical Systems and *Open Design*, and the identification of gaps in existing approaches. From there, the Mini LF 5.0 project was developed, focussing on the implementation and integration of physical and computational components. The results show that Mini LF 5.0 is not only in line with the established objectives, but also demonstrates technical and financial viability, with an implementation cost of 511€, around 20 per cent of the total amount that would be needed if the project did not follow the guidelines of *open design*, sustainability and the reuse of materials and equipment. The use of *low-cost* and *open source* solutions guarantees the accessibility, sustainability and replicability of the project, promoting an innovative and collaborative approach to training future professionals.

KEYWORDS: Learning Factory, Industry 5.0, Open Design, Open Source, Cyber Physical System

Índice

Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiii
Acrónimos e Símbolos.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodologia	2
1.4. Estrutura.....	3
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Indústria 5.0	5
2.1.1. Conceitos e diferentes perspetivas.....	6
2.1.2. Revoluções da Indústria	7
2.1.3. Implementação da I5.0	9
2.1.4. Desafios e futuro da I5.0	11
2.2. Sistemas Ciberfísicos	12
2.2.1. Conceitos e Fundamentos dos Sistemas Ciberfísicos	12
2.2.2. Classificação e Espectro de Definições de CPS	14
2.2.3. Aplicações dos CPS.....	16
2.2.4. Desafios e Perspetivas Futuras dos CPS.....	18
2.3. <i>Open Design</i>	20
2.3.1. <i>Openness</i>	21
2.3.2. <i>Open Innovation</i>	21
2.3.3. <i>Open Source</i>	23
2.3.4. <i>Open Production</i>	23
2.4. <i>Fábrica de Aprendizagem</i>	24
2.4.1. <i>Fábrica de Aprendizagem</i> : Origem	25
2.4.2. <i>Fábrica de Aprendizagem</i> : Morfologia.....	27
2.4.3. <i>Fábrica de Aprendizagem</i> : Propósitos	30
2.5. Análise crítica da revisão bibliográfica	35
3. Métodos e Aplicação.....	37
3.1. <i>Análise das Fábricas de Aprendizagem</i>	38
3.1.1. Exemplos de aplicação	38
3.1.2. Limitações das <i>Fábricas de Aprendizagem</i> da I4.0	49
3.2. Implementação da LF 5.0	50
3.2.1. Interação Homem-Homem	54

3.2.2. Interação Homem-Máquina.....	56
3.2.3. Sustentabilidade	59
3.2.4. Customização	61
3.2.5. Comunicação Avançada	63
3.2.6. Resiliência	66
3.2.7. Flexibilidade	67
3.3. Proposta da Mini LF 5.0 no OSLab4Man	69
3.3.1. Descrição da Mini LF 5.0 no OSLab4Man.....	70
3.3.2. Análise do Laboratório OSLab4Man atual	72
3.3.3. Produto a Desenvolver	77
3.3.4. Equipamentos e Tecnologias Propostas	80
3.3.5. Estrutura da Mini LF 5.0.....	83
3.3.6. Orçamento e Propostas Alternativas.....	92
3.3.7. Propostas de Melhoria e Sustentabilidade	94
4. Resultados e Discussão	97
4.1. Componentes Físicos e Computacionais Adotados	97
4.2. Viabilidade Financeira	98
5. Conclusão	101
5.1. Conclusões finais.....	101
5.2. Limitações e trabalhos futuros.....	102
Referências.....	103
Declaração de Integridade	109
Anexo A	111
Anexo B	115
Anexo C	119
Anexo D.....	123
Anexo E.....	127
Anexo F.....	131
Anexo G	135

Lista de Figuras

Figura 1 - Artigos sobre I5.0 publicados no Web of Science	5
Figura 2 - Pilares da Indústria 5.0. Adaptado de Lique Wang [14]	6
Figura 3 - Evolução da Indústria. Adaptado de: [19]	8
Figura 4 - Arquitetura de um CPS. Fonte: [30]	13
Figura 5 - Espectro de modelos de CPS. Fonte: [26]	14
Figura 6 - Domínio linear do espectro de modelos de CPS. Fonte:[26]	15
Figura 7 - Domínio dinâmico do espectro de modelos de CPS. Fonte: [26]	16
Figura 8 - Aplicações de CPS's. Fonte: [37]	18
Figura 9 - <i>Open Design</i> conceitos relativos. Fonte:[45]	20
Figura 10 - Inovação fechada vs. Inovação aberta (OI). Fonte: [50]	22
Figura 11 - Enquadramento teórico de <i>Open Innovation</i> . Fonte: [52]	22
Figura 12 - Processo de criação de um produto em OP. Fonte: [57]	24
Figura 13 – Principais características de uma <i>Fábrica de Aprendizagem</i> . Fonte: [60].	25
Figura 14 - Evolução do número de documentos publicados no Google Scholar relacionados com <i>Fábricas de Aprendizagem</i> . Fonte:[61].	26
Figura 15 – 7 Dimensões de uma fábrica de aprendizagem.	27
Figura 16 – Os 3 propósitos das fábricas de aprendizagem.....	31
Figura 17 – <i>LF's</i> como facilitadores de pesquisa de acordo com Seifermann e outros [71]. Adaptado de [2].	34
Figura 18 - Metodologia DSR	37
Figura 19 - Local e ano de implementação das <i>LF's</i> globais. Fonte: Adaptado de: [72]	39
Figura 20 – Estação MPS Festo, Sistema MPS Festo. Fonte: [73].	41
Figura 21 - iCIM, CP Factory. Fonte: [2].	42
Figura 22 - Produtos <i>LF's</i> Festo Didactic: (1.)1ª MPS, (2.)4ª MPS, (3.) Kit Secretária, (4.) Dispositivo eletrônico. Fonte: Adaptado de [2].	42
Figura 23 - Processos inerentes da <i>Learning Factory for Innovation, Manufacturing and Cooperation</i> . Fonte: Adaptado de [75].	44
Figura 24 -Exemplos de produtos fabricados na <i>Learning Factory for Innovation, Manufacturing and Cooperation</i> . Fonte: [2].	45
Figura 25 - Avaliação da fábrica de aprendizagem da Universidade de Heilbronn. Fonte: [75].	46
Figura 26 - Modelo da TU PF: Inter-relação entre Fábrica Piloto, Fábrica de Demonstração e Fábrica de Aprendizagem. Fonte: Adaptado de [2], [76].	48
Figura 27 - Tecnologias e equipamentos necessários para integrar a Interação H-H.....	55
Figura 28 - Tecnologias e equipamentos necessários para integrar a Interação H-M.....	58
Figura 29 - Tecnologias e equipamentos necessários para integrar a Sustentabilidade.	60
Figura 30 - Tecnologias e equipamentos necessários para integrar a customização.	63
Figura 31 - Tecnologias e equipamentos necessários para integrar a Comunicação Avançada.....	65
Figura 32 - Tecnologias e equipamentos necessários para integrar a Resiliência.	67
Figura 33 - Tecnologias e equipamentos necessários para integrar a Flexibilidade.....	69

Figura 34 - Implantação geográfica do Edifício F do DEM. Edifício F, DEM, ISEP.....	70
Figura 35 - Principais objetivos do OSLab4Man.....	73
Figura 36 - Arquitetura proposta do OSLab4Man. Fonte:[92]......	73
Figura 37 - Modelo representativo do OSLab4Man. 1) Braço Robótico, 2) Fresadora CNC, 3) Tapete transportador, 4) Impressora 3D. Fonte: [91].	76
Figura 38 - Requisitos para a Seleção do Produto a desenvolver	80
Figura 39 - <i>Cloud</i> da Mini LF 5.0 e respetivos componentes.	85
Figura 40 - Sistema de Informação e Controlo da Mini LF 5.0 e respetivos componentes.	85
Figura 41 - Componentes físicos do Sistema de Informação e Controlo: a) Raspberry Pi 400, b) Controllino.	86
Figura 42 - Sistema de Produção da Mini LF 5.0 e respetivos componentes.	87
Figura 43 - Componentes físicos do Sistema de Produção: a) Impressora 3D BeeveryCreative B2X300, b) Braço robótico BCN3D MOVEO, c) Fresadora CNC 3018 PRO, d) Tapete transportador.....	88
Figura 44 - Sistema de Automação da Mini LF 5.0 e respetivos componentes.	89
Figura 45 - Componentes físicos do Sistema de Automação: a) Motor de passo, b) Servomotor, c) Controllino, d) DHT22, e) MH-Z19, f) Endstop V1.2, g) Shelly 1PM.	90
Figura 46 - Sistema de Comunicação e Vigilância da Mini LF 5.0 e respetivos componentes. ..	90
Figura 47 - Componentes físicos do Sistema de Comunicação e Vigilância: a) Monitor Asus VS197DE, b) Câmara ArduCAM OV9782, c) Auscultadores Tacens AH118 Headset, d) Google Assistant, e) Raspberry Pi Camera Module v2, f) Nreal Light, g) Oculus Quest 2.	91
Figura 48 - Estrutura global da Mini LF 5.0	92
Figura 49 - Objetivos e resultados finais do projeto.....	97
Figura 50 - Gráfico dos Orçamentos dos Projetos	99

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Aplicações da I5.0. Fontes: [20], [21], [22].....	9
Tabela 2 - Aplicações de CPS.....	16
Tabela 3 - Diferentes modelos de classificação de LF.....	27
Tabela 4 - Morfologia de uma LF segundo o modelo descritivo multidimensional do CWG CIRP. Fonte: [2].....	38
Tabela 5 - Nomenclatura, local e ano de implementação e propósitos das LF's a analisar neste documento. Fonte: [2],[72].....	39
Tabela 6 - Dados da LF: MPS, iCIM, CP Factory. Fonte: [2]	40
Tabela 7 - Morfologias das LF's Festo Didatic de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG. Fonte: Adaptado de [2].....	43
Tabela 8 - Dados da <i>Learning Factory for Innovation, Manufacturing and Cooperation</i>	44
Tabela 9 - Morfologias da <i>Learning Factory for Innovation, Manufacturing and Cooperation</i> de Heilbronn de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG.	46
Tabela 10 - Dados da TU Wien Pilot Factory Industry 4.0.....	47
Tabela 11 - Morfologias da TU Wien Pilot Factory Industry 4.0 de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG.	48
Tabela 12 - Quadro síntese das limitações das LF's da I4.0 e respectivas abordagens pala a I5.0.	50
Tabela 13 - Tecnologias e características das LF's analisadas. Fonte: [2], [77].....	53
Tabela 14 – Vantagens, Métodos de integração e Exemplos de Tecnologias e Equipamentos necessários para implementar a Interação H-H na LF 5.0.	56
Tabela 15 - Vantagens, Métodos de integração e Exemplos de Tecnologias e Equipamentos necessários para implementar a Interação H-M na LF 5.0	58
Tabela 16 - Vantagens, Métodos de integração e Exemplos de Tecnologias e Equipamentos necessários para implementar a Sustentabilidade na LF 5.0.....	61
Tabela 17 - Vantagens, Métodos de integração e Exemplos de Tecnologias e Equipamentos necessários para implementar a customização na LF 5.0.....	63
Tabela 18 - Vantagens, Métodos de integração e Exemplos de Tecnologias e Equipamentos necessários para implementar a Comunicação Avançada na LF 5.0	65
Tabela 19 - Vantagens, Métodos de integração e Exemplos de Tecnologias e Equipamentos necessários para implementar a Resiliência na LF 5.0.....	67
Tabela 20 - Vantagens, Métodos de integração e Exemplos de Tecnologias e Equipamentos necessários para implementar a flexibilidade na LF 5.0	69
Tabela 21 - Dados da Mini LF 5.0 no OSLab4Man.....	72
Tabela 22 - Lista de materiais dos componentes físicos do OSLab4Man. Adaptado de: [91]. ..	75
Tabela 23 - Contribuição do OSLab4Man como ferramenta educativa para a sustentabilidade relativamente aos 17 ODS. Adaptado de: [95]	77
Tabela 24 - Lista de materiais dos componentes físicos da Mini LF 5.0.	83
Tabela 25 - Orçamento final da Mini LF 5.0 e propostas alternativas.	93

Tabela 26 - Morfologia da Mini LF 5.0 de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG CIRP.	95
Tabela 27 - Componentes físicos e computacionais da Mini LF 5.0	97
Tabela 28 - Requisitos da Mini LF 5.0 concluídos.	101

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
AR	Realidade aumentada
AWS	<i>Amazon Web Services</i>
CAD	<i>Computer aided design</i>
CAM	<i>Computer aided manufacturing</i>
CE	Comissão Europeia
CIM	<i>Computer-Integrated Manufacturing</i>
CNC	Controlo Numérico Computorizado
CPPS	Sistemas de Produção Ciberfísicos
CPS	Sistemas Ciberfísicos
CPS-AMS	Sistemas de Produção Aumentados
CWG	Collaborative Working-Group
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DSR	<i>Design Science Research</i> (Ciência do Design)
ERP	Planeamento de Recursos Empresariais
EUA	Estados Unidos da América
LF	<i>Learning Factory</i> (Fábrica de Aprendizagem)
I4.0	Indústria 4.0
I5.0	Indústria 5.0
IA	Inteligência Artificial
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
IELF	<i>Initiative on European Learning Factories</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JADE	<i>Java Agent Development</i>
MAS	Sistemas Multiagentes
MPS	Sistema de Produção Modular
NIL	<i>Network of Innovative Learning Factories</i>
NSF	<i>National Science Foundation</i>
OD	<i>Open Design</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OI	<i>Open Innovation</i>

OP	<i>Open Production</i>
OS	<i>Open Source</i>
OSLab4Man	<i>Open Science Lab for Manufacturing</i>
PLC	Controladores Lógicos Programáveis
PLM	<i>Product lifecycle management</i>
PMEs	Pequenas e médias empresas
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
SAP	<i>Systems, Applications and Products in Data processing</i>
STL	<i>StereoLithography</i>
TIC	Tecnologias da informação e comunicação
VANT	Veículos Aéreos Não Tripulados
VR	Realidade virtual
WSAN	<i>Wireless Sensor-Actuator Networks</i>

1. Introdução

Neste capítulo introdutório é apresentada a contextualização do tema, são estabelecidos os objetivos principais do trabalho, seguidos pela descrição da metodologia adotada para a proposta de implementação da Mini LF 5.0 no ISEP. Finalmente, é apresentada uma visão geral da estrutura do documento, fornecendo uma compreensão clara dos conteúdos abordados nos capítulos subsequentes.

1.1. Contextualização

Este trabalho surge da necessidade de evolução contínua nos métodos de ensino e formação para a indústria, acompanhando as mudanças tecnológicas e sociais que caracterizam a transição para a Indústria 5.0. Diferente das abordagens anteriores, a Indústria 5.0 coloca o ser humano no centro das operações, promovendo a customização, resiliência, sustentabilidade e uma interação mais harmoniosa entre o homem e a máquina, através dos Sistemas Ciberfísicos (CPS) e outras tecnologias avançadas [1].

Neste contexto, as Fábricas de Aprendizagem (LF) têm-se afirmado como plataformas educativas essenciais, que integram o conhecimento teórico com a prática industrial em ambientes controlados [2]. A Mini LF 5.0, proposta para o ISEP, visa proporcionar um ambiente de formação alinhado com as exigências da Indústria 5.0, promovendo inovação através de princípios como o *Open Design* e a utilização de ferramentas *open source*, que permitem uma abordagem colaborativa, acessível e sustentável [3]. Este projeto pretende, assim, capacitar os futuros profissionais com as habilidades necessárias para enfrentar os desafios da era digital, enquanto reforça a importância de soluções tecnológicas de baixo custo e replicáveis.

Este trabalho pretende, assim, criar um modelo de fábrica de aprendizagem que capacite os futuros profissionais a enfrentar os desafios da Indústria 5.0, proporcionando um ambiente de formação imersivo, sustentável e acessível, enquanto reforça a importância de soluções tecnológicas que incentivem a colaboração e a inovação. A Mini LF 5.0 no ISEP pretende ser um exemplo de como a educação pode evoluir para acompanhar as mudanças industriais e preparar uma nova geração de trabalhadores para o futuro.

1.2. Objetivos

Os objetivos deste trabalho centram-se na proposta de implementação de uma Mini LF 5.0 no ISEP, orientada pelos princípios da Indústria 5.0, *Open Design* e *Open Source*. A principal meta é desenvolver um ambiente de formação inovador que permita aos alunos adquirir competências práticas e técnicas alinhadas com os requisitos da nova era industrial, destacando-se pela integração de tecnologias emergentes e pela centralização do ser humano no processo produtivo. Adicionalmente, o projeto visa criar um modelo replicável e acessível, utilizando soluções de baixo custo e *software open source*, que promova a customização, resiliência e sustentabilidade. A Mini LF 5.0 não só capacitará os alunos para trabalhar em sistemas ciberfísicos avançados, como também permitirá explorar novas metodologias de interação homem-máquina, comunicação colaborativa e gestão ambiental, alinhando-se com as necessidades da Indústria 5.0. Outro objetivo é demonstrar a viabilidade técnica e financeira do projeto, garantindo que ele possa ser reproduzido noutras instituições de ensino e ambientes industriais.

Em suma, pretende-se que esta Mini LF 5.0 se torne uma referência de como os conceitos da Indústria 5.0 podem ser aplicados em ambientes educacionais, promovendo uma abordagem mais interativa, sustentável e colaborativa na formação dos futuros profissionais.

1.3. Metodologia

A metodologia utilizada para conduzir esta dissertação assenta na abordagem da Ciência do *Design*, designada como *Design Science Research* (DSR). A escolha da Metodologia DSR para este estudo é fundamentada na necessidade de desenvolver e avaliar artefactos de *design* para resolver um problema prático e relevante na área de Engenharia.

A origem desta metodologia remonta à década de 1980 quando Herbert A. Simon, cientista e economista, propôs uma abordagem inovadora para resolver problemas denominando-a de “ciência do *design*” [4].

A Metodologia DSR é uma abordagem de investigação que se concentra na criação e avaliação de artefactos de *design* para resolver problemas práticos e complexos e baseia-se na ideia de que os investigadores podem gerar conhecimento não apenas através da observação e análise, mas também através da criação ativa de soluções tangíveis para problemas do mundo real [5], [6].

Depois de definido o tema e de modo a alcançar os objetivos propostos, foram seguidas as seguintes etapas propostas pela metodologia DSR:

1. **Identificação do problema:** identificar um problema ou oportunidade de melhoria que requer uma solução.
2. **Definição dos objetivos:** estabelecer objetivos, incluindo os resultados desejados.
3. **Desenvolvimento de artefactos:** projetar e desenvolver um artefacto, como sistemas, modelos, algoritmos, entre outros que possam resolver o problema identificado.

4. **Avaliação:** avaliar os artefactos desenvolvidos para determinar se correspondem aos objetivos estabelecidos e se são eficazes na resolução do problema identificado. A avaliação pode ser feita por meio de testes, simulações, casos de estudo, entre outros.
5. **Reflexão e iteração:** Com base nos resultados da avaliação, refletir e iterar novos artefactos, se necessário. Este processo pode envolver ajustes no *design*, implementação de novas funcionalidades ou mudanças nas abordagens adotadas, assim como pode envolver várias iterações de design e prototipagem.
6. **Comunicação dos resultados:** Comunicar e partilhar os resultados da pesquisa de forma clara e acessível. Isso pode incluir a publicação de artigos, apresentações em conferências, relatórios técnicos, entre outros meios de disseminação.

1.4. Estrutura

A estrutura deste documento está organizada em cinco capítulos principais e visa proporcionar uma leitura clara e sequencial:

No **Capítulo 1**, é apresentada a introdução que contextualiza o tema, expõe os objetivos do trabalho, a metodologia adotada e oferece uma visão geral do documento.

O **Capítulo 2** foca-se na revisão bibliográfica, abordando conceitos fundamentais como Indústria 5.0, Sistemas Ciberfísicos, *Open Design* e Fábricas de Aprendizagem. Este capítulo explora as definições e características destes temas, bem como os desafios e perspectivas futuras, criando a base teórica necessária para a proposta deste projeto.

No **Capítulo 3**, é apresentado o desenvolvimento deste trabalho. Apresenta-se a análise de exemplos de aplicação, as suas lacunas e são apresentadas as características fundamentais de uma LF orientada para a indústria 5.0. Por fim, é proposta a implementação da Mini LF 5.0 no ISEP, detalhando os equipamentos, tecnologias e metodologias adotadas, incluindo a estrutura física e computacional da fábrica.

O **Capítulo 4** apresenta os resultados e a discussão, analisa a proposta de implementação da Mini LF 5.0, os componentes físicos e computacionais integrados e a viabilidade financeira do projeto.

Finalmente, no **Capítulo 5** são expostas as conclusões, onde se sintetizam os principais resultados alcançados, limitações do trabalho e são propostas sugestões para futuros desenvolvimentos.

Introdução

2. Revisão Bibliográfica

No presente capítulo é realizada uma revisão da literatura relevante sobre os temas considerados mais pertinentes para uma melhor compreensão desta dissertação. A Indústria 5.0, os Sistemas Ciberfísicos, o *Open design* e as Fábricas de Aprendizagem serão os temas centrais a serem abordados neste segundo capítulo, assim como o seu estado da arte. O objetivo é estabelecer uma base sólida de conhecimento para a compreensão desses conceitos fundamentais, visando o desenvolvimento posterior um projeto de uma fábrica de aprendizagem assente nestes quatro conceitos.

2.1. Indústria 5.0

Nos últimos anos, enquanto as empresas se adaptavam à Indústria 4.0 e começavam a implementar esta metodologia nas suas atividades, o debate e o interesse pela Indústria 5.0 já se iniciava, como se pode verificar pela Figura 1 que demonstra o crescimento de artigos publicados sobre o tema na base de dados no site Web of Science Trata-se de um conceito visionário que considera a sustentabilidade, a centralidade no ser humano, a resiliência organizacional e a colaboração ser humano-máquina como tendências para o futuro da indústria [7]. Por se tratar de um tema novo, há pouco consenso quanto à sua definição. Deste modo, o presente subcapítulo visa abordar os diferentes conceitos e perspectivas sobre o tema, a sua origem, assim como o futuro e os desafios desta nova revolução da Indústria.

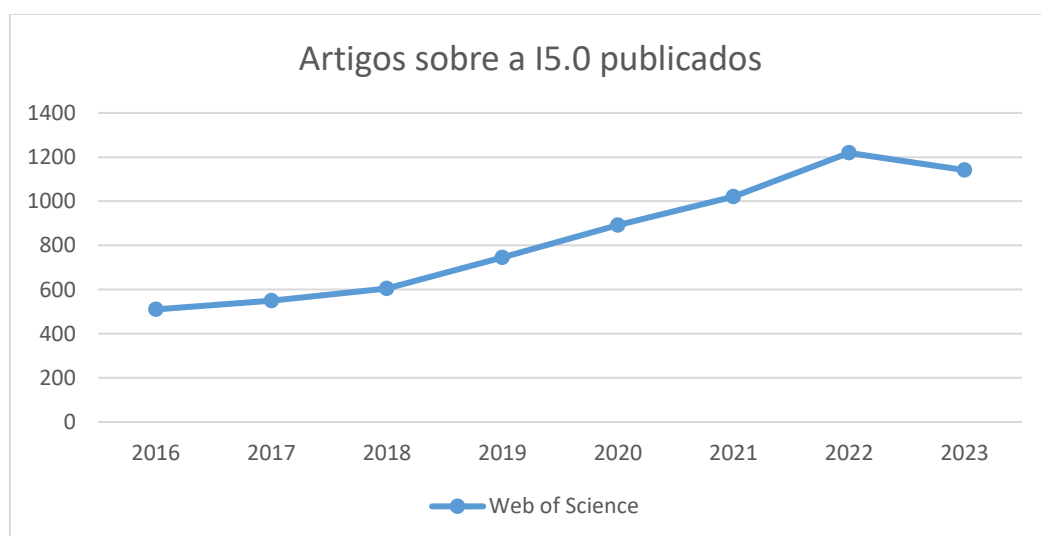


Figura 1 - Artigos sobre I5.0 publicados no Web of Science

2.1.1. Conceitos e diferentes perspectivas

O conceito emergente da Indústria 5.0 tem atraído crescente atenção nos últimos anos e vários autores observam que a Indústria 5.0 tem raízes no paradigma da Indústria 4.0, caracterizando-a “como um avanço evolutivo e incremental, mas crucialmente necessário, que se baseia no conceito e nas práticas da Indústria 4.0” [8], embora seja possível analisar diferentes perspectivas de análise.

O conceito de Indústria 5.0 foi criado pela Comissão Europeia (CE) com o intuito de integrar as prioridades europeias em relação às questões sociais e ambientais e possibilitar, assim, a concretização dos objetivos da União Europeia para 2030 [9]. A visão da CE estabelece que a Indústria 5.0 “complementa o paradigma da Indústria 4.0, promovendo uma transição liderada pela pesquisa e inovação para uma indústria sustentável, centrada no ser humano e resiliente, respeitando os limites do planeta”. Este movimento desloca o foco do valor exclusivo para os acionistas (*shareholders*) para abranger todas as partes interessadas envolvidas (*stakeholders*), focando-se, essencialmente, numa indústria sustentável [10]. Apesar deste conceito inovador da CE, algumas publicações de investigação revelam que a ideia da Indústria 5.0 foi lançada por Michael Rada nas redes sociais em 2015, como a próxima revolução de desenvolvimento após a quarta revolução industrial, sendo posteriormente explorada por vários investigadores e, por fim, validada pela Comissão Europeia em 2021 [11].

Enquanto há autores que destacam o papel da sustentabilidade, outros, como Madsen e Berg concentram-se em adotar uma abordagem centrada no ser humano [11]. Por outro lado, surge um novo conceito de simbiose entre o Homem e a Máquina apoiado por vários autores que defendem a colaboração/inter-relação entre o ser humano e as máquinas [12]. Este último conceito defendido pela maioria dos autores assenta também no conceito de customização, a maior característica da Indústria 5.0 que pode ser definida como “o projeto e a produção por meio de vários dados de sensores que estarão diretamente vinculados fornecendo produtos personalizados aos consumidores em tempo real” [13].

Apesar das diversas visões e perspectivas relativamente ao conceito desta nova revolução da indústria, existe um alinhamento e uma consensualização face a alguns aspetos gerais desta nova metodologia. Além das premissas de eficiência e produtividade como únicos objetivos da Indústria 4.0, a Indústria 5.0 resgata e reforça o papel e contribuição da indústria para a sociedade, apoiada nos pilares de sustentabilidade e da responsabilidade social, como demonstrado na Figura 2 [10].



Figura 2 - Pilares da Indústria 5.0. Adaptado de Lique Wang [14]

2.1.2. Revoluções da Indústria

A civilização humana passou por várias revoluções industriais (Figura 3). À medida que “a humanidade progrediu ao longo da história, cada estudo no avanço da ciência levou às revoluções industriais em diferentes períodos” [15].

- **Indústria 1.0**

A primeira revolução industrial, denominada como Indústria 1.0, começou por volta de 1760 e foi impulsionada pela geração de energia mecânica a partir de água e combustíveis fósseis e por máquinas a vapor. A máquina a vapor possibilitou a transição da sociedade agrária para um novo processo de fabrico. Esta transição também envolveu a utilização do carvão como principal fonte de energia, com o comboio a tornar-se o principal meio de transporte [15].

- **Indústria 2.0**

A segunda revolução industrial, a Indústria 2.0, foi desencadeada por volta da primeira metade do século XIX, com a descoberta da energia elétrica e a invenção do motor de combustão interna, permitindo uma industrialização rápida, utilizando petróleo e eletricidade para alimentar a produção em massa, resultando num crescimento económico significativo.

- **Indústria 3.0**

A chegada dos computadores e a implementação da eletrónica e da tecnologia da informação para automatizar a produção levou à terceira era industrial, a Indústria 3.0 [16].

- **Indústria 4.0**

Posteriormente, a quarta revolução industrial, também conhecida como Indústria 4.0, teve origem em 2011 a partir de um projeto na estratégia de alta tecnologia do governo alemão. Esta revolução introduziu os conceitos de Sistemas Ciberfísicos (CPS) e Sistemas de Produção Ciberfísicos (CPPS), que são abordados e aprofundados no segundo capítulo deste relatório. A *SmartFactory*, traduzida como fábrica inteligente, é uma das principais iniciativas associadas à Indústria 4.0 onde há uma fusão entre o mundo virtual e físico por meio de CPS, em que a interconexão entre seres humanos, objetos e sistemas resulta na formação de sistemas dinâmicos de criação de valor interempresarial. Esses sistemas são otimizados em tempo real e auto-organizados, passíveis de avaliação e otimizados com base em critérios como custos, disponibilidade e eficiência de recursos [17]. Na era da Indústria 4.0, os sistemas de produção, sob a forma de CPS, podem tomar decisões inteligentes através de comunicação em tempo real e cooperação entre "coisas de fabrico", permitindo a produção flexível de produtos de alta qualidade com eficiência em massa e lucros extraordinários [16].

- **Indústria 5.0**

Após cerca de dez anos desde a introdução da Indústria 4.0, a necessidade de humanização na evolução da Indústria 4.0 e as tendências correspondentes de transformação da Indústria levaram à transição para uma Indústria 5.0, como resposta aos emergentes desafios sociais, como já mencionado anteriormente. Pode contar-se que as tendências relacionadas à IA, *big data*, cadeia de abastecimento, transformação digital, aprendizagem automática, Internet das

coisas, ainda estão entre os principais impulsionadores da Indústria 5.0, assim como foram para a Indústria 4.0. Tanto a Indústria 4.0 como a Indústria 5.0 dependem do extenso uso de IA. No entanto, os cientistas da computação que trabalham sob o enquadramento da Indústria 5.0 normalmente falam sobre "IA fraca", que é utilizada para tarefas específicas e é compreensível e controlável por humanos. Portanto, o conceito de "humano na interação" é visto como uma força, já que promove a cooperação transparente entre o homem e a máquina, que sobrevive em caso de falha do equipamento e possibilita decisões éticas [18].

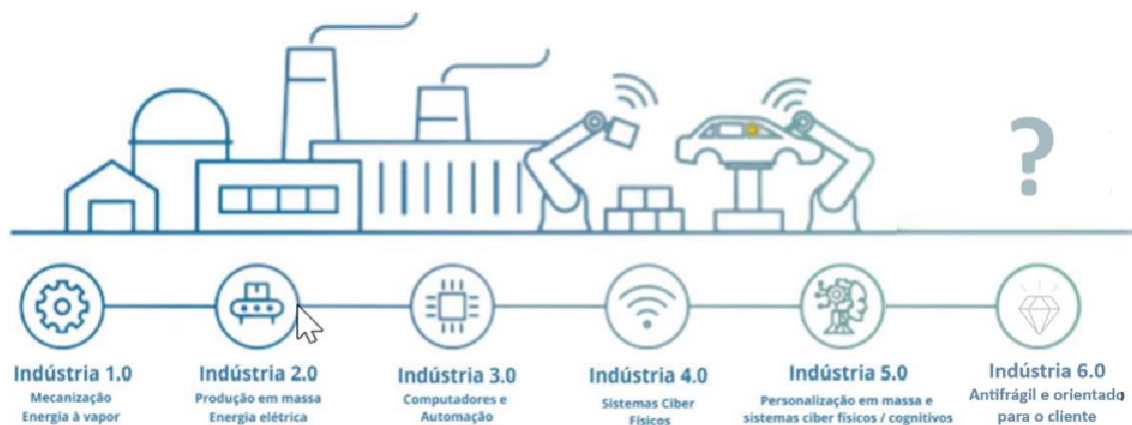


Figura 3 - Evolução da Indústria. Adaptado de: [19]

- **Indústria 6.0**

A recente situação económica global revelou que a indústria é afetada por riscos causados pela pandemia Covid19, cadeias de abastecimento globais e dependência de fornecedores em todo o mundo. Portanto, vários autores finlandeses, como Kuosmanen e Villman, juntaram-se para abordar as possíveis vias que a indústria finlandesa deve seguir para ser o líder estratégico e impulsionador na definição da "Indústria 6.0". Defendem que deve ser construída uma revolução industrial completamente nova, na qual a anti fragilidade seja o princípio base para aumentar a resiliência a futuros fatores de stress e choques globais. Tal como em revoluções industriais anteriores, avanços na tecnologia têm aberto caminho para criar crescimento e bem-estar. A crise climática global exige que se esteja na vanguarda de uma estratégia que crie impacto positivo no ambiente, na economia e na sociedade [20].

A Indústria 6.0 é definida neste documento como "Fabrico ubíquo, orientado para o cliente, virtualizado e anti frágil". Caracteriza-se pelo pensamento centrado no cliente e altamente personalizado. Estas mudanças também alteram o papel do ser humano como trabalhador de produção, à medida que se tornam parte do ambiente interligado e precisam lidar com a produção digital e otimizada. Embora já existam pontos fortes que nos preparam para liderar a próxima revolução industrial, também podem ser detetadas graves lacunas. É imprescindível elevar o nível de conhecimentos em TIC em toda a indústria, de investigação, desenvolvimento e inovação multidisciplinares, e uma estratégia para um compromisso público de longo prazo e investimentos significativos [20].

2.1.3. Implementação da I5.0

A Indústria 5.0 está a progredir em diversos setores, incluindo saúde, produção, têxteis, educação, alimentação e mais. Com a adoção da Indústria 5.0, a maioria das indústrias está a caminhar rumo a uma indústria social inteligente. Esta evolução encontra aplicação em variados campos e contextos (Tabela 1) evidenciando-se alguns exemplos específicos em diferentes áreas em seguida.

Tabela 1 - Aplicações da I5.0. Fontes: [20], [21], [22]

Setor	Aplicações da Indústria 5.0
Produção	Produção personalizada, automação de processos, uso de tecnologias inteligentes para aumentar eficiência e qualidade na produção, sem negligenciar a responsabilidade social.
Saúde	Implantes médicos personalizados, órgãos artificiais, diagnóstico avançado por inteligência artificial (IA), monitorização remota em tempo real.
Gestão de cadeias de abastecimento	Otimização de rotas, gestão de frotas, veículos autónomos, rastreamento para maior eficiência, segurança na logística e para minimizar as emissões de carbono durante o transporte e distribuição de produtos. Implementação de processos de reciclagem avançados na produção para reduzir resíduos e reutilizar materiais, promovendo a economia circular.
Educação	Integração entre máquinas, robôs e humanos para melhorar o ensino, com o objetivo de formar novos profissionais focados na colaboração entre máquinas e humanos.
Entretenimento e Mídia	Produção de conteúdo personalizado, interativo e imersivo através de ferramentas como a realidade virtual e realidade aumentada.
<i>Design</i>	Integração de práticas de <i>design</i> ecológico na conceção de produtos, visando a durabilidade, facilidade de desmontagem e uso de materiais recicláveis.
Energia	Uso de energias renováveis na produção através de fontes de energia limpa e renovável para reduzir a pegada de carbono das operações fabris.

- **Produção**

A indústria fabril, por vezes designada como setor de fabrico, é um ramo fundamental da economia dedicado à transformação de matérias-primas e componentes em produtos acabados. Este setor abrange uma variedade de processos, desde a produção de bens de consumo até equipamentos industriais complexos. Envolve várias etapas, incluindo o *design*, engenharia, produção, montagem e distribuição de produtos. Ao longo do tempo, esta indústria tem passado por transformações significativas, especialmente com o surgimento de novas tecnologias. A automação, a robótica, a impressão 3D e a digitalização são apenas alguns exemplos das inovações que têm impactado drasticamente os processos de fabrico, tornando-os mais eficientes, precisos e adaptáveis. Além disso, a produção moderna está cada vez mais orientada para a sustentabilidade e eficiência energética, procurando reduzir o desperdício, otimizar o uso de recursos e minimizar o impacto ambiental. A produção desempenha um papel crucial na economia global, contribuindo significativamente para o crescimento económico, a criação de empregos e o avanço tecnológico em várias áreas [16].

Com o intuito de tornar a produção mais sustentável e adaptar-se à nova revolução da indústria, desenvolvem-se processos que reciclam e reutilizam os recursos disponíveis. Uma das metas passa por reduzir os impactos ambientais na indústria fabril. Para tal, é necessária a implementação de tecnologias como a produção aditiva, que permite uma maior customização e otimização dos recursos, reduzindo o desperdício [22].

A I5.0 está a transformar os sistemas de fabrico globais ao retirar tarefas repetitivas dos trabalhadores humanos. Robôs e sistemas inteligentes estão a integrar-se nas cadeias de fornecimento e nas linhas de produção de uma forma sem precedentes. Esta nova abordagem, denominada de produção inteligente, permite que os projetistas protejam os ficheiros de *design* dos produtos armazenando-os na *cloud*, garantindo um controlo de acesso seguro e a utilização eficiente dos recursos de fabrico em múltiplos locais. O controlo das máquinas na fábrica e a gestão do ciclo de vida da produção são agora efetuados através de sistemas de fabrico em nuvem [21]. Este modelo orientado para o serviço visa integrar as capacidades de produção com os serviços, proporcionando soluções personalizadas aos clientes. Através de inovações empresariais, a incorporação de serviços no processo de produção tem como objetivo melhorar a eficiência produtiva, o valor acrescentado e a quota de mercado das empresas de produção. A plataforma baseada na nuvem controla os serviços de fabrico de forma otimizada e é um sistema distribuído e em rede para os recursos de produção [22].

- **Saúde**

No campo da saúde, implantes médicos personalizados, órgãos artificiais, fluidos corporais e transplantes podem ser fabricados de forma mais eficiente em termos de custos ao adotar tecnologias facilitadoras da Indústria 5.0 [23].

A Indústria 5.0 visa criar um hospital inteligente com capacidades em tempo real. Esta tecnologia pode fornecer sistemas de monitorização remota na área da saúde e desempenha um papel fundamental na melhoria da vida dos médicos e dos seus pacientes. Ao aplicar este novo conceito de indústria é possível o fabrico de implantes inteligentes personalizados de acordo com as mudanças nos requisitos dos clientes. Os profissionais médicos estão a evoluir para a tecnologia de inteligência artificial para medir vários problemas, como os níveis de glicose. Isto ajuda na implementação da personalização em massa, produzindo implantes de acordo com a correspondência patenteada. Na ortopedia, a Indústria 5.0 requer implantes de alta qualidade com vida útil prolongada e personalizados. Isto ajuda a resolver vários desafios, como superprodução, seleção inadequada de ferramentas e falta de transparência. Há mesmo uma mudança no método tradicional de fabrico de implantes para pacientes, e isso também é capaz de atualizar vários dispositivos e ferramentas médicas. As tecnologias são revolucionárias, pois ajudam a realizar cirurgias de maneira precisa [22].

- **Gestão da Cadeia de Abastecimento**

A cadeia de abastecimento 5.0 destaca a importância da colaboração entre máquinas mais inteligentes e humanos. A Indústria 5.0 visa atender aos requisitos de customização dos clientes, que exigem a combinação da originalidade humana com a competência das máquinas. Robôs são necessários para a gestão da cadeia de abastecimento em procedimentos

padronizados em volumes de produção elevados, o que representa um desafio quando o objetivo é a produção de algo mais personalizado e não tanto em massa [22]. A Indústria 5.0 procura integrar ecossistemas digitais automatizados e inteligentes com o toque humano [65, 66]. Isso envolve elementos humanos no processo, ajudando a personalizar as experiências do consumidor final e otimizar os fluxos de trabalho[22], [23].

A inteligência humana é trabalhada de maneira aprimorada com a computação e a tecnologia, de modo a aumentar a proficiência nos negócios e fornecer alto valor aos clientes de forma mais rápida. Desde a seleção de matérias-primas, a sua entrega e transações até o transporte, o planejamento de recursos empresariais (ERP) gere a cadeia de abastecimento da organização empresarial. Isso significa trazer a customização para a cadeia de abastecimento, melhorando a satisfação dos clientes e a gestão da eficiência empresarial e margens de mercado. Há a redução dos riscos relacionados à cadeia de abastecimento e desperdícios [22].

- **Educação**

Enquanto a educação no paradigma da Indústria 4.0 é orientada pela tecnologia, com a quinta revolução industrial a motivação é gerar uma simbiose entre máquinas, robôs e seres humanos e, conseqüentemente, é urgente uma transformação na educação, nas mais variadas áreas, de modo a criar uma geração de trabalhadores direcionados para uma Indústria 5.0. Espera-se proporcionar aos estudantes da área da engenharia o conhecimento necessário sobre cenários de colaboração e habilidades de interação entre máquina-robô-ser humano [23].

Na área da saúde, também auxilia estudantes, incluindo estudantes de medicina, no treino médico necessário fora do âmbito prático. Por exemplo, durante o surto de COVID-19, a aprendizagem automática foi aplicada em imagiologia médica, processamento de linguagem natural e dados genéticos e concentra-se no diagnóstico, detecção e previsão de doenças [23].

2.1.4. Desafios e futuro da I5.0

A Indústria 5.0 representa uma evolução significativa no cenário industrial, procurando integrar avanços tecnológicos como a Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA) e automação para criar sistemas de produção altamente eficientes e adaptáveis. No entanto, como em qualquer paradigma tecnológico, a Indústria 5.0 também enfrenta limitações e desafios que precisam ser considerados. Este subcapítulo analisará algumas das principais limitações identificadas nesse contexto.

- **Complexidade da Implementação**

A transição para a Indústria 5.0 não é uma tarefa simples. A incorporação de tecnologias avançadas em ambientes de produção existentes pode ser complexa e dispendiosa. Muitas empresas podem enfrentar desafios na adaptação e na integração de sistemas com novas soluções, necessitando de investimentos significativos em infraestrutura e treino de pessoal [24].

- **Segurança Cibernética e Privacidade de Dados**

A conectividade expandida na Indústria 5.0 aumenta a exposição a ameaças cibernéticas. A transição dos avanços tecnológicos do 4G para o 5G exige atualizações significativas nos sistemas, sendo conhecido que *hackers* frequentemente exploram vulnerabilidades quando os sistemas são atualizados [24].

A evolução digital da Sociedade 5.0 está intrinsecamente ligada à Internet das Coisas (IoT), permitindo um aumento exponencial de dados que se tornam alvos potenciais para *hackers*. A conectividade expandida na Indústria 5.0 aumenta a exposição a ameaças cibernéticas, uma vez que a interconexão de dispositivos e sistemas cria pontos de vulnerabilidade [25].

Deste modo, a implementação da quinta revolução da indústria eleva os riscos de violações de segurança e comprometimento de dados sensíveis, pelo que proteger a infraestrutura contra ataques cibernéticos e garantir a privacidade dos dados dos clientes torna-se uma preocupação crítica nesse contexto.

- **Impactos Ambientais**

Por outro lado, a tecnologia está em constante atualização, tornando os *hardwares* obsoletos, criando a necessidade de novos equipamentos que acompanhem a evolução tecnológica. Os elevados descartes de dispositivos têm um impacto negativo significativo no meio ambiente [24], [25].

A Indústria 5.0 apresenta oportunidades notáveis para aprimorar os processos industriais, impulsionar a eficiência e fomentar a inovação. No entanto, é crucial reconhecer e lidar com as suas limitações, que vão desde desafios técnicos a questões éticas e sociais, para que possa atingir o seu potencial máximo. Superar essas limitações requer uma colaboração entre diferentes setores, investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, bem como políticas de regulamentação que promovam a responsabilidade e a sustentabilidade.

2.2. Sistemas Ciberfísicos

Na atualidade, a interseção entre o mundo físico e o virtual tem se tornado cada vez mais proeminente, impulsionando uma revolução na forma como interagimos com a tecnologia e como esta se integra aos ambientes do cotidiano. Nesse contexto, os Sistemas Ciberfísicos (CPS – Cyber Physical Systems) emergem como uma peça fundamental dessa transformação, promovendo uma nova era de integração entre computação, comunicação e processos físicos.

2.2.1. Conceitos e Fundamentos dos Sistemas Ciberfísicos

Inicialmente, numa abordagem genérica, os Sistemas Ciberfísicos (CPS) eram caracterizados pela fusão entre operações computacionais e físicas. Nesse ambiente, computadores interligados por redes geriam processos físicos, estabelecendo um ciclo de respostas onde ambos os processos interagiam reciprocamente [26].

O termo CPS emergiu como um paradigma de pesquisa promissor, representando a convergência entre controle, comunicação e computação [27]. Embora seja desafiador definir com exatidão devido à sua amplitude, os CPS podem ser caracterizados como "sistemas físicos e projetados cujas operações são monitorizadas, controladas, coordenadas e integradas por um núcleo de computação e comunicação" segundo os autores Rajkumar, Lee e Stankovic [28].

Estes sistemas representam a integração entre processos físicos e computacionais. Computadores incorporados e redes monitorizam e controlam os processos físicos, geralmente estabelecendo ciclos de *feedback*, nos quais os processos físicos influenciam as operações computacionais e vice-versa. Como um desafio intelectual, os CPS tratam da interseção, e não da mera combinação, entre o mundo físico e o cibernético. Compreender isoladamente os elementos físicos e computacionais não é suficiente, pelo que é essencial compreender a sua interação mútua. Em suma, ao contrário dos sistemas integrados convencionais, que se focam predominantemente nos componentes de computação, os CPS centram-se principalmente na interação entre os elementos físicos do mundo real e os elementos computacionais no espaço cibernético [27].

Os CPS consistem em elementos e subsistemas autónomos e cooperativos que estão ligados com base no contexto dentro e entre todos os níveis de produção, desde processos e máquinas até redes de produção e logística [29]. Um CPS resulta de uma integração entre processamento físico, sensorial, computação, comunicação e controlo. Tal como apresentado na Figura 4, que representa a arquitetura geral de um sistema CPS, o sistema físico é composto por processos físicos, sensores e atuadores [30].

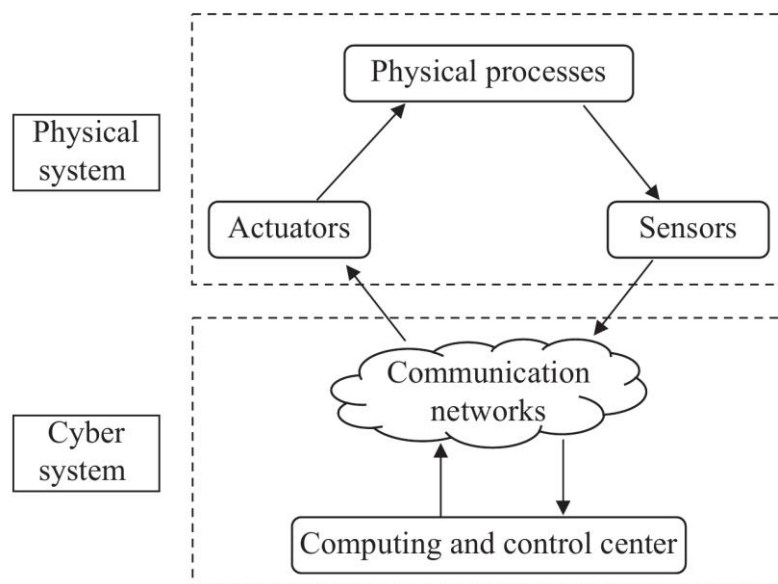


Figura 4 - Arquitetura de um CPS. Fonte: [30]

O sistema ciberfísico inclui redes de comunicação, centros de computação e controlo. Os processos físicos geralmente são considerados como uma planta controlada por um sistema ciberfísico. Em relação aos outros componentes, têm as seguintes funções [30]:

- Sensores: São usados para a aquisição de dados em tempo real.
- Atuadores: Comandos de controlo são executados pelos atuadores correspondentes para realizar ações físicas desejadas.
- Centro de computação e controlo: É responsável por receber dados medidos pelos sensores. Ao analisar os dados recebidos, decisões de controlo correspondentes são tomadas pelo centro de controlo para garantir que os processos físicos são realizados corretamente.
- Rede de comunicação: Fornece uma plataforma de comunicação para o centro de controlo e o sistema físico. As medições obtidas pelos sensores são transmitidas pela rede de comunicação para o centro de controlo. Sinais ou decisões de controlo são transmitidos do centro de controlo para os atuadores através da rede de comunicação.

2.2.2. Classificação e Espectro de Definições de CPS

A multiplicidade de perspetivas em torno dos sistemas ciberfísicos resultou em diversas definições, que são, em parte, um reflexo dessa variedade de abordagens. A partir dessas definições, emergem diferentes modelos de CPS que podem ser categorizados pelas suas características qualitativas, ordenados por complexidade e aplicabilidade, formando um "espectro" (Figura 5), conforme defendido por Putnik e Ferreira. Este espectro pode ser dividido em dois domínios distintos, linear e dinâmico [26].

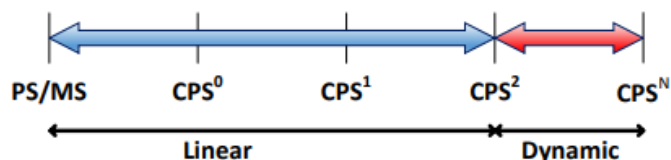


Figura 5 - Espectro de modelos de CPS. Fonte: [26]

Domínio Linear

No extremo esquerdo deste espectro do domínio linear (Figura 6) estão as definições "clássicas" e tradicionais de PS/MS. Logo em seguida, encontram-se as definições do tipo CPS, abordando os modelos mais simples de CPS, sem capacidade de aprendizagem, descritos como "sistemas físicos e projetados cujas operações são monitorizadas, coordenadas, controladas e integradas por um núcleo de computação e comunicação", segundo Rajkumar e outros autores [28]. Por outro lado, também são caracterizados como "baseadas em conexões fixas devido à filosofia tradicional herdada da mecatrónica" [31].

No lado direito do domínio linear (Figura 6) encontram-se os modelos do tipo CPS¹ e CPS², também denominados de CPS's "Inteligentes", ou I-CPS, em virtude da inclusão de capacidades de aprendizagem, especialmente o CPS².

O modelo intermedio CPS1, com aprendizagem em *single loop*, é uma extensão da arquitetura do CPS0 com a incorporação do módulo *Learning*, fornecendo reconfiguração estrutural do módulo de controlo [32].

No extremo oposto, à direita do espectro da figura abaixo, encontram-se as definições do tipo CPS2 como “uma integração de computação com processos físicos cujo comportamento é definido tanto por partes cibernéticas quanto físicas do sistema. Computadores e redes integrados monitorizam e controlam os processos físicos, com *loops* de *feedback* onde os processos físicos afetam as computações e vice-versa” [33], exigindo explicitamente conexões não fixas, alterações contínuas nas conexões, implicando que as arquiteturas com conexões fixas não são verdadeiros CPS. As definições e modelos do tipo CPS2 são os mais complexos nessa parte do espectro. Sistemas ciberfísicos com aprendizagem de duplo ciclo – CPS2, onde a parte digital pode ser alterada (ajustada) para melhor controlar a parte física. Neste modelo, é introduzido outro nível de "digital", com o segundo módulo de "Aprendizagem", que tem a capacidade de aprender sobre o módulo de Aprendizagem no modelo CPS1. O processo de aprendizagem sobre outro processo de aprendizagem é denominado na literatura como "aprendizagem de segundo ciclo" [26]. As denominações dos modelos de CPS são relativas ao nível de aprendizagem em *loop*, tendo mais que uma denominação, no caso dos modelos CPS0, CPS1 e CPS2, como se pode verificar na Figura 6.

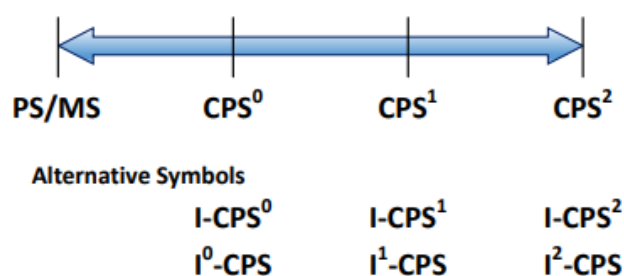


Figura 6 - Domínio linear do espectro de modelos de CPS. Fonte:[26]

Domínio Dinâmico

Ao contrário do domínio linear, o domínio dinâmico é regido pela capacidade de aprendizagem e adaptação ao meio envolvente, ou seja, cria uma ordem dentro dos CPS's com capacidade de aprendizagem.

Considerando os sistemas industriais existentes e as definições da literatura, Putnik e Ferreira classificaram um espectro quase transversal de sistemas ciberfísicos da seguinte maneira e como demonstrado na Figura 7: CPS (sistemas ciberfísicos clássicos), CPS-AMS (sistemas de produção aumentados), M-CPS (CPS mistos), CPS-VMS (sistemas de produção virtual CPS) e I-CPS (CPS inteligentes) [26].

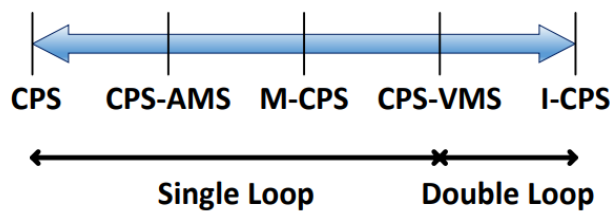


Figura 7 - Domínio dinâmico do espectro de modelos de CPS. Fonte: [26]

À esquerda deste espectro, o CPS0 e CPS1 representam a base clássica dos CPS's, focando na reconfiguração do controlo físico em sistemas de fabrico. Em contraste, os CPS-AMS procuram a integração com ativos de realidade aumentada, aproveitando dados em tempo real provenientes de sensores incorporados para reconhecimento de contexto. Já o CPS-VMS concentra-se na exploração da realidade virtual para simulações, enquanto o M-CPS representa a integração da realidade mista, tecnologia e sistemas de controlo autónomo para aplicar medidas corretivas em processos [26].

Existem ainda os I-CPS hipotéticos, que por sua vez apresentam aprendizagem contínua, o que torna o CPS inteligente, eficaz, colaborativo e sistémico. Isto deve-se ao significativo *double loop learning*, cuja aprendizagem efetiva resultante provoca um aumento de capacidade individual de tomar decisões eficazes [26].

2.2.3. Aplicações dos CPS

Nesta seção, serão abordadas algumas das aplicações dos CPS, nomeadamente na produção inteligente, transporte aéreo, saúde e redes elétricas. A Tabela 2 fornece uma visão geral das várias aplicações de CPS de acordo com sua funcionalidade para além das anteriores que serão analisadas posteriormente.

Tabela 2 - Aplicações de CPS

Setor	Aplicações de CPS
Produção	Automação e otimização de processos de fabrico, fábricas inteligentes, sistemas de controlo e monitorização em tempo real.
Saúde	Monitorização remota de pacientes, dispositivos médicos inteligentes, sistemas de saúde conectados para melhorar diagnósticos e tratamentos.
Tráfego aéreo	Controlo de tráfego aéreo inteligente, gestão de espaços aéreos, otimização de rotas e prevenção de colisões.
Redes elétricas	Integração de tecnologias para otimizar a distribuição de energia elétrica, melhorar eficiência, monitorizar e diagnosticar problemas em tempo real.
Transporte inteligente	Gestão do tráfego rodoviário, veículos autónomos e sistemas de navegação avançados.
Edifícios inteligentes	Sistemas de automação, monitorização de energia, segurança e eficiência para ambientes urbanos inteligentes.
Resposta de emergência	Utilização de sistemas inteligentes para monitorizar, coordenar e agir rapidamente em situações de emergência para proteger vidas e infraestruturas.

- **Produção Inteligente**

O termo " produção inteligente", também designado por *smart manufacturing*, abrange a aplicação de tecnologias incorporadas de *hardware* e *software* com o intuito de otimizar a produtividade no fabrico de bens ou na prestação de serviços. Esta abordagem pressupõe a criação de uma "fábrica inteligente", aludindo à próxima geração da produção otimizada. Este domínio destaca-se como uma das principais áreas de aplicação dos Sistemas Ciberfísicos (CPS), impulsionado por fatores como produção em massa, crescimento económico, entre outros. A produção enfrenta, ao longo dos anos, uma série de exigências relacionadas com a alta flexibilidade. A perspetiva dos CPS sobre a futura revolução industrial tem como objetivo melhorar a segurança, produtividade e eficiência, conectando tecnologias de produção de sistemas integrados, abrindo caminho para fluxos de trabalho altamente flexíveis e novas modalidades de colaboração [34].

- **Saúde**

A investigação em Sistemas Ciberfísicos tem revelado novas oportunidades e desafios no domínio da saúde, tais como a criação de salas de operações e hospitais inteligentes, cirurgias em tempo real guiadas por imagens e implementação de bombas de infusão controladas por analgesia para pacientes. Contudo, é crucial desenvolver sistemas médicos CPS seguros, confiáveis e certificados. Tendências atuais incluem a conectividade sem fio para dispositivos médicos, monitorização contínua, modelação de pacientes, segurança e integração de dispositivos médicos [27].

A introdução de tecnologias sem fios em dispositivos médicos não só melhora a conectividade, mas também aumenta a segurança dos sistemas, eliminando a confusão de cabos frequentemente encontrada em ambientes de saúde. Além disso, os CPS médicos têm o potencial de melhorar significativamente a confiabilidade do sistema e de transformar a comunidade médica através de tecnologias inovadoras [27], [34].

A interoperabilidade entre dispositivos médicos e a integração de dados são pontos fundamentais para o futuro desenvolvimento dos sistemas médicos ciberfísicos, visando aprimorar os cuidados, a segurança e a eficiência do paciente. Esta evolução tecnológica no campo dos CPS promete desencadear mudanças significativas na medicina e na área da saúde, oferecendo soluções inovadoras e melhorias substanciais na prestação de cuidados médicos.

- **Smart grid**

Um "*smart grid*" ou "rede elétrica inteligente" é um sistema elétrico avançado que utiliza tecnologia para aprimorar a eficiência, confiabilidade, economia e sustentabilidade do fornecimento de energia elétrica através da introdução de tecnologias avançadas na infraestrutura energética. Simultaneamente, é uma prioridade máxima proteger a infraestrutura energética contra falhas e ataques externos. Por exemplo, em certas situações inesperadas, uma falha em determinado ponto da rede elétrica pode propagar-se, levando a uma falha em cascata e apagões generalizados. Além disso, é um desafio de pesquisa aberto coordenar os diversos recursos de geração de energia para atender à procura necessária [27].

Em suma, o objetivo é projetar uma rede de energia robusta introduzindo um controlo em tempo real na composição de elementos cibernéticos e físicos na rede.

- **Tráfego aéreo**

O estudo dos CPS tem um impacto significativo no *design* de aeronaves e na gestão do tráfego aéreo, com o objetivo de melhorar significativamente a segurança da aviação [35].

O transporte aéreo refere-se a sistemas de aviação civil ou militar e a sua própria gestão de tráfego. Espera-se que veículos aéreos inteligentes sejam predominantes num futuro próximo, especialmente para serviços militares. Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), conhecidos como *drones*, são apenas alguns dos exemplos conhecidos de veículos aéreos inteligentes. Dado que a consciência física é um problema importante para os veículos aéreos da próxima geração, prevê-se que os CPS tenham um elevado impacto na aviação futura e na gestão de tráfego aéreo. Atualmente, o controlo de tráfego aéreo é gerido através de torres de radar e sistemas de suporte computacional, no entanto com uma consciência física limitada. Portanto, a integração das capacidades computacionais e físicas surge com uma importância significativa para os sistemas de transporte aéreo da próxima geração [36].

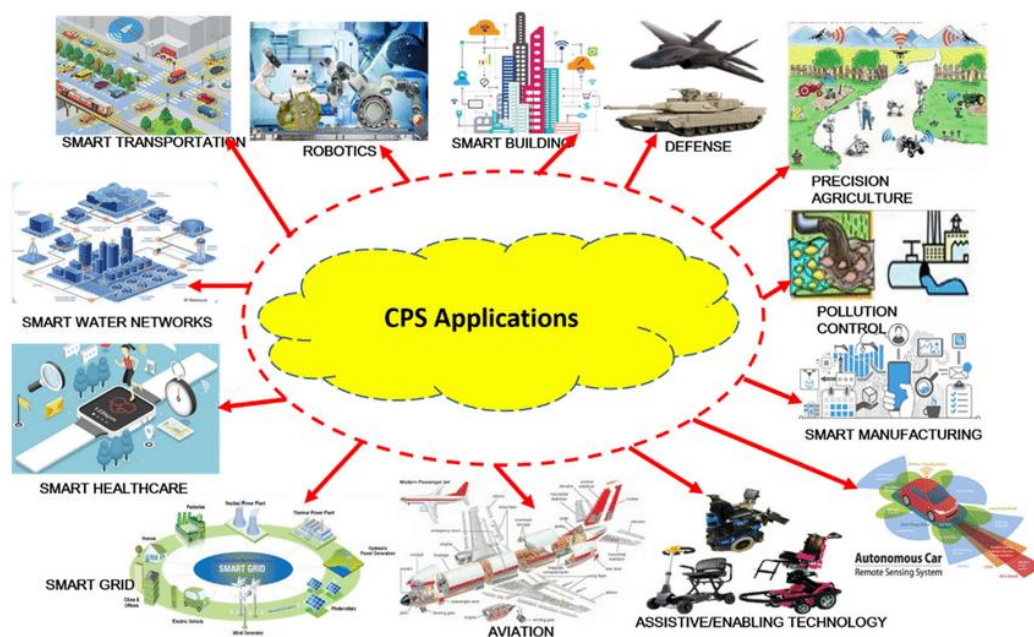


Figura 8 - Aplicações de CPS's. Fonte: [37]

2.2.4. Desafios e Perspetivas Futuras dos CPS

A ciência e a tecnologia são fundamentais para sustentar a visão dos sistemas ciberfísicos e representam um pilar essencial para a competitividade económica futura. O estabelecimento dessa base científica e tecnológica pode gerar riqueza numa vasta gama de domínios de aplicação, resultando em avanços sem precedentes nas áreas da ciência e engenharia. No

entanto, os CPS enfrentam grandes desafios, relativos a algumas das aplicações já mencionadas no subcapítulo anterior, tais como [38]:

1. **Robustez e Segurança:** A incerteza no ambiente, ataques de segurança e erros em dispositivos físicos tornam a garantia da robustez geral do sistema, segurança e segurança um desafio crítico. As soluções de segurança podem explorar a natureza física dos CPS, utilizando mecanismos baseados em localização, tempo ou etiquetas [38].
2. **Abstração de sistemas em tempo real:** Devido ao grande número de sensores, atuadores e computadores com troca de informações de vários tipos de dados, é de extrema importância desenvolver um novo quadro que permita abstrair as características mais importantes dos sistemas em tempo real. Deste modo, é necessária uma pesquisa aprofundada em mecanismos novos e distribuídos de computação e comunicação em tempo real que possam refletir adequadamente a interação chave entre os elementos nos CPS e, eventualmente, fornecer o nível necessário de desempenho [39].
3. **Redes de sensores e atuadores:** Embora o estudo extenso das redes de sensores sem fio ao longo de muitos anos, os WSN (*Wireless Sensor-Actuator Networks*) são uma área emergente que ainda não foi investigada de forma adequada, especialmente do ponto de vista dos CPS. Esses sistemas envolvem a interação entre sensores, atuadores, sistemas físicos e elementos computacionais, pelo que devem ser cuidadosamente incorporados os detalhes físicos e os efeitos dos atuadores no projeto dessas redes, algo que até o momento não foi completamente considerado no *design* desses sistemas [39].
4. **Arquitetura:** Devem ser desenvolvidas novas abordagens inovadoras para abstrações e arquiteturas que permitam a integração de controle, comunicação e computação para o rápido *design* e implementação de CPS. As novas abordagens devem permitir a integração e interoperabilidade de sistemas heterogêneos que compõem os CPS de modo eficiente e robusto [40].
5. **Verificação e validação:** Componentes de *hardware* e *software*, assim como os sistemas que formam, precisam de superar o seu estágio atual e alcançar um alto grau de confiabilidade, configurabilidade e, quando necessário, certificação. Novos modelos, algoritmos, métodos e ferramentas para verificar e validar componentes de *software* e também sistemas inteiros desde as fases iniciais de *design* representam as direções de pesquisa abordadas pela comunidade científica [27], [40].
6. **Matemática:** Quando sistemas computacionais interagem com o mundo real, é necessário lidar com o ambiente em constante mudança dentro dos processos discretos de um computador. Isso requer modelos que reflitam o ambiente contínuo, possivelmente com um número infinito de estados, com modelos do sistema de computação discreto, que possui um número finito de estados. Isso exige novas abordagens matemáticas para lidar com a dualidade discreta/contínua de tal situação [41].

2.3. Open Design

O conceito de *Open Design* (OD) tem sido objeto de investigação e exploração contínuas no âmbito do *design* contemporâneo. Na sua análise, Abel descreve o OD como uma área extensa e dinâmica, cujos contornos ainda carecem de definição clara, apresentando um desafio para os *designers* ao tentarem compreendê-la em sua totalidade [42].

O termo "*design*", por si só, é notavelmente amplo e muitas vezes ambíguo. John Heskett ilustra essa complexidade ao descrever quatro possíveis usos distintos do termo. O autor aponta que, além de poder ser interpretado como um substantivo, referindo-se ao campo geral do *design* ou como um verbo que implica a ação ou pensamento a fim de projetar, o termo "*design*" pode também ser interpretado novamente como um substantivo referindo-se ao produto final ou a um plano ou intenção. Neste contexto, aplicar-se-á a última interpretação como "um plano ou intenção" [43].

Open Design é uma abordagem colaborativa e acessível ao *design*, que promove a criação, partilha e aprimoramento de projetos, produtos ou processos de forma transparente e aberta. Este conceito transcende as fronteiras convencionais do *design*, permitindo a participação de uma comunidade diversificada, incluindo profissionais, entusiastas e especialistas de várias áreas, visando à democratização do conhecimento, promovendo a troca livre de ideias e recursos para impulsionar a inovação e a criatividade coletiva [44].

Para poder definir com precisão o que é o OD, é crucial analisar o nível de abertura presente num projeto de *design* específico (Figura 9). Essa avaliação torna-se essencial para comparar e contextualizar essa abordagem em relação aos conceitos já estabelecidos no universo do *design*, tais como *open innovation*, *open source*, entre outros que serão abordados posteriormente.

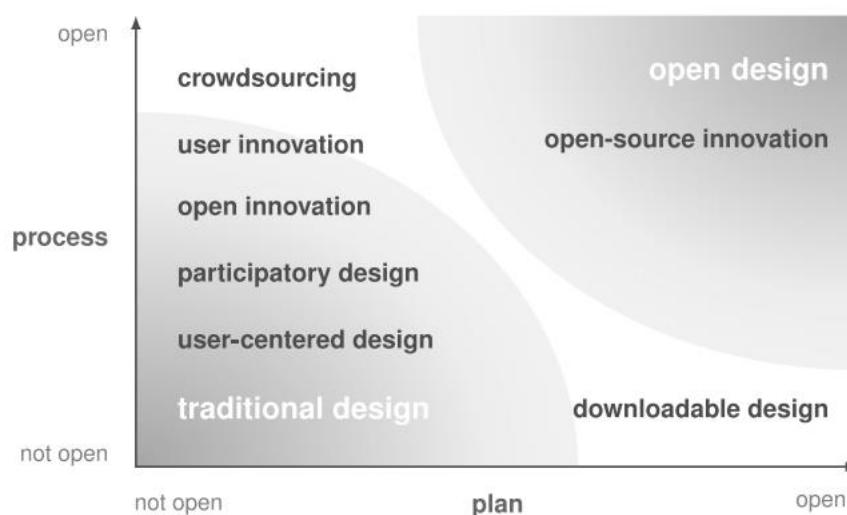


Figura 9 - *Open Design* conceitos relativos. Fonte:[45]

2.3.1. Openness

A característica "*Openness*" está intrinsecamente associada ao grau de acessibilidade que algo oferece para ser visualizado, modificado e utilizado. Essas três operações fundamentais constituem a essência da acessibilidade. A capacidade de visualização implica a partilha de conteúdo e a disponibilidade de informações detalhadas sobre o assunto. Em contrapartida, a capacidade de modificação refere-se à partilha do trabalho, permitindo mudanças, melhorias e extensões no objeto. Por fim, a habilidade de utilização envolve a partilha da propriedade e a oportunidade de reutilizar, parcial ou integralmente, o objeto. Estas são as três operações fundamentais que estão implicadas pela acessibilidade e que permitem que a *openness* se relacione com a transparência e a permeabilidade de quaisquer fronteiras naturais ou construídas [46].

A tendência atual da abordagem "aberta" engloba uma ampla gama de interesses e setores específicos, resultando na formação de várias vertentes, tais como o *Open Design*, *Open Data*, *Open Source*, *Open City*, *Open Innovation*, *Open Government*, *Open Education* e *Open Science*. Essa proliferação de conceitos evidencia a abrangência e a diversidade de áreas que adotam a filosofia da abertura, refletindo uma crescente adesão a esses princípios em diferentes domínios e contextos [47]. No decorrer deste subcapítulo, serão explorados os conceitos de *Open Innovation* (Inovação aberta), *Open Source* (Código aberto) e *Open Production* (Produção aberta), considerados significativos para a compreensão aprofundada do tema em análise.

2.3.2. Open Innovation

Open Innovation (OI) é um conceito proposto pelo professor Henry Chesbrough, num primeiro livro sobre OI em 2003. O autor desafia a ideia tradicional de inovação, que historicamente se concentrava em pesquisas internas e desenvolvimento de produtos dentro das fronteiras de uma empresa. Em contrapartida, a *Open Innovation* apresentada por Chesbrough propõe que as empresas devem olhar para além das suas próprias estruturas e procurar ativamente ideias, recursos e colaborações externas para impulsionar o processo de inovação [48].

Essa abordagem incentiva as empresas a não dependerem exclusivamente de seus recursos e conhecimentos internos para inovar. Pelo contrário, as empresas são encorajadas a estabelecer parcerias estratégicas, colaborações com outras empresas, instituições de pesquisa, *startups* e até mesmo consumidores finais, permitindo a partilha de ideias, conhecimentos e recursos e impulsionando o desenvolvimento de novos produtos, serviços ou processos que proporcionam uma abordagem mais aberta, colaborativa e inclusiva para a inovação [49].

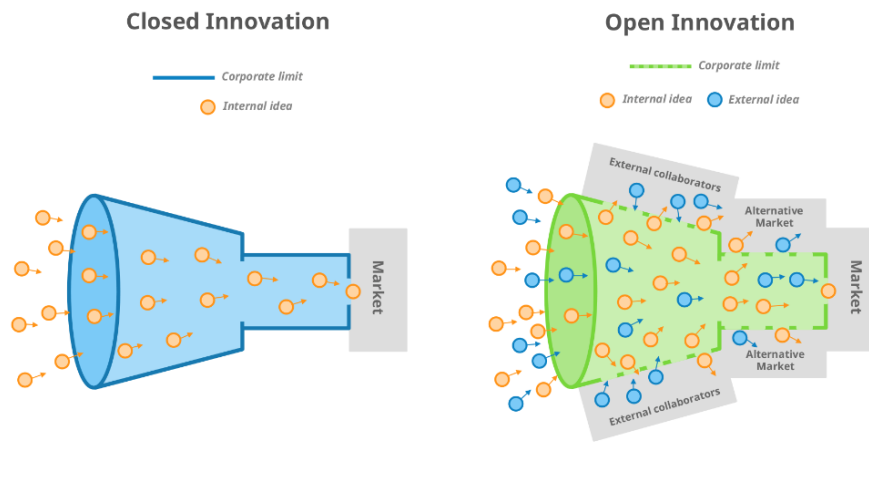


Figura 10 - Inovação fechada vs. Inovação aberta (OI). Fonte: [50]

A análise da Figura 10 revela a dinâmica dos diferentes tipos de inovação. No lado direito, observa-se o modelo de inovação fechada, onde os projetos e ideias circulam internamente, limitados pelas fronteiras corporativas. Nesse cenário, não há interação com o ambiente externo, as ideias são geradas e desenvolvidas internamente até atingirem o mercado previamente planejado. Por outro lado, à esquerda, as ideias não só têm origem interna na empresa, como também são absorvidas do exterior. Deste modo, as ideias internas podem ultrapassar as fronteiras organizacionais e ser desenvolvidas fora da empresa para atender a mercados que inicialmente não estavam contemplados [44].

Chiaroni, Chiesa e Frattinisão delinearam três eixos que fundamentam o enquadramento teórico da *Open Innovation*. Esses eixos compreendem as dimensões da OI, as alavancas da gestão e os processos de adoção da OI. A Figura 11 apresenta uma representação visual desses eixos, oferecendo uma visão esquemática e organizada do conceito [51].

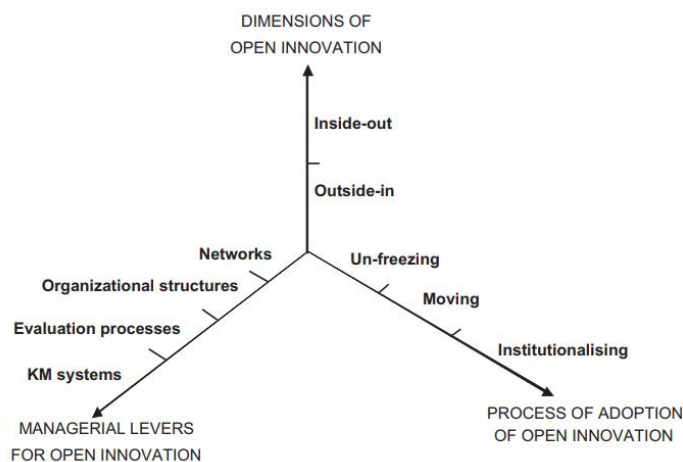


Figura 11 - Enquadramento teórico de *Open Innovation*. Fonte: [52]

2.3.3. *Open Source*

A Definição de Open Source (OS) funciona como uma declaração de direitos para o utilizador de computador e estabelece os direitos que uma licença de *software* deve conceder para ser considerada como OS. Estes programas, como o sistema operativo Linux e o navegador web da Netscape, tornaram-se extremamente populares, deslocando outros *softwares* com licenças mais restritivas. As empresas que optam por *software Open Source* têm a vantagem de um desenvolvimento rápido, muitas vezes com a colaboração de várias empresas e indivíduos, que contribuem com melhorias para atender às suas próprias necessidades [53].

Os voluntários que tornaram possíveis produtos como o Linux só conseguem fazê-lo devido aos direitos associados ao *Open Source*. Estes programadores sentem-se à vontade para contribuir para o OS porque têm a garantia dos seguintes direitos [53]:

- O direito de fazer cópias do programa e distribuí-las.
- O direito de aceder ao código-fonte do *software*, um passo essencial antes de poder modificá-lo.
- O direito de fazer melhorias no programa.

Estes direitos são imprescindíveis, uma vez que mantêm todos os intervenientes no mesmo patamar. Qualquer pessoa pode vender um programa OS, o que mantém os preços baixos e acelera o desenvolvimento para alcançar novos mercados. Isto dá aos utilizadores a opção de fornecer o seu próprio suporte ou optar por vários fornecedores concorrentes. Qualquer programador pode adaptar um programa *Open Source* a mercados específicos para chegar a novos clientes. Estas ações não estão sujeitas a pagamentos de *royalties* ou taxas de licença [54].

2.3.4. *Open Production*

O paradigma da sociedade industrial está em transição para uma sociedade do conhecimento, onde os fatores 'conhecimento' e 'informação' ganham cada vez mais importância em relação aos fatores clássicos de produção [55].

O processo de criação de valor é cooperativo, descentralizado e auto-organizado. As fronteiras das empresas estão a dissolver-se, à medida que a cooperação cresce em projetos e redes entre partes interessadas de diferentes empresas. Para acompanhar o desenvolvimento e a competição global, as empresas enfrentam o desafio de se adaptar a essas mudanças. A capacidade de troca e gestão do conhecimento tem um papel cada vez mais relevante na competitividade das empresas [56].

A cooperação de partes interessadas autónomas no processo de criação de valor gera efeitos positivos de emergência, que geram um maior valor agregado. Esses efeitos são emergentes quando não podem ser atribuídos a um único elemento do sistema ou à soma das propriedades dos elementos do sistema, mas constituem sinergias de forma imprevisível e irredutível [57].

No processo de criação de um produto, baseado na abordagem de OP, existem três etapas que podem ser analisadas (Figura 12):

1. *Design* e desenvolvimento;
2. Produção;
3. Marketing e vendas.

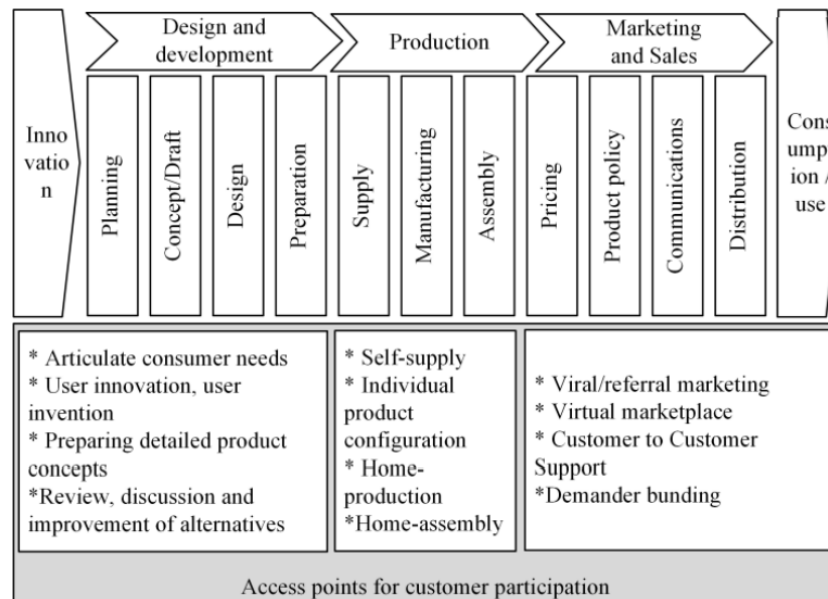


Figura 12 - Processo de criação de um produto em OP. Fonte: [57]

De realçar que a Produção Aberta é viável devido ao conhecimento sobre o processo de produção, ao desenvolvimento tecnológico das TIC e ao avanço nos sistemas de produção. O *hardware* de código aberto é uma parte desse conceito, baseado na publicação das informações necessárias para a construção de fábricas e o fabrico de peças, permitindo a todos o acesso a essas informações [56].

2.4. Fábrica de Aprendizagem

O conceito fundamental da abordagem de aprendizagem das *Learning Factories (LF)*, fábricas de aprendizagem, é fornecer uma experiência prática e integrada de *design* e fabrico que seja significativa para os alunos, permitindo-lhes aplicar os conhecimentos teóricos num contexto real de produção. Isso é alcançado através de uma variedade de atividades que incluem desde aulas expositivas até simulações realistas de sistemas de produção. Os alunos têm a oportunidade de analisar e otimizar processos, o que fortalece a sua compreensão prática e técnica [58].

A abordagem de aprendizagem baseada em tarefas permite que os alunos desenvolvam competências técnicas de produção de forma eficaz, ao mesmo tempo em que se envolvem em processos de trabalho realistas. Adicionalmente, a integração de recursos físicos e digitais proporciona uma experiência de aprendizagem holística, na qual os alunos podem visualizar e

compreender tanto os aspetos práticos quanto os conceituais do processo de fabrico [58]. Assim, é possível ensinar o conteúdo do currículo de uma forma mais orientada para a prática.

As vantagens de um ambiente de fabrico do mundo real podem ser usadas tanto para a educação académica de estudantes universitários como para a formação de trabalhadores da indústria. Cada vez mais empresas estão convencidas que este conceito é uma mais-valia, razão pela qual estão a implementar fábricas de aprendizagem para qualificar os seus especialistas, desde o chão de fábrica até ao nível de gestão. O principal objetivo das LF é sempre transmitir uma visão complexa dos processos de negócios e transmitir métodos, conceitos e técnicas que permitam a deteção de potenciais de melhoria e a implementação de processos mais eficientes [59].

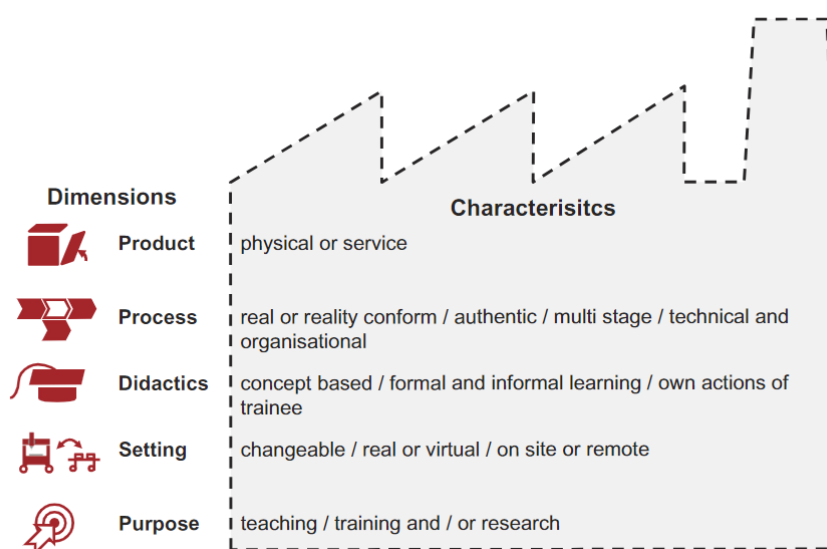


Figura 13 – Principais características de uma *Fábrica de Aprendizagem*. Fonte: [60].

2.4.1. *Fábrica de Aprendizagem*: Origem

O conceito de fábrica de aprendizagem surgiu no final dos anos 80 com a construção da *Computer-Integrated Manufacturing (CIM) learning factory*, localizada em Estugarda (Alemanha). Este conceito foi projetado e implementado após se verificar uma limitação das aulas teóricas e expositivas no desenvolvimento da aprendizagem dos alunos [61]. Este programa de qualificação associado ao CIM aborda a utilização de computadores para controlar todo o processo produtivo [62].

No entanto, o termo LF foi pela primeira vez apresentado e patenteado em 1994, após despertar o interesse dos Estados Unidos da América (EUA), com a instalação da primeira fábrica de aprendizagem ao encargo do professor Bernard M. Gordon, da *Penn State University* com o apoio de uma bolsa disponibilizada pela *National Science Foundation (NSF)* [63]. Este modelo de ensino a estudantes, já na sua fase prematura focava-se na experiência prática que poderia ser adquirida ao aplicar os conhecimentos de engenharia de modo a resolver problemas reais, tal como poderiam ser encontrados na indústria e design de produtos de modo a satisfazer necessidades identificadas. Para além do ensino a estudantes, surgiram também

LF's direcionadas a trabalhadores das indústrias, que pretendiam qualificar os trabalhadores da indústria na área de produção integrada por computadores [64].

Mais tarde, a partir do ano de 2005, ocorreu uma nova vaga no que toca ao desenvolvimento das fábricas de aprendizagem, à qual, vários autores como Abele, Tisch, entre outros, denominaram como segunda fase de desenvolvimento das LF's [61], [64]. Desta vez, foi na Europa que surgiu maior interesse nesta área e, conseqüentemente, foram inauguradas diversas LF's nas mais diferentes áreas, como I4.0, *Lean manufacturing*, montagem manual e semiautomática, logística e controlo de qualidade [65]. Nesta fase de desenvolvimento, verificou-se um crescimento superior no que diz respeito ao número de documentos publicados no Google Scholar, do que na primeira fase de desenvolvimento, ilustrado na Figura 14.

Em 2011 foi fundada a *Initiative on European Learning Factories* (IELF) através da união de diversas LF's distribuídas pela Europa e realizou-se a primeira conferência sobre fábrica de aprendizagem na cidade de Darmstadt (Alemanha). A criação da IELF foi o motor para uma colaboração em toda a Europa, envolvendo a participação de 18 países para o desenvolvimento de projetos de investigação [65]. Posteriormente, foi estabelecido, em 2014, um grupo de trabalho colaborativo (CWG – *Collaborative Working-Group*), com o intuito principal de organizar a pesquisa relativamente às fábricas de aprendizagem a nível global, formar um consenso sobre os termos utilizados na área, estudar o estado da arte do conhecimento, reforçar as ligações entre o mundo académico e a indústria e, por fim, publicar um documento com os resultados desta pesquisa. Este documento foi publicado em 2017 com o seguinte título: “*Learning Factories for future-oriented research and education in manufacturing*” e será explorado no próximo subcapítulo [66].

Nos últimos anos, a comunidade tem crescido e a informação científica em documentos publicados sobre o tema é cada vez mais abundante, como se pode verificar na Figura 14, a quantidade de artigos no *Google Scholar* associados aos termos *Learning Factories*, *Teaching Factory* ou *Lernfabrik* (em alemão) tem crescido exponencialmente ao longo das três fases de desenvolvimento das LF's [61].

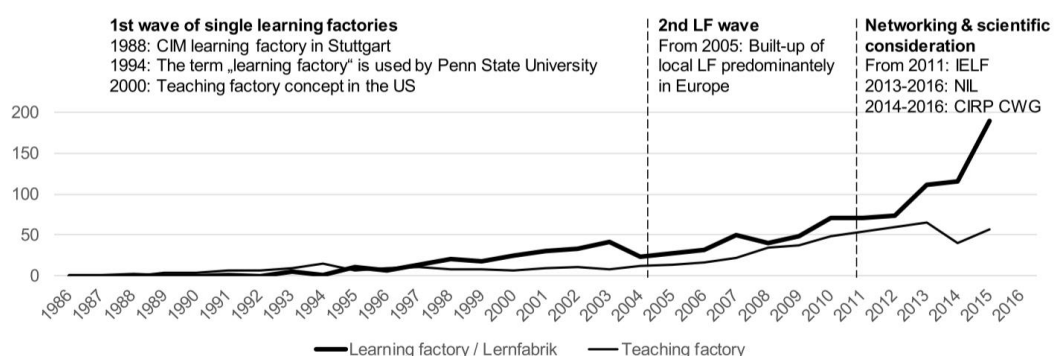


Figura 14 - Evolução do número de documentos publicados no Google Scholar relacionados com *Fábricas de Aprendizagem*. Fonte:[61].

2.4.2. Fábrica de Aprendizagem: Morfologia

Ao longo das três fases mencionadas anteriormente, observou-se que os autores publicaram documentos com divergências acentuadas no que diz respeito à morfologia e aos objetivos de uma LF. Notavelmente, houve inúmeras disparidades nas dimensões de uma LF e nas características associadas a essas dimensões, ilustradas na **Error! Reference source not found.**

Tabela 3 - Diferentes modelos de classificação de LF.

Autores	Dimensões	Características
Wagner U, AlGeddawy T, ElMaraghy H, Müller E [67]	5	0
Tisch M, Hertle C, Cachay J, Abele E, Metternich J, Tenberg R [68]	1	11
Steffen M, Frye S, Deuse J [69]	3	25

Para absorver as mudanças emergentes no campo das LF's, o CWG, em colaboração com o projeto *Network of Innovative Learning Factories* (NIL), desenvolveu um modelo descritivo multidimensional. Este modelo foi criado com três objetivos principais, conforme descrito por Tisch e Abele [65], [66]:

- Fornecer uma ferramenta para delinear as fábricas de aprendizagem existentes, facilitando sua caracterização e comparação;
- Orientar e criar diretrizes para definir e estabelecer novas fábricas de aprendizagem, proporcionando um ponto de partida claro para o *design* e criação;
- Promover a padronização do conceito de LF, assegurando um entendimento consensual e uniforme.

Este esforço conjunto entre a CWG e a NIL visa assegurar que as LF's possam evoluir de maneira consistente e padronizada, refletindo as melhores práticas e inovações do campo. O modelo abrange 7 dimensões (Figura 15), que incluem 60 características e seus atributos relacionados. A ampla aceitação e universalidade deste modelo são atribuídas ao grande número de instituições que participaram na sua elaboração.

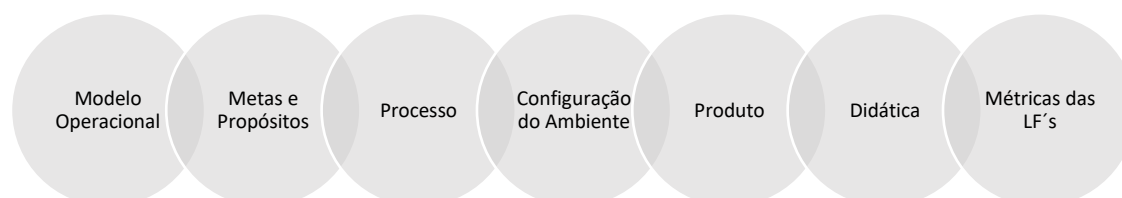


Figura 15 – 7 Dimensões de uma fábrica de aprendizagem.

Segue-se uma sucinta apresentação de cada uma das dimensões, as suas características e atributos definidos no modelo consensual de classificação de morfologia. Nos ANEXOS A a G podem ser observadas as sete dimensões com as diferentes características e atributos associados a cada uma de forma tabelada.

1. Modelo Operacional

O modelo operacional assegura o desenvolvimento e a melhoria contínua das fábricas de aprendizagem, promovendo o avanço das competências dos operadores. Para alcançar os objetivos desejados é crucial manter a sustentabilidade económica, bem como a continuidade de conteúdo e pessoal qualificado, o que envolve garantir recursos financeiros para cobrir os custos de equipamentos e instalação, assim como os custos operacionais e de materiais necessários para as fábricas de aprendizagem. De notar que, atualmente, as LF's são maioritariamente exploradas por instituições académicas, empresas de consultoria ou grandes empresas industriais [2], [65]. No ANEXO A pode ser observada a dimensão de Modelo Operacional das LF's com as diferentes características e atributos associados [70].

2. Metas e Propósitos

As fábricas de aprendizagem podem ser criadas com diferentes finalidades. As metas e propósitos primários de uma LF visam o ensino educacional, o treino vocacional ou a investigação e pesquisa de modo a fomentar a inovação. Numa perspetiva secundária, as LF's podem ter propósitos demonstrativos, produção industrial, a demonstração e transferência de tecnologia, propaganda para produção e testes. Nesta segunda dimensão, os grupos-alvo também são caracterizados, assim como a sua constituição, considerando-se uma constituição homogénea no que diz respeito à educação e uma constituição heterogénea relativamente à formação de trabalhadores ou à área de investigação. São também identificados vários conteúdos alvo de aprendizagem e de investigação [2], [65]. No ANEXO B pode ser observada a dimensão de Metas e Propósitos das LF's com as diferentes características e atributos associados [70].

3. Processo

Na terceira dimensão de Processo, é realizada uma descrição das potenciais limitações de uma fábrica de aprendizagem, tendo em conta o ciclo de vida do produto, da própria fábrica, da procura e da tecnologia. São também detalhados os fluxos de material, o tipo de processo (em massa, série ou pontual), organização de produção, nível de automação (total ou parcialmente automatizada ou manual) e métodos de produção e tecnologia [2], [65]. No ANEXO C pode ser observada a dimensão de Processo das LF's com as diferentes características e atributos associados [70].

4. Configuração do ambiente

A dimensão de Configuração descreve o ambiente de aprendizagem proporcionado pela LF e as suas características. Distingue-se o ambiente de aprendizagem que pode variar entre dois extremos, puramente físico ou virtual, ou misto, sendo que pode ter o tamanho real ou reduzido à escala. Ao nível de sistema de trabalho, as LF's podem ser caracterizadas através da

utilização de postos de trabalho numa estação, numa fábrica ou numa rede. Os possibilitadores e dimensões de mudança são duas características desta terceira dimensão, que expressam a flexibilidade e a adaptabilidade de alterações na LF ao nível de produto, *layout*, etc. Como última característica da dimensão configuração surge a integração de IT existente, que pode ser utilizada antes do início de produção (CAD, CAM, Simulação), durante (ERP), ou depois da produção (PLM) [65]. No ANEXO D pode ser observada a dimensão de Configuração das LF's com as diferentes características e atributos associados [70].

5. Produto

O produto é um instrumento funcional em toda fábrica de aprendizagem e deve apoiar a transferência de conhecimento através das suas características inerentes. Em contraste com o processo regular de *design* de produtos, o produto utilizado numa LF é intencionalmente escolhido a partir de produtos existentes no mercado ou até mesmo desenvolvido especificamente para o uso pretendido. O produto influencia a complexidade dos cenários de aprendizagem e a sua duração. Adicionalmente, é um dos fatores que determinam os custos operacionais e afeta os requisitos para sustentar e administrar uma fábrica de aprendizagem [65].

Segundo a dimensão de Produto, os produtos podem ser produtos físicos ou serviços. Distingue-se a forma do produto, a sua origem, facilidade de comercialização, número de diferentes produtos na LF, número de componentes do produto e propósito futuro. O ciclo-de-vida do produto escolhido pode permitir que este seja reciclado entre formações ou até ter como destino final a venda [2], [65]. No ANEXO E pode ser observada a dimensão de Produto das LF's com as diferentes características e atributos associados [70].

6. Didática

Por se tratar de uma fábrica de aprendizagem, a dimensão de Didática é intrínseca na classificação e na morfologia de uma fábrica de aprendizagem. As características como o cenário de ensino, canais de comunicação, grau de autonomia, entre outras, fazem parte desta sexta dimensão. Além de descrever os resultados de aprendizagem e as classes de competências abordadas, os métodos utilizados e as condições envolventes para alcançar esses resultados são detalhados. Ainda que o conceito primórdio de uma fábrica de aprendizagem seja apoiado num ensino mais prático, esta dimensão visa reforçar que as competências teóricas são de igual modo essenciais e que a aprendizagem deve ser desenvolvida através da alternância entre a prática e a teoria [65].

Em 2019, Abele, Metternich e outros autores levantaram as seguintes questões que sumarizam a dimensão de didática das LF's [2]:

- Quais as competências e objetivos de aprendizagem que devem ser adquiridos e desenvolvidos?
- De que maneira a aprendizagem decorrerá, considerando os cenários de ensino, o formato dos módulos de aprendizagem, o grau de autonomia dos participantes e o papel dos orientadores?

- Em que tipo de ambiente ou através de que canal de comunicação será realizado o processo de aprendizagem?
- Como serão avaliadas as sessões de formação, considerando os níveis de desempenho e os instrumentos de medição de desempenho, como testes escritos ou orais, entrevistas, KPI's das fábricas, etc.?

No ANEXO F pode ser observada a dimensão de Didática das LF's com as diferentes características e atributos associados [70].

7. Métricas das Fábricas de Aprendizagem

Por fim, a dimensão de métricas descreve figuras quantitativas facilmente verificáveis, como o tamanho da área útil, o número médio de participantes por sessão e por ano, assim como o número de investigadores em tempo integral designados para a Fábrica de Aprendizagem. Esta dimensão tem o objetivo de proporcionar uma percepção mais clara da extensão física e operacional da Fábrica de Aprendizagem analisada [2], [65].

No ANEXO G pode ser observada a dimensão de Métricas das LF's com as diferentes características e atributos associados [70].

2.4.3. Fábrica de Aprendizagem: Propósitos

As fábricas de aprendizagem surgiram como uma resposta inovadora às crescentes necessidades de formação prática e desenvolvimento de competências em ambientes, quer académicos, quer industriais. Nas últimas décadas, este novo conceito expandiu globalmente, como retratado nos capítulos anteriores, e verificou-se um crescimento significativo no desenvolvimento e implementação de LF's, as quais variam significativamente em termos de tamanho, propósito, produto ou sofisticação. No entanto, todas elas têm o objetivo comum de proporcionar uma experiência de aprendizagem aprimorada tanto a nível académico, como a nível da indústria, sendo que o foco da investigação tem vindo a ganhar cada vez mais relevo, no que diz respeito aos propósitos de uma LF, particularmente nas áreas de engenharia e da produção [2].

O conceito de fábrica de aprendizagem baseia-se em três propósitos primordiais, são eles o ensino, o treino e a investigação (Figura 16). Estes propósitos guiam a estrutura e operação da LF, garantindo que atenda às necessidades específicas dos seus participantes e contribua para o avanço do conhecimento e das habilidades necessárias no ambiente industrial que está em constante desenvolvimento.

Neste subcapítulo serão abordados os três propósitos fundamentais de uma fábrica de aprendizagem e, posteriormente, apresentadas e analisadas algumas LF's já desenvolvidas e implementadas nas distintas áreas.

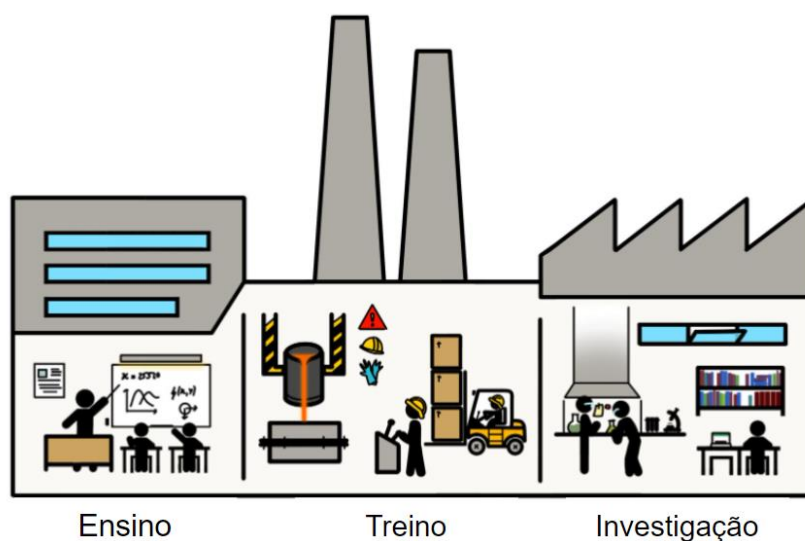


Figura 16 – Os 3 propósitos das fábricas de aprendizagem.

Propósito Ensino

Desde as primeiras implementações de fábricas de aprendizagem, como na *Penn State University* ou outros locais, a educação sempre desempenhou um papel crucial no conceito de fábrica de aprendizagem. As LF's que têm como propósito principal o ensino, podem ser divididas em dois modelos: projetos abertos com um caráter geral e cursos orientados e fechados. No primeiro caso, os projetos estudantis em fábricas de aprendizagem geralmente têm uma duração mínima de várias semanas, podendo estender-se por meses. Estes projetos envolvem estudantes ou grupos de estudantes que procuram desenvolver um *design* ou soluções técnicas ou organizacionais para requisitos ou situações problemáticas previamente definidas. Normalmente, o processo de resolução de problemas por parte dos estudantes é aberto a novas soluções criativas, não estando limitado a um caminho específico previamente determinado. Estes projetos são frequentemente ligados a questões de pesquisa atuais, o que permite que os alunos se envolvam com tópicos de pertinência atual [2].

Em certos conceitos, estes projetos de caráter geral são realizados em parceria com a indústria. Nestes casos, os estudantes colaboram diretamente com empresas, aplicando os seus conhecimentos teóricos e práticos em situações reais do mercado industrial. A orientação durante os projetos é, maioritariamente, realizada de forma flexível por supervisores, que fornecem apoio e *feedback* consoante as necessidades dos alunos, sem nunca implementar um controlo rígido sobre o processo. Este modelo promove a autonomia, a criatividade, a inovação e a capacidade de resolução de problemas, permitindo que os alunos explorem e experimentem com base nos seus interesses individuais e conhecimentos prévios, proporcionando-lhes uma experiência de aprendizagem mais holística e integrada.

Por outro lado, os cursos orientados e fechados, em contraste com os analisados previamente, são caracterizados por uma duração mais curta, geralmente várias horas ou, no máximo, alguns dias. Estes cursos podem ser realizados em sessões regulares ao longo de um período de tempo, como por exemplo integrando uma disciplina curricular. Nestes cursos, os estudantes trabalham em cenários problemáticos predefinidos que estão diretamente ligados a uma base

teórica. O processo de resolução de problemas é orientado de forma restrita, garantindo que os fins educacionais específicos são alcançados de maneira eficaz [2].

Uma outra característica que distingue estes cursos é a coordenação e o planeamento prévio entre a teoria e a prática. As sessões alternam entre momentos teóricos e momentos práticos, permitindo que os estudantes apliquem imediatamente os conceitos teóricos aprendidos em atividades práticas. Esta alternância pode ocorrer em ciclos curtos ou mais longos, dependendo do planeamento do curso e dos objetivos de aprendizagem estabelecidos [2].

Em ambos os modelos, existe uma simbiose entre a teoria e a prática, sendo que no primeiro caso o projeto é desenvolvido em ciclos longos, com o objetivo de encontrar uma solução relevante para a indústria e, no segundo caso, é desenvolvido em ciclos curtos com a finalidade de desenvolver uma solução para um problema específico.

Propósito Treino

O recurso a fábricas de aprendizagem para o desenvolvimento de competências através de treinos assemelha-se às implementações de fábricas de aprendizagem já descritas para a educação. O objetivo de utilizar uma LF para treino e formação é, em muitos casos, a disseminação rápida de conhecimento e habilidades dentro da empresa, a fim de permitir a implementação bem-sucedida de projetos de melhoria ou transformação. As fábricas de aprendizagem focadas no treino podem desempenhar diferentes papéis ou perseguir diferentes objetivos. De um modo geral, podem ser identificados três tipos de aplicação das fábricas de aprendizagem em treinos [2]:

1. **Desenvolvimento de competências:** na maioria dos casos, quando as fábricas de aprendizagem são utilizadas para fins de treino, o desenvolvimento de competências pode ser identificado como o principal objetivo. Neste caso, conceitos semelhantes aos utilizados para fins educacionais podem ser aplicados, com a diferença de que, de modo geral, o período disponível para as atividades de treino é fortemente limitado. Assim, as atividades são projetadas para maximizar a eficiência no desenvolvimento de habilidades e conhecimentos dos participantes.
2. **Gestão de mudanças:** além da finalidade primordial de desenvolvimento de competências, as LF's podem ser utilizadas como parte de abordagens de gestão de mudanças. Além dos tópicos técnicos, a motivação e a superação de barreiras internas dos participantes desempenham um papel fundamental. As fábricas de aprendizagem fornecem um ambiente controlado, onde os funcionários familiarizam-se com novas práticas e tecnologias, diminuindo a resistência às mudanças.
3. **Demonstração de novas tecnologias e inovações:** nos últimos anos, especialmente no contexto da digitalização e da Indústria 4.0, as fábricas de aprendizagem voltadas para o treino têm sido frequentemente aplicadas no campo da demonstração de novas tecnologias ou outras inovações. Podem, por exemplo, ser utilizadas abordagens baseadas em cenários ou em casos de uso elaborados para a Indústria 4.0. Estas fábricas de aprendizagem permitem que os participantes experimentem e interajam com novas

tecnologias num ambiente simulado, o que, por sua vez, facilita a compreensão e a adoção dessas inovações nas suas atividades diárias.

Em suma, as fábricas de aprendizagem de treino são ferramentas versáteis que podem ser adaptadas para diferentes objetivos, desde o desenvolvimento de competências específicas até à facilidade de gerir mudanças e a demonstração de novas tecnologias. Desta forma, as LF's tornam-se essenciais para a formação contínua e a adaptação das empresas às mudanças rápidas no ambiente industrial e tecnológico.

Propósito Investigação

A conexão entre fábricas de aprendizagem e investigação é estabelecida de dois modos distintos, são eles [2]:

- Fábricas de aprendizagem como próprio objeto de pesquisa;
- Fábricas de aprendizagem como facilitadoras de pesquisa.

Relativamente à primeira opção, nos últimos anos, a pesquisa sobre o sistema fábrica de aprendizagem tem abordado diversas questões de importância relevante. Os investigadores têm explorado as definições e caracterização de LF's, além de abordar maneiras de como classificá-las de acordo com a sua mutabilidade. Outra área de interesse inclui o *design* de fábricas de aprendizagem, módulos de aprendizagem e situações de aprendizagem. Existe também um foco significativo em como os produtos podem ser projetados, bem como na sua utilização e posterior propósito final. Adicionalmente, tópicos não visíveis, como eficiência energética, começam a ser abordados nas fábricas de aprendizagem, assim como métodos para avaliar o sucesso da aprendizagem têm sido desenvolvidos. Existe também um interesse em melhorar as fábricas de aprendizagem de forma holística, utilizando modelos de maturidade e sistemas de qualidade. Os requisitos essenciais para fábricas de aprendizagem, levando em conta todas as partes interessadas, são outra área de estudo [2].

Embora a pesquisa sobre as LF's se tenha tornado mais estruturada e detalhada e as primeiras pesquisas sobre o tema tenham sido publicadas, ainda é uma área em crescimento e no início de um campo vasto para explorar. Existem muitos tópicos adicionais que podem e devem ser abordados, como a escalabilidade das fábricas de aprendizagem, a sua eficácia e a sua aplicação nas mais recentes revoluções industriais. Estes temas são cruciais para evoluir e expandir o potencial das fábricas de aprendizagem.

Por outro lado, no contexto da engenharia de produção, as fábricas de aprendizagem emergem como poderosos facilitadores de pesquisa, desempenhando um papel crucial na ponte entre a teoria e a prática. A engenharia de produção, sendo uma ciência aplicada, visa descobrir novos conhecimentos com aplicabilidade prática. Neste campo, as questões de pesquisa frequentemente surgem da prática industrial, criando uma necessidade constante de métodos eficazes para integrar teoria e prática de maneira eficiente e segura.

Neste contexto, as fábricas de aprendizagem oferecem uma solução viável ao proporcionar um ambiente seguro e controlado para o teste e integração prática das descobertas de pesquisa. Uma LF permite que a experiência prática seja adquirida de maneira menos arriscada e a um custo mais baixo, sem comprometer a estabilidade das operações industriais reais. Estas

fábricas são adequadas para serem usadas como laboratórios para sistemas de produção, onde novos métodos, técnicas e tecnologias podem ser testados e aperfeiçoados antes de serem implementados num ambiente de produção real.

O conceito de fábricas de aprendizagem como facilitadoras de pesquisa envolve um processo estruturado que começa com o conhecimento existente e avança através das seguintes etapas representadas na Figura 17 [2]:

1. **Identificação do Problema:** Neste estágio inicial, os problemas relevantes que devem ser resolvidos são identificados com base na prática industrial e no conhecimento prévio existente.
2. **Abstração do Problema com Dados Reais:** Os problemas identificados são extraídos e modelados utilizando dados reais, permitindo uma análise mais profunda e precisa.
3. **Solução Baseada na Teoria:** Soluções potenciais são desenvolvidas com base em teorias e modelos estabelecidos, proporcionando uma base sólida para a experimentação.
4. **Realização da Solução na Prática:** As soluções teóricas são implementadas no ambiente da fábrica de aprendizagem, onde podem ser testadas em condições controladas.
5. **Verificação do Novo Conhecimento:** Finalmente, o novo conhecimento é verificado e validado através de testes práticos, assegurando a sua aplicabilidade antes de uma implementação mais ampla na prática industrial.

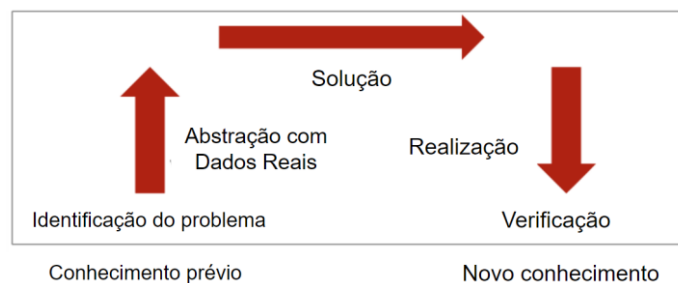


Figura 17 – LF's como facilitadores de pesquisa de acordo com Seifermann e outros [71]. Adaptado de [2].

Este processo estruturado, conforme ilustrado na Figura 17, demonstra como as fábricas de aprendizagem podem facilitar a pesquisa, fornecendo um ambiente propício para a experimentação e a validação de novas ideias. Ao atuar como facilitadoras de pesquisa, as fábricas de aprendizagem não apenas suportam a integração segura da experiência prática, mas também contribuem para a evolução contínua do conhecimento e da inovação na engenharia de produção. Desta forma, desempenham um papel vital no avanço das capacidades industriais e na promoção de melhorias contínuas nos processos de produção.

2.5. Análise crítica da revisão bibliográfica

A convergência da Indústria 5.0, dos Sistemas Ciberfísicos, do *Open Design* e da Fábrica de Aprendizagem marca uma transformação significativa na maneira como concebemos, produzimos e interagimos com a tecnologia. A Indústria 5.0 enfatiza a colaboração entre humanos e máquinas, promovendo uma abordagem centrada nas pessoas e na sustentabilidade para a inovação industrial. Em comunhão com os Sistemas Ciberfísicos, esta abordagem permite uma integração harmoniosa entre o mundo físico e digital, impulsionando processos produtivos mais ágeis e flexíveis necessário para a projeção de uma fábrica de aprendizagem.

Nesse contexto, o *Open Design* emerge como um agente crucial nessa mudança, fomentando a participação colaborativa, o acesso aberto ao conhecimento e a democratização do processo de criação. Ao estimular a transparência e a partilha de ideias, o OD fortalece a capacidade criativa coletiva, incentivando a customização e a sustentabilidade na concepção de produtos e serviços.

Assim, a interseção destes quatro pilares oferece um horizonte promissor para a evolução da indústria e da inovação. A adoção conjunta desses conceitos pode conduzir a um cenário em que a tecnologia e a inovação humana se integram de forma sinérgica, impulsionando, não apenas uma produção mais ágil, mas também uma abordagem centrada nas necessidades e nos valores da sociedade.

Por fim, a presente revisão bibliográfica servirá como base sólida da dissertação, na medida em que o seu conteúdo oferece uma compreensão detalhada dos temas que serão explorados. As informações reunidas proporcionam um entendimento valioso sobre a interseção entre a Indústria 5.0, os sistemas ciberfísicos e o *open design* e permitem o desenvolvimento de uma proposta de implementação de uma fábrica de aprendizagem assente nestes três conceitos mais sólida.

3. Métodos e Aplicação

Neste capítulo será realizado o desenvolvimento da dissertação, seguindo a metodologia DSR (Figura 18) apresentada no capítulo inicial, Introdução. Após a identificação do problema, que consiste na necessidade de uma fábrica de aprendizagem voltada para a Indústria 5.0 e apoiada nos conceitos de Sistemas Ciberfísicos (CPS) e *Open Design* (OD), delineados no capítulo anterior, o objetivo foi estabelecido: projetar uma fábrica de aprendizagem que atenda às necessidades mencionadas.

Inicialmente, é realizada uma breve pesquisa sobre o estado da arte da fábrica de aprendizagem, a sua origem e os seus princípios, examinando os desenvolvimentos atuais, propostas e soluções existentes. De seguida, são identificadas as lacunas nessas propostas, com o principal propósito de desenvolver uma nova abordagem para uma fábrica de aprendizagem orientada para a I5.0.

Após o desenvolvimento do projeto, são avaliados os artefactos criados para determinar se correspondem aos objetivos estabelecidos e se são eficazes na resolução do problema identificado. Por fim, adotou-se um processo iterativo, onde novos artefactos são iterados e são sugeridas propostas alternativas e melhorias para permitir que o projeto esteja em constante evolução, conforme preconizado pelo conceito de *Open Design*. Esta abordagem facilita a adaptação às mudanças no ambiente industrial e às necessidades emergentes, garantindo uma resposta ágil e eficaz às ao mercado.



Figura 18 - Metodologia DSR

3.1. Análise das Fábricas de Aprendizagem

Como abordado anteriormente, uma fábrica de aprendizagem pode ter como propósito o ensino, o treino ou a investigação. Adicionalmente, estes objetivos podem coexistir, permitindo que uma única LF incorpore dois ou até mesmo os três propósitos em simultâneo. O facto dos seus propósitos serem versáteis torna o desenvolvimento das capacidades dos participantes mais abrangentes.

Além do propósito, considerado a segunda das sete dimensões de uma fábrica de aprendizagem, existem outras características que distinguem as fábricas de aprendizagem já desenvolvidas e implementadas globalmente. Estas características variam de *design*, tecnologia empregada, estrutura organizacional, entre outros.

Nesse contexto, Abele, Matternich e Tish, desenvolveram uma tabela síntese, que caracteriza cada LF com base nas suas dimensões e características eminentes. A Tabela 4, elaborada em 2019, é uma ferramenta valiosa para análise comparativa das LF's, permitindo uma compreensão mais profunda das suas capacidades e limitações. Facilita, ainda, a identificação das melhores práticas entre diferentes fábricas de aprendizagem, promovendo a melhoria contínua e a inovação nos diversos campos de atuação: ensino, treino e investigação.

Tabela 4 - Morfologia de uma LF segundo o modelo descritivo multidimensional do CWG CIRP.
Fonte: [2].

2.1	Propósito Principal	Ensino			Treino		Investigação			
2.2	Propósito Secundário	Ambiente de Testes/Piloto			Produção Industrial	Transferência de Inovação		Imagem Pública		
3.1	Ciclo de Vida Produto	Desenvolvimento Produto		Planeamento Produto	Prototipagem	Manufatura	Assemblagem	Logística	Reciclagem	Serviço
3.2	Ciclo de Vida Fábrica	Conceito Fábrica	Plano Investimento	Planeamento Processo	Ramp-Up				Reciclagem	Manutenção
3.3	Ciclo de Vida Pedido	Configuração & Pedido	Sequência Pedido	Planeamento e Marcação					Recolha, Embalagem	Expedição
3.4	Ciclo de Vida Tecnológico	Planeamento	Desenvolvimento	Testes virtuais					Modernização	Manutenção
3.5	Funções Indiretas	Atividade Primárias				Atividades Secundárias				
		Logística Fluxo Entrada e Saída	Marketing & Vendas	Marketing & Vendas	Serviços	Instalações	HR	Inovação Tecnológica	Procurement	
4.1	Ambiente de Aprendizagem	Puramente Físico		Físico com Suporte Digital	Fluxo Físico estendido a Virtual		Puramente Virtual			
4.2	Escala do Ambiente	À escala						Tamanho Real		

Atualmente, a Tabela 4 ajuda a mapear a evolução das LF's ao longo do tempo, destacando como se adaptam às mudanças tecnológicas e às novas necessidades da indústria. Ao fornecer uma visão estruturada e detalhada das fábricas de aprendizagem, a tabela de Abele, Matternich e Tish tornou-se uma referência essencial quer para investigadores, quer para alunos e profissionais da indústria interessados no impacto dessas instalações nos seus respetivos domínios.

3.1.1. Exemplos de aplicação

Segundo Callupe, Negri e Fumagalli, que publicaram um artigo no seguimento da “11ª Conferência de Fábricas de Aprendizagem, (CLF2021)”, até à data, existiam cerca de 61 LF's

implementadas na Europa e a nível global, sendo que o maior crescente sucedeu-se na segunda década do séc. XXI, como se pode verificar no gráfico abaixo representado na Figura 19.

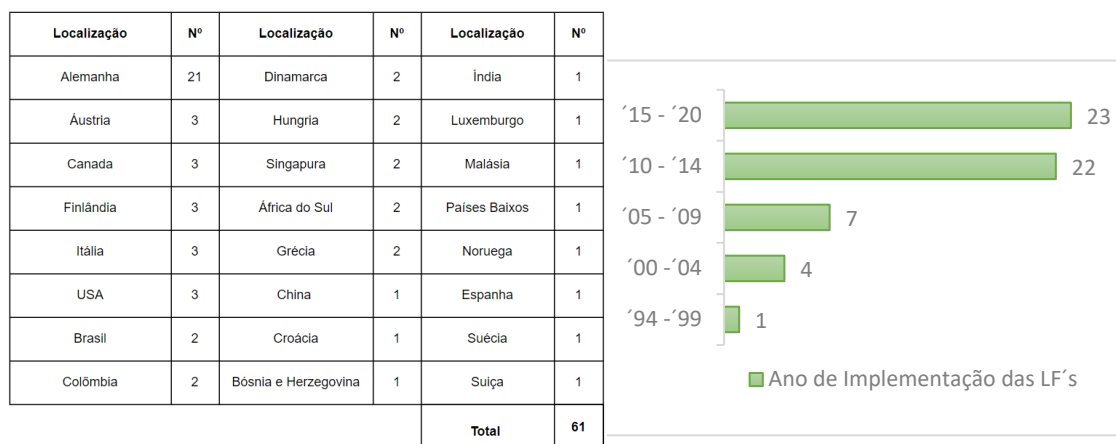


Figura 19 - Local e ano de implementação das LF's globais. Fonte: Adaptado de: [72]

A Tabela 5 seguinte reúne uma listagem de fábricas de aprendizagem dispersas globalmente, com as respetivas nomenclaturas adotadas neste documento, ano de implementação e propósitos sendo que, apesar de já estarem presentes na maioria dos continentes, a maioria das LF's está sediada na Europa, especificamente na Alemanha.

Tabela 5 - Nomenclatura, local e ano de implementação e propósitos das LF's a analisar neste documento. Fonte: [2],[72].

	Nome	Local	Ano	Propósitos
LF1	Festo Didactic Learning Factories – MPS, iCIM, CP Factory	Denkendorf, Alemanha	1989	Ensino, Treino e Investigação
LF2	Learning Factory for Innovation, Manufacturing and Cooperation	Heilbronn, Alemanha	2011	Ensino e Investigação
LF3	TU Wien Pilot Factory Industrie 4.0	Viena, Áustria	2015	Treino e Investigação
LF4	iFactory	Universidade de Windsor, Canadá	2011	Ensino, Treino e Investigação
LF5	AutFab	Universidade de Ciências Aplicadas de Darmstadt, Alemanha	2012	Ensino, Treino e Investigação
LF6	Die Lernfabrik	TU Braunschweig, Alemanha	2012	Ensino, Treino e Investigação
LF7	LMS Factory	Universidade de Patras, Grécia	2012	Ensino e Treino
LF8	MTA SZTAKI Learning Factory	MTA SZTAKI, Győr, Hungria	2017	Ensino, Treino e Investigação
LF9	Smart Mini-Factory	Free University of Bolzano, Itália	2012/2017	Ensino, Treino e Investigação
LF10	VPS Center of the Production Academy – BMW Group	Munique, Alemanha	2012	Treino e Investigação

Na impossibilidade de analisar detalhadamente todas as LF's apresentadas na Tabela 5, optou-se por analisar apenas 3 delas (LF1, LF2 e LF3), uma vez que, apresentam propósitos distintos. Serão abordados os propósitos, produtos e processos operacionais de cada fábrica de aprendizagem, recorrendo sempre à Tabela 4 para caracterizar cada uma delas.

1. Festo Didactic *Learning Factories* – MPS, iCIM, CP Factory

A Festo Didactic (Tabela 6), uma subsidiária da Festo Automation, desenvolve fábricas de aprendizagem desde 1989. Ao contrário da maioria, estas fábricas de aprendizagem não são operadas pela própria Festo, mas sim pelos seus clientes, que incluem instituições de formação profissional e universidades. A missão inicial da Festo Didactic era fornecer formação para produtos da Festo, no entanto, com o tempo, a empresa expandiu o seu portefólio, abrangendo áreas como tecnologia de produção, mecatrónica e eletrónica.

Tabela 6 - Dados da LF: MPS, iCIM, CP Factory. Fonte: [2]

Nome	MPS, iCIM, CP Factory
Operador	Clientes da Festo
Ano	1989
Produto(s)	Cilindros pneumáticos, kit de escritório, microcontrolador
Temas principais/ Conteúdos de aprendizagem	Automação

A primeira fábrica de aprendizagem da Festo Didactic surgiu a partir de pacotes de formação para pneumática e hidráulica, desenvolvendo o "Sistema de Produção Modular" (MPS) (Figura 20). Este sistema foi criado no âmbito de um projeto financiado em parceria com escolas vocacionais, com o objetivo de treinar competências que não podiam ser desenvolvidas nas aulas de pneumática tradicionais, relacionadas com a automação industrial. O MPS, lançado em 1990 é utilizado principalmente para simular ambientes industriais e é caracterizado como:

- Processo simplificado em comparação com as linhas de produção reais,
- Tamanho reduzido e produto reutilizável,
- Abordagem modular,
- Foco em processos de montagem e tecnologias de automação,
- Utilização de componentes industriais.

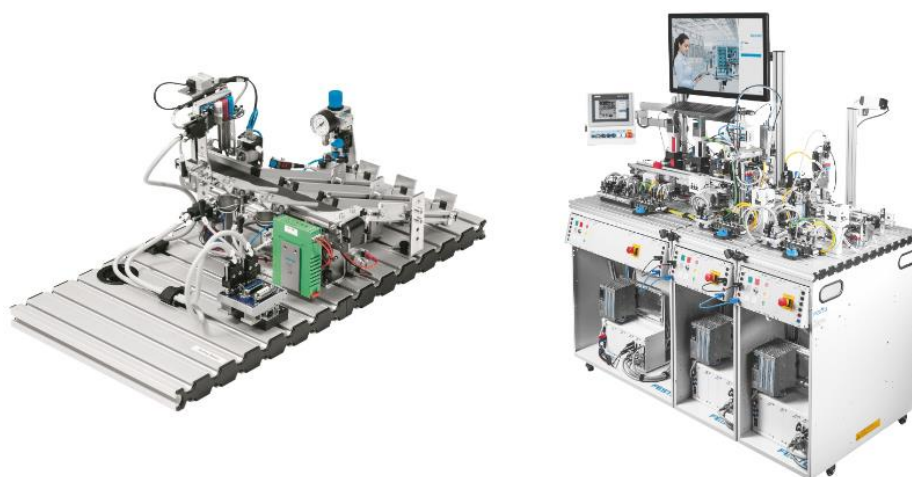


Figura 20 – Estação MPS Festo, Sistema MPS Festo. Fonte: [73].

Este sistema permite a aquisição de competências como programação de PLCs (Controladores Lógicos Programáveis), manutenção de máquinas industriais, otimização de processos de produção, configuração de linhas de produção, entre outros.

Logo após o lançamento do MPS, a Festo Didactic introduziu um novo produto, denominado iCIM, que se tornou um sucesso e levou ao desenvolvimento de soluções como:

- Máquinas CNC com robô de carga;
- Armazéns automatizados;
- Transporte flexível de material por sistemas de passareiras;
- Controladores de linhas celulares.

À medida que a procura por soluções mais complexas aumentava, a Festo Didactic desenvolveu instalações adicionais que incluíam máquinas CNC com carregamento por robô, armazéns automatizados, transporte flexível de material através de sistemas de passareiras e controladores de linha de células. Com a ascensão da Indústria 4.0, surgiram novas necessidades, que levaram ao desenvolvimento de uma nova classe de fábricas de aprendizagem denominadas *CP Factory* (Fábrica Ciberfísica), exemplificadas na Figura 21. As principais características desta nova fábrica de aprendizagem incluem:

- Transporte de material mais versátil por transporte duplo,
- Reestruturação do *layout* de módulos sem necessidade de reprogramação,
- Controlo inteligente do fluxo de material por RFID (Identificação por Radiofrequência),
- Componentes ciberfísicos como o *Stopgate* ciberfísico, um sistema de execução de produção integrado (MES),
- Conexão a serviços de produção através de *cloud*.

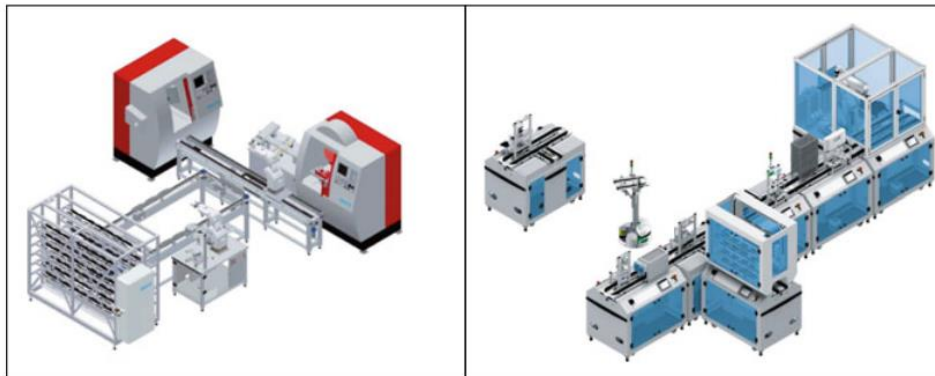


Figura 21 - iCIM, CP Factory. Fonte: [2].

Produtos das LF's da Festo Didactic

Os módulos mencionados anteriormente fabricam diversos produtos, geralmente reutilizáveis, para reduzir os custos operacionais. As fábricas de aprendizagem da Festo Didactic são projetadas para minimizar despesas através da produção de modelos de produtos que podem ser reutilizados [2].

1. O primeiro MPS produzia cilindros pneumáticos de ação simples, compostos por um corpo cilíndrico, um pistão, uma mola de compressão e uma tampa. Este cilindro podia ser montado automaticamente e permitia uma verificação simples de qualidade (cor e altura do cilindro). A simplicidade do produto refletia o objetivo principal de treinar a programação de PLCs, sem necessidade de complexidade. Representado com o número 1 da Figura 22.
2. As versões mais recentes do MPS, ilustradas pelo número 2 na figura abaixo, incorporaram unidades eletrônicas com *display*, que mantém o antigo formato de cilindro com diâmetro de 40 mm, mas com maior versatilidade ao permitir a alteração de função através de diferentes programas.
3. No iCIM, o produto associado é um kit de secretária composto por várias peças de alumínio maquinadas nas CNCs do sistema iCIM.
4. A CP Factory fabrica dispositivos eletrônicos simplificados, representado na Figura 22 pelo número 4, consistindo numa placa eletrônica e uma carcaça de duas partes. Esta solução pode incluir processos como maquinagem, perfuração, colagem e aquecimento, o que proporciona maior versatilidade e complexidade na produção.

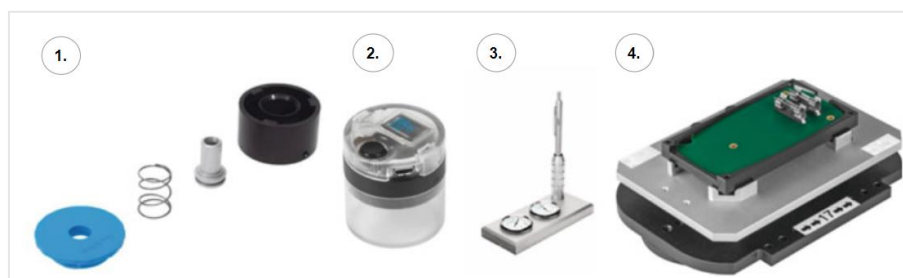


Figura 22 - Produtos LF's Festo Didactic: (1.)1ª MPS, (2.)4ª MPS, (3.) Kit Secretária, (4.) Dispositivo eletrônico. Fonte: Adaptado de [2].

Desta forma, as fábricas de aprendizagem da Festo Didactic são capazes de produzir uma gama diversificada de produtos que servem como ferramentas eficazes para o ensino e treino em automação industrial, programação de PLCs e outras habilidades técnicas relevantes.

Clientes e Ambiente Didático das LF's da Festo Didactic

As fábricas de aprendizagem da Festo Didactic são utilizadas principalmente por instituições de formação profissional e universidades para ensinar tecnologia de automação. Estas fábricas são operadas com exercícios preparados pela Festo Didactic, onde os alunos, supervisionados por professores, realizam atividades práticas. Algumas universidades também utilizam estas fábricas para projetos de investigação e resolução de problemas práticos.

O ambiente didático inclui um extenso material de apoio, como exercícios prontos para uso, programas de aprendizagem multimédia e *software* de simulação, proporcionando uma experiência de ensino completa e eficaz [2].

Por fim, de modo a caracterizar as fábricas de aprendizagem da Festo Didactic recorreu-se ao quadro da Tabela 4, de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG CIRP.

Tabela 7 - Morfologias das LF's Festo Didactic de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG. Fonte: Adaptado de [2].

2.1	Propósito Principal	Ensino			Treino		Investigação		
2.2	Propósito Secundário	Ambiente de Testes/Piloto			Produção Industrial	Transferência de Inovação		Imagem Pública	
3.1	Ciclo de Vida Produto	Desenvolvimento Produto		Planeamento Produto	Prototipagem	Manufatura Assemblagem Logística	Reciclagem		Serviço
3.2	Ciclo de Vida Fábrica	Conceito Fábrica	Plano Investimento	Planeamento Processo	Ramp-Up		Reciclagem		Manutenção
3.3	Ciclo de Vida Pedido	Configuração & Pedido	Sequência Pedido	Planeamento e Marcação			Recolha, Embalagem		Expedição
3.4	Ciclo de Vida Tecnológico	Planeamento	Desenvolvimento	Testes virtuais			Modernização		Manutenção
3.5	Funções Indiretas	Atividade Primárias				Atividades Secundárias			
		Logística Fluxo Entrada e Saída	Marketing & Vendas	Marketing & Vendas	Serviços	Instalações	HR	Inovação Tecnológica	Procurement
4.1	Ambiente de Aprendizagem	Puramente Físico		Físico com Suporte Digital	Fluxo Físico estendido a Virtual		Puramente Virtual		
4.2	Escala do Ambiente	À escala					Tamanho Real		

2. Learning Factory for Innovation, Manufacturing and Cooperation

Em 2011, um estudo realizado em Colónia, na Alemanha, revelou que, embora 30 a 70% das empresas estivessem geralmente satisfeitas com as habilidades profissionais e sociais dos recém-formados, ainda existiam lacunas significativas de competência em várias áreas essenciais: aquisição de novos conhecimentos, autonomia no trabalho, comunicação, trabalho em equipa, aplicação de conhecimentos de engenharia e resolução de problemas [74].

Para enfrentar estas necessidades identificadas, após uma análise detalhada de diversas abordagens didáticas, os professores do curso "Gestão de Produção e Processos" concluíram que uma abordagem baseada em projetos seria a mais adequada para alcançar os resultados de aprendizagem desejados e satisfazer as expectativas da indústria no nível de qualificação

necessário. Foi então que, no mesmo ano, foi inaugurada a *Learning Factory for Innovation, Manufacturing and Cooperation* (Tabela 8) em Heilbronn, Alemanha, uma nova LF baseada em projetos que colocam uma tarefa real e significativa no centro das atividades dos alunos [75].

Tabela 8 - Dados da *Learning Factory for Innovation, Manufacturing and Cooperation*.

Nome	<i>Learning Factory for Innovation, Manufacturing and Cooperation</i>
Operador	Faculdade de Engenharia Industrial e de Processos da Universidade de Ciências Aplicadas de Heilbronn, Alemanha
Ano	2011
Produto(s)	Um produto novo e diferente por semestre.
Temas principais/ Conteúdos de aprendizagem	Métodos e técnicas para o desenvolvimento de produtos, cooperação entre departamentos e tecnologias de produção.

Na Fábrica de Aprendizagem de Heilbronn, todos os alunos do 6º semestre participam numa empresa fictícia denominada "*HHN Parts and Products*", cujo objetivo é cooperar para projetar e fabricar um novo produto com base nas especificações fornecidas pelos professores, que incluem requisitos técnicos, orçamento e prazos, simulando realisticamente um projeto industrial real com todos os seus processos envolvidos (Figura 23).

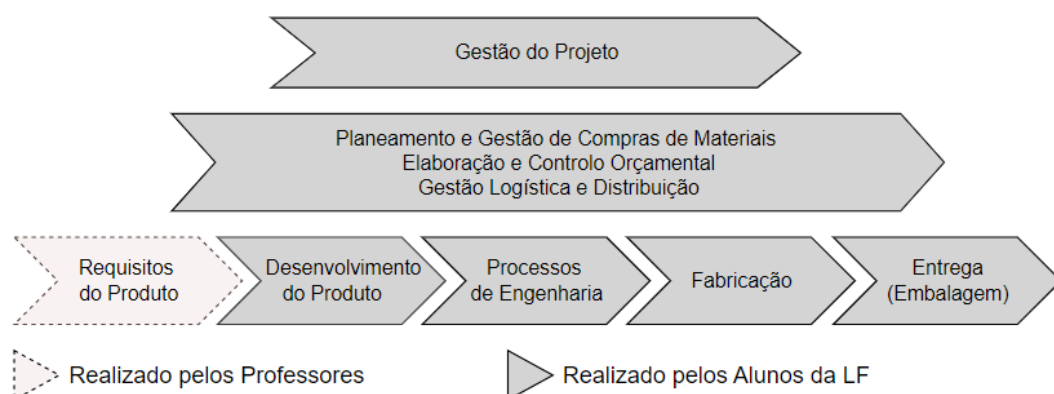


Figura 23 - Processos inerentes da *Learning Factory for Innovation, Manufacturing and Cooperation*.

Fonte: Adaptado de [75].

Os produtos variam de semestre para semestre. Exemplos de semestres anteriores incluem um pendulo de areia, um modelo de moinho de vento fotovoltaico, um motor Mendocino e um barco "Pop Pop", identificados na Figura 24. Todos eles de tamanho semelhante, nunca maior do que uma caixa de sapatos, utilizada como referência neste parâmetro. Embora seja importante fornecer detalhes tecnicamente exigentes como parte da tarefa principal, o processo contínuo de resolução de problemas e os desafios organizacionais que surgem são valorizados tanto quanto a solução técnica em si.

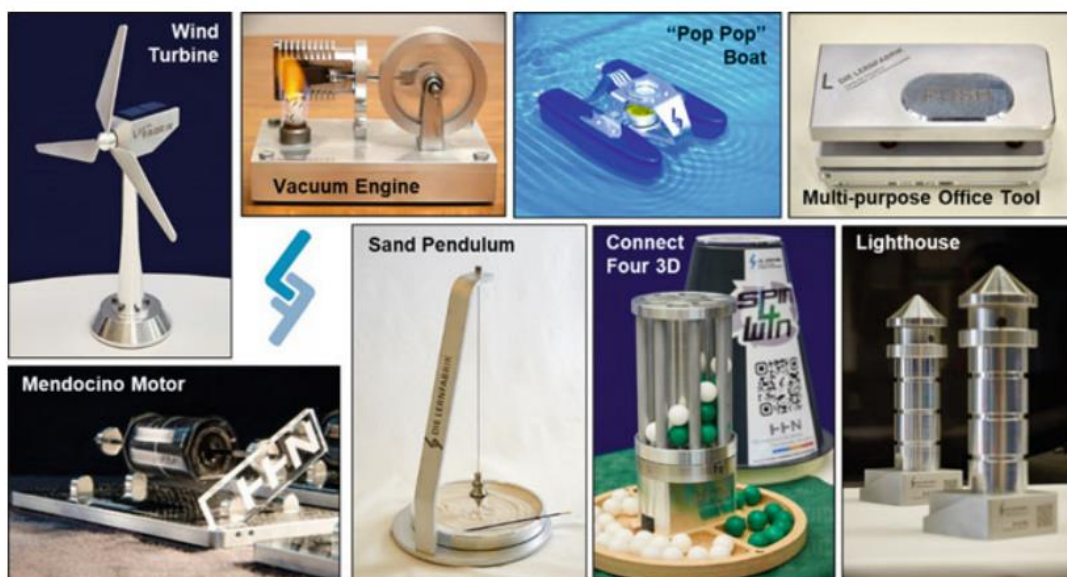


Figura 24 -Exemplos de produtos fabricados na *Learning Factory for Innovation, Manufacturing and Cooperation*. Fonte: [2].

A fábrica de aprendizagem permite, assim, que os alunos simulem completamente uma empresa iniciante no mundo real, num ambiente industrial autêntico. Compreendendo 570 m² de espaço contínuo de piso de fábrica com equipamentos técnicos e mais 230 m² de trabalho para os alunos.

Por se tratar de uma unidade curricular obrigatória do 6º semestre, cerca de 20 a 35 alunos participam no projeto da LF duas vezes por ano. Uma equipa de até oito professores e membros adicionais da equipa supervisionam o desenvolvimento académico, assegurando a orientação adequada para diversas funções desempenhadas pelos estudantes ao longo do processo de criação do produto. Embora o produto varie de semestre para semestre, o cronograma do projeto e as suas datas e prazos são padronizados. Além da aplicação e aprofundamento do conhecimento factual e métodos de trabalho, a fábrica de aprendizagem visa fortalecer as capacidades de comunicação, cooperação e gestão de projetos interdepartamentais dos estudantes, preparando-os para o futuro emprego na indústria.

Desde a sua introdução em 2011, mais de 160 estudantes experimentaram a LF na Universidade de Heilbronn. Um processo formalizado de avaliação por questionários e *workshops* de *feedback* foi estabelecido para melhorar o conceito e avaliar o desenvolvimento das capacidades dos estudantes. Os resultados, apresentados na Figura 25, mostram clara evidência dos efeitos de aprendizagem em áreas como comunicação, trabalho em equipa, resolução de problemas e pensamento interdisciplinar.

Métodos e Aplicação

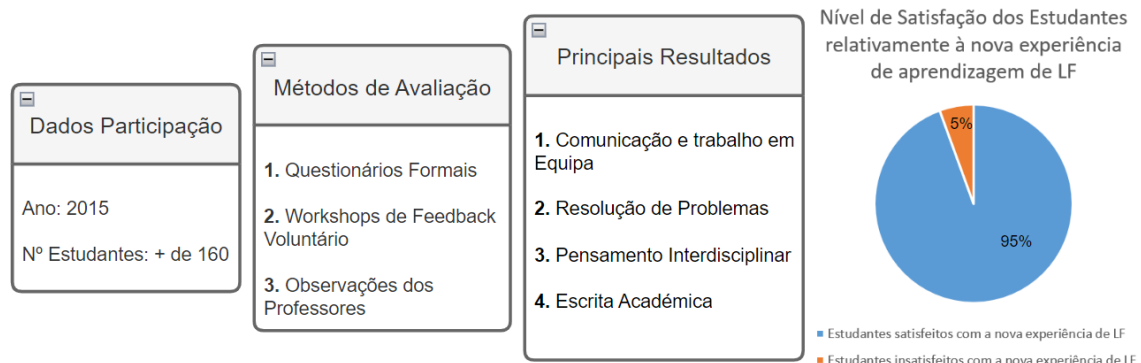


Figura 25 - Avaliação da fábrica de aprendizagem da Universidade de Heilbronn. Fonte: [75].

Uma vez mais, recorreu-se à tabela síntese de Abele, Metternich e Tisch para caracterizar a fábrica de aprendizagem de Heilbronn na Tabela 9, consoante as suas morfologias.

Tabela 9 - Morfologias da *Learning Factory for Innovation, Manufacturing and Cooperation* de Heilbronn de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG.

Fonte: Adaptado de [2].

2.1	Propósito Principal	Ensino				Treino		Investigação				
2.2	Propósito Secundário	Ambiente de Testes/Piloto				Produção Industrial		Transferência de Inovação		Imagem Pública		
3.1	Ciclo de Vida Produto	Desenvolvimento Produto		Planeamento Produto	Prototipagem	Manufatura	Assemblagem	Logística	Reciclagem		Serviço	
3.2	Ciclo de Vida Fábrica	Conceito Fábrica	Plano Investimento	Planeamento Processo	Ramp-Up				Reciclagem		Manutenção	
3.3	Ciclo de Vida Pedido	Configuração & Pedido	Sequência Pedido	Planeamento e Marcação					Recolha, Embalagem		Expedição	
3.4	Ciclo de Vida Tecnológico	Planeamento	Desenvolvimento	Testes virtuais					Modernização		Manutenção	
3.5	Funções Indiretas	Atividade Primárias					Atividades Secundárias					
		Logística Fluxo Entrada e Saída	Marketing & Vendas	Marketing & Vendas	Serviços	Instalações	HR	Inovação Tecnológica	Procurement			
4.1	Ambiente de Aprendizagem	Puramente Físico		Físico com Suporte Digital		Fluxo Físico estendido a Virtual		Puramente Virtual				
4.2	Escala do Ambiente	À escala						Tamanho Real				

3. TU Wien Pilot Factory Industrie 4.0

Após o sucesso do seu primeiro projeto de LF, “*Learning & Innovation Factory*” (LIF), a TU Wien (Universidade Técnica de Viena) foi premiada com fundos significativos para implementar uma segunda instalação, a TU Wien Pilot Factory Industry 4.0 (TU PL), com a participação do Instituto de Ciências de Gestão (IMW), o Instituto de Tecnologia de Produção (IFT) e o Instituto de *Design* de Engenharia e Logística (IKL) [2]. Enquanto o primeiro projeto tinha um foco claro no ensino e aprendizagem, a *Pilot Factory Industrie 4.0*, inaugurada em 2015, é primariamente um ambiente de pesquisa, teste/avaliação e demonstração. Todas as semanas, a Pilot Factory Industrie 4.0 abre portas ao público para demonstrações, refletindo o seu caráter como um espaço aberto para inovação e transferência de tecnologia [2].

Tabela 10 - Dados da TU Wien Pilot Factory Industry 4.0

Nome	<i>TU Wien Pilot Factory Industrie 4.0</i>
Operador	TU Wien, Austria
Ano	2015
Produto(s)	Impressões 3D
Temas principais/ Conteúdos de aprendizagem	Virtualização da fábrica, produção adaptativa, sistemas ciberfísicos e logística

A Fábrica Piloto da TU Wien foca-se em novos conceitos para a produção em série multivariada na indústria de produção discreta. Numa área disponível de aproximadamente 900 m², é demonstrado o desenvolvimento de uma impressora 3D FDM desde o *design*, produção de peças mecânicas e montagem até a expedição ao cliente final. Para divergir para uma Indústria 4.0 de forma eficaz, os processos de produção têm de ser significativamente alterados, o que apresenta um risco para pequenas e médias empresas (PMEs), uma vez que carecem dos recursos necessários, como tempo, equipamento e conhecimento especializado. As empresas beneficiam de um ambiente seguro onde novas tecnologias podem ser testadas e experimentadas num cenário realista, semelhante à indústria, antes de serem transferidas para sua própria produção. Nestes ambientes colaborativos de aprendizagem, estudantes e estagiários interessados da indústria adquirem competências metodológicas, sociais e pessoais para enfrentar os desafios futuros na produção [2], [76].

Ao contrário do termo “fábrica de aprendizagem”, os termos “fábrica piloto” e “fábrica de demonstração” são pouco definidos na literatura. Uma fábrica piloto é uma instalação que permite a pesquisa, desenvolvimento e avaliação de protótipos num ambiente realista sem interromper os processos de produção existentes. O foco está em testar novos conceitos e gerar novos conhecimentos. Por outro lado, uma fábrica de demonstração permite a comunicação de conceitos já testados e conhecimentos de ponta para partes interessadas e para o público em geral. A TU PF oferece um modelo inovador que combina em simultâneo os três conceitos de fábrica Figura 26. Este ambiente dinâmico possibilita o desenvolvimento de protótipos avançados, a demonstração de tecnologias de Indústria 4.0 e a integração prática e teórica para estudantes e profissionais [76].

1. TU Wien Pilot Factory Industrie 4.0 como Fábrica Piloto:
 - Permite o desenvolvimento de protótipos num ambiente protegido.
 - Proporciona um processo estruturado e eficiente de desenvolvimento e teste.
 - Treina funcionários da empresa diretamente no protótipo.
2. TU Wien Pilot Factory Industrie 4.0 como Fábrica de Demonstração:
 - Demonstra os conceitos da Indústria 4.0 para especialistas e público.
 - Oferece tours guiados mostrando conectividade, automação e colaboração humano-máquina.
3. TU Wien Pilot Factory Industrie 4.0 como Fábrica de Aprendizagem:
 - Integra prática com teoria para estudantes e profissionais.
 - Oferece cursos práticos como “Criação Integrativa de Produto” e “DigiTrans 4.0”.

- Facilita a cooperação entre parceiros científicos e empresariais para a implementação de tecnologias futuras.

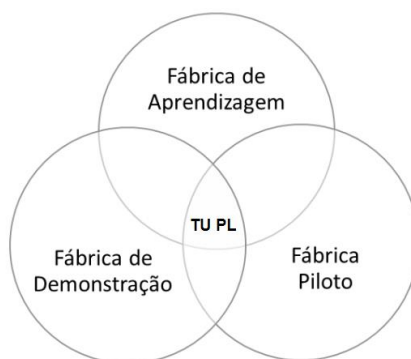


Figura 26 - Modelo da TU PF: Inter-relação entre Fábrica Piloto, Fábrica de Demonstração e Fábrica de Aprendizagem. Fonte: Adaptado de [2], [76].

Tabela 11 - Morfologias da TU Wien Pilot Factory Industry 4.0 de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG.

2.1	Propósito Principal	Ensino				Treino		Investigação			
2.2	Propósito Secundário	Ambiente de Testes/Piloto				Produção Industrial		Transferência de Inovação		Imagem Pública	
3.1	Ciclo de Vida Produto	Desenvolvimento Produto		Planeamento Produto	Prototipagem	Manufatura	Asserblagem	Logística	Reciclagem		Serviço
3.2	Ciclo de Vida Fábrica	Conceito Fábrica	Plano Investimento	Planeamento Processo	Ramp-Up				Reciclagem		Manutenção
3.3	Ciclo de Vida Pedido	Configuração & Pedido	Sequência Pedido	Planeamento e Marcação					Recolha, Embalagem		Expedição
3.4	Ciclo de Vida Tecnológico	Planeamento	Desenvolvimento	Testes virtuais					Modernização		Manutenção
3.5	Funções Indiretas	Atividade Primárias				Atividades Secundárias					
		Logística Fluxo Entrada e Saída		Marketing & Vendas	Marketing & Vendas	Serviços	Instalações	HR	Inovação Tecnológica	Procurement	
4.1	Ambiente de Aprendizagem	Puramente Físico		Físico com Suporte Digital	Fluxo Físico estendido a Virtual			Puramente Virtual			
4.2	Escala do Ambiente	À escala						Tamanho Real			

Todas as fábricas de aprendizagem analisadas seguem o conceito e a designação elaborada pelo Grupo de Trabalho Colaborativo CWG descritos no ponto 3.1.1 (Origem das LF) deste documento. No entanto, distinguem-se morfologicamente e principalmente pelos seus propósitos específicos. As fábricas de aprendizagem da Festo são estruturas abrangentes e completas que integram os três propósitos primordiais: educação, treino e investigação. A *Learning Factory for Innovation, Manufacturing and Cooperation* de Heilbronn, por sua vez, concentra-se principalmente na educação e ensino de estudantes universitários, com a investigação em segundo plano. Por fim, a TU Wien Pilot Factory foca-se em novos conceitos para a produção em série multivariada na indústria de produção discreta, priorizando a investigação e o treino, enquanto o fator de demonstração também desempenha um papel importante.

Estas três fábricas são apenas alguns exemplos das muitas fábricas de aprendizagem existentes a nível global. Tal como a TU PF, que trabalha voltada para a Indústria 4.0, a maioria das fábricas de aprendizagem tende a moldar-se e reestruturar-se continuamente para acompanhar as consequentes revoluções industriais.

3.1.2. Limitações das Fábricas de Aprendizagem da I4.0

A introdução das LF's foi um passo fundamental para o desenvolvimento de competências na Indústria 4.0. Com o fornecimento de ambientes em que os alunos podem aplicar conhecimentos teóricos em aplicações práticas, de forma a simular situações industriais. Porém, com a evolução rumo a uma nova era industrial, a Indústria 5.0, é necessário indentificar, e posteriormente superar, as limitações das LF's atuais para que continuem a ser relevantes e eficazes nesta nova revolução industrial.

Ainda referir que a Indústria 4.0 destaca-se pela integração de CPS, pela automação avançada e pelo foco na otimização de processos de produção, pelo que, as LF's desempenham um papel fundamental neste cenário. Pois as LF's oferecem um meio prático para os trabalhadores familiarizaram-se com estas novas tecnologias e metodologias. Porém, algumas falhas são identificadas nas LF's direcionadas para a Indústria 4.0, pelo que devem ser analisadas para que ocorra uma transição eficiente para a Indústria 5.0. Destas falhas destacam-se:

- A integração humano-máquina. Embora a relação entre a automação e os robôs já seja adotada na I4.0, a sua eficiência e a segurança com o humano são dois fatores a serem melhorados. Pelo que, a Indústria 5.0, propõe o reforço da utilização de robôs colaborativos (*cobots*) e interfaces naturais (realidade virtual e aumentada), como forma de melhorar esta interação. Adicionalmente, a Indústria 5.0 tem em atenção o *design* ergonômico dos locais de trabalho para garantir o conforto dos trabalhadores.
- A baixa capacidade de customização dos processos produtivos das LF's. No caso das LF's da I4.0, os processos de produção são rígidos, com menor flexibilidade, o que dificulta a implementação da produção customizada. Já na Indústria 5.0, existe uma maior aposta no reforço das tecnologias de produção aditiva, como a impressão 3D, que embora já eram característicos das I4.0, neste caso o foco está na criação de sistemas de produção flexíveis, que se possam ajustar a diferentes produtos e volumes de produção.
- Fraca sensibilização relativa à sustentabilidade e à eficiência energética. Estes conceitos não são prioridade em muitas LF's da I4.0. Na Indústria 5.0, existe um maior foco na adoção de práticas de economia circular, com a integração de fontes de energia renovável e no uso de sistemas de gestão sustentável.
- Falta de conexão holística entre os diferentes sistemas inseridos nas LF's. Na Indústria 5.0, esta dificuldade é ultrapassada com a utilização de plataformas de comunicação avançada, garantindo a interoperabilidade entre os diferentes sistemas.
- Fraca formação de trabalhadores e estudantes. Na I4.0 existe um maior foco na tecnologia, já na Indústria 5.0 há uma maior valorização na educação contínua e no

desenvolvimento de *soft skills*, através do uso de tecnologias imersivas como a realidade aumentada.

- Resiliência e flexibilidade limitadas. Pelo que na Indústria 5.0 é essencial desenvolver estratégias que permitam melhorar estes aspetos, através da implementação de tecnologias adaptativas que tenham a capacidade de realizar ajustes rápidos e eficientes na produção conforme a procura e as necessidades do mercado.

Tabela 12 - Quadro síntese das limitações das LF's da I4.0 e respetivas abordagens para a I5.0.

Limitações das LF's da I4.0	Abordagens para a I5.0
Integração Homem-Máquina fraca	• Interfaces naturais (realidade aumentada e realidade virtual) • Ergonomia nas estações de trabalho (segurança)
Customização limitada	• Tecnologias de produção aditiva (impressão 3D) • Sistemas de produção flexíveis
Sustentabilidade e a Eficiência energética	• Energia renovável • Economia circular
Falta de conexão holística	• Plataformas de comunicação avançadas
Formação e a capacitação limitadas	• Educação contínua • Ambientes de aprendizagem imersivos (realidade virtual)
Resiliência e a flexibilidade limitadas	• Estratégias de resiliência • Tecnologias adaptativas

Desta forma, pode-se concluir que com a identificação das falhas apresentadas as LF's da I4.0, embora tenham contribuído para a formação técnica dos participantes, estas possuem várias limitações que necessitam de ser analisadas para que as LF's se alinhem com os novos princípios da Indústria 5.0. Das falhas destacam-se a interação H-H, a customização, a sustentabilidade, a eficiência energética, a formação e a falta de flexibilidade dos sistemas. Pelo que, a transição para a Indústria 5.0 exige a adoção de tecnologias avançadas e a implementação de práticas resilientes e sustentáveis, para garantir assim uma adaptação eficaz às novas exigências do mercado.

3.2. Implementação da LF 5.0

Para corresponder às necessidades e às características que a nova fábrica de aprendizagem voltada para a Indústria 5.0 e assente no *Open Design* deve conter, optou-se por elaborar uma tabela síntese. Esta tabela tem como objetivo demonstrar de forma mais clara as principais diferenças entre as abordagens das fábricas de aprendizagem já implementadas, apresentadas na A introdução das LF's foi um passo fundamental para o desenvolvimento de competências na Indústria 4.0. Com o fornecimento de ambientes em que os alunos podem aplicar conhecimentos teóricos em aplicações práticas, de forma a simular situações industriais. Porém, com a evolução rumo a uma nova era industrial, a Indústria 5.0, é necessário indentificar, e posteriormente superar, as limitações das LF's atuais para que continuem a ser relevantes e eficazes nesta nova revolução industrial.

Ainda referir que a Indústria 4.0 destaca-se pela integração de CPS, pela automação avançada e pelo foco na otimização de processos de produção, pelo que, as LF's desempenham um papel fundamental neste cenário. Pois as LF's oferecem um meio prático para os trabalhadores familiarizarem-se com estas novas tecnologias e metodologias. Porém, algumas falhas são identificadas nas LF's direcionadas para a Indústria 4.0, pelo que devem ser analisadas para que ocorra uma transição eficiente para a Indústria 5.0. Destas falhas destacam-se:

- A integração humano-máquina. Embora a relação entre a automação e os robôs já seja adotada na I4.0, a sua eficiência e a segurança com o humano são dois fatores a serem melhorados. Pelo que, a Indústria 5.0, propõe o reforço da utilização de robôs colaborativos (*cobots*) e interfaces naturais (realidade virtual e aumentada), como forma de melhorar esta interação. Adicionalmente, a Indústria 5.0 tem em atenção o *design* ergonômico dos locais de trabalho para garantir o conforto dos trabalhadores.
- A baixa capacidade de customização dos processos produtivos das LF's. No caso das LF's da I4.0, os processos de produção são rígidos, com menor flexibilidade, o que dificulta a implementação da produção customizada. Já na Indústria 5.0, existe uma maior aposta no reforço das tecnologias de produção aditiva, como a impressão 3D, que embora já eram característicos das I4.0, neste caso o foco está na criação de sistemas de produção flexíveis, que se possam ajustar a diferentes produtos e volumes de produção.
- Fraca sensibilização relativa à sustentabilidade e à eficiência energética. Estes conceitos não são prioridade em muitas LF's da I4.0. Na Indústria 5.0, existe um maior foco na adoção de práticas de economia circular, com a integração de fontes de energia renovável e no uso de sistemas de gestão sustentável.
- Falta de conexão holística entre os diferentes sistemas inseridos nas LF's. Na Indústria 5.0, esta dificuldade é ultrapassada com a utilização de plataformas de comunicação avançada, garantindo a interoperabilidade entre os diferentes sistemas.
- Fraca formação de trabalhadores e estudantes. Na I4.0 existe um maior foco na tecnologia, já na Indústria 5.0 há uma maior valorização na educação contínua e no desenvolvimento de *soft skills*, através do uso de tecnologias imersivas como a realidade aumentada.
- Resiliência e flexibilidade limitadas. Pelo que na Indústria 5.0 é essencial desenvolver estratégias que permitam melhorar estes aspetos, através da implementação de tecnologias adaptativas que tenham a capacidade de realizar ajustes rápidos e eficientes na produção conforme a procura e as necessidades do mercado.

Tabela 12 no contexto da Indústria 4.0, e a nova LF a ser desenvolvida e direcionada para as exigências inovadoras da nova era industrial. A Tabela 13 está dividida em três secções: a primeira abrange a Indústria 4.0 e as suas características fundamentais, enquanto a segunda se foca na Indústria 5.0 e nas suas novas abordagens. Estas novas características devem ser incorporadas ao máximo na nova LF a ser implementada (LF 5.0), garantindo que esta esteja alinhada com os avanços tecnológicos e as novas necessidades da Indústria 5.0. O último

segmento desta tabela inclui o conceito de *Open Design*, o qual deve ser uma característica intrínseca desta nova LF a desenvolver.

A Tabela 13 permite uma visão detalhada das características das LFs da Indústria 4.0, que realmente permitiram avanços significativos na eficiência operacional e na produção em massa, pelo que devem continuar a fazer parte de uma LF5.0. No entanto, a Indústria 5.0 traz consigo uma nova era, onde é necessário ir mais a fundo na questão da colaboração entre humanos e máquinas, a customização deve tornar-se ainda mais sofisticada e a sustentabilidade também deve ganhar um papel central. Portanto, a Tabela 13 delinea as características essenciais que devem ser integradas na nova LF 15.0 para atender às expectativas desta nova revolução industrial. Entre estas características estão a interação humano-humano e humano-máquina, através do uso de tecnologias colaborativas já utilizadas na I4.0, como robôs colaborativos (cobots), a implementação de interfaces intuitivas como realidade aumentada (AR) e realidade virtual (VR), mas com um foco acentuado na ergonomia e segurança no ambiente de trabalho. Adicionalmente, a nova LF deve reforçar as práticas de produção aditiva, uma característica da I4.0, permitindo a produção personalizada de maneira eficiente e sustentável. A sustentabilidade e a eficiência energética devem ser priorizadas, com a integração de fontes de energia renovável e práticas de economia circular. A conectividade holística deve ser garantida através de sistemas ciberfísicos integrados já abordados na I4.0 e plataformas de comunicação avançadas que assegurem a interoperabilidade entre todos os sistemas.

Para enfrentar a escassez de mão de obra qualificada, a nova LF 5.0 deve incluir programas de educação contínua e ambientes de aprendizagem imersivos, utilizando tecnologias de VR e AR para criar experiências de aprendizagem mais envolventes e eficazes. A resiliência e a flexibilidade também são cruciais, com a implementação de estratégias de resiliência e tecnologias adaptativas que permitam ajustes rápidos e eficientes na produção conforme as necessidades do mercado e as condições adversas.

Em suma, a elaboração da Tabela 13 serve como um guia estratégico para a implementação de uma nova LF que, não só atenda às necessidades atuais da Indústria 5.0, mas que também esteja preparada para os desafios futuros. Com esta abordagem, espera-se criar uma fábrica de aprendizagem que seja um modelo de inovação, eficiência e sustentabilidade, contribuindo significativamente para o avanço da produção inteligente e colaborativa.

Tabela 13 - Tecnologias e características das LF's analisadas. Fonte: [2], [77].

	I4.0							I5.0							OD
	Automação Avançada	CPS	IoT	Simulação	Cloud	Ciber Segurança	Big Data	Interação H - H	Interação H - M	Sustentabilidade	Customização	Comunicação Avançada	Resiliência	Flexibilidade	
LF1	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓						
LF2		✓	✓	✓										✓	
LF3	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓						✓
LF4		✓	✓	✓										✓	
LF5	✓	✓			✓										
LF6	✓	✓	✓							✓					
LF7				✓	✓			✓		✓					
LF8	✓	✓		✓					✓	✓					
LF9	✓	✓					✓								
LF10	✓	✓	✓	✓			✓		✓			✓			
LF 5.0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Nesta transição e revolução industrial as tecnologias e abordagens apresentadas na tabela acima devem ser inerentes às fábricas de aprendizagem de maneira que estas acompanhem as evoluções tecnológicas e que permitam também acompanhar as novas necessidades, permitindo uma produção mais colaborativa e sustentável.

Os subcapítulos que se seguem exploram detalhadamente as características e tecnologias essenciais que compõem a base da Indústria 5.0. Cada subcapítulo analisará uma característica ou tecnologia específica. O objetivo é oferecer um guia abrangente que não apenas descreva estas inovações, mas também forneça uma direção clara sobre como podem ser efetivamente implementadas na prática.

Cada uma das áreas será explorada em profundidade, com exemplos práticos e recomendações de implementação para garantir que a nova LF 5.0 esteja bem equipada para enfrentar os desafios e aproveitar as oportunidades oferecidas pela quinta revolução industrial.

3.2.1. Interação Homem-Homem

A interação homem-homem (H-H) refere-se à colaboração eficaz entre os humanos num ambiente de produção, que valoriza a sua importância, chegando à conclusão de que a tecnologia, por mais avançada que seja não pode substituir as características do ser humano como por exemplo, a sua criatividade e capacidade de resolução de problemas. Na nova revolução industrial, a interação H-H promove a cooperação, partilha de conhecimento e inovação conjunta, pelo que se cria um ambiente de trabalho produtivo [78].

Já a interação H-H na Indústria 5.0 caracteriza-se por um ambiente de trabalho inclusivo e diversificado, em que as habilidades individuais são valorizadas para contribuir para o sucesso coletivo. Pelo que envolve a promoção de um ambiente de confiança e respeito entre os trabalhadores, de modo que todos se sintam importantes na equipa e contribuam para os objetivos da organização [78], [79].

Em adição, a Indústria 5.0 destaca a importância do bem-estar dos funcionários, reconhecendo que um ambiente de trabalho positivo é fundamental para a produtividade. Desta forma, implica a criação de políticas e práticas que promovam a saúde mental e física e o equilíbrio entre vida pessoal e profissional.

Resumidamente, a interação H-H na Indústria 5.0 é uma abordagem que valoriza o papel central do Homem no ambiente produtivo ao promover a colaboração, o bem-estar e o desenvolvimento contínuo. Essa abordagem cria um ambiente de trabalho mais eficiente, e inovador, essencial para o sucesso na nova era industrial [78], [79], [80].

Métodos de Integração

Para promover a interação H-H numa nova LF orientada para a I5.0 podem ser implementadas várias estratégias, que variem desde espaços e plataformas de comunicação até à própria estrutura e cultura da organização e o reconhecimento e recompensas que dão aos seus colaboradores. Em primeiro lugar, devem ser criados espaços quer para formações e webinars, quer para brainstorming, todos eles equipados com as ferramentas necessárias e com plataformas de comunicação que permitam aos participantes a troca de ideias, a comunicação em tempo real, assim como a colaboração e a cocriação. Uma atenção que deve ser dada a estes espaços é que devem ser adaptados às necessidades dos participantes e sobretudo confortáveis. Deste modo os colaboradores estão mais à vontade para refletir e exprimir as suas ideias. Por outro lado, a organização deve valorizar e promover os ideais da empresa como ideais colaborativos e de um bom ambiente, assim como deve dar o devido reconhecimento e até recompensas para premiar as contribuições para o sucesso da empresa e até mesmo para incentivar e estimular mais contribuições.

Tecnologias e Equipamentos Necessários

A LF a ser desenvolvida de modo que a interação H-H seja uma das suas principais características, deve ser equipada com as seguintes tecnologias e equipamentos (Figura 27):

- **Tecnologias de Comunicação:** Ferramentas como a Trello ou a Slack ou a Microsoft Teams são ferramentas de videoconferência, chat interno ou são plataformas de gestão de projetos que tendem a facilitar a comunicação interna. Estes *Softwares* podem ser utilizados para este fim, abrindo canais de comunicação mais claros e até mais eficientes dentro da organização e entre os participantes.
- **Espaços de Trabalho Modulares e Flexíveis:** Áreas de *trabalho* em conjunto ou de cocriação dentro da fábrica de aprendizagem que devem ser moduláveis e flexíveis e adaptáveis às diferentes necessidades de cada colaborador ou equipa. equipadas com móveis modulares e tecnologias que suportem o trabalho colaborativo. Desta forma, estas áreas devem dispor de moveis e equipamentos modulares e com capacidade de se ajustarem a diferentes necessidades
- **Ferramentas de Colaboração Digital:** O Miro, o Google Jamboard e o Asana são todos *Softwares* de colaboração e gestão das tarefas ao nível digital. Eles permitem que se troque ideias e documentos das equipas e até é possível *brainstorming* online através destas plataformas.
- **Programas de Formação:** De modo a promover uma educação e formação mais contínuas, sugerem-se materiais didáticos e instrutores altamente qualificados para serem responsáveis pelas formações e pelos *workshops* destas fábricas de aprendizagem.



Figura 27 - Tecnologias e equipamentos necessários para integrar a Interação H-H.

Ao focar na relação Homem-Homem, a LF 5.0 não apenas melhora a eficiência operacional, mas também cria um ambiente de trabalho mais positivo e inovador, essencial para enfrentar os

desafios da nova era industrial. Promover um ambiente onde a colaboração e a comunicação são valorizadas é fundamental para o sucesso a longo prazo e para a adaptação às mudanças rápidas e constantes da indústria moderna.

Tabela 14 – Vantagens, Métodos de integração e Exemplos de Tecnologias e Equipamentos necessários para implementar a Interação H-H na LF 5.0.

	Vantagens	Métodos de Integração	Tecnologias/Equipamentos
Interação H-H	• Aumento da Produtividade • Inovação Contínua • Continuidade de Trabalhadores • Resiliência Organizacional	• Espaços Colaborativos • Formações e Workshops • Plataformas de Comunicação • Cultura Organizacional • Reconhecimento e Recompensas	• Plataformas de Comunicação: Microsoft Teams, Slack ou Trello • Espaços de Trabalho Modulares e Flexíveis da Herman Miller • Ferramentas de Colaboração Digital: Google Jamboard ou o Miro • Programas de Formação

3.2.2. Interação Homem-Máquina

A relação homem-máquina (H-M) ou, também conhecida como interação H-M, refere-se à interação sinérgica e colaborativa entre os humanos e as máquinas dentro de um ambiente de produção, como o próprio nome indica. Este termo, já proveniente da Indústria 4.0, onde os focos eram outros, como a automação e os sistemas ciberfísicos eram postos à prova de modo a tornar todo o sistema produtivo mais eficiente e aumentar a produção, sendo que o grande objetivo da I4.0 era então a produção em massa. Por outro lado, na Indústria 5.0 existem outros focos. Esta enfatiza uma colaboração com mais harmonia e mais próxima entre humanos e máquinas. Segundo esta nova perspectiva, as máquinas ficam responsáveis por realizar as tarefas mais repetitivas e de alta precisão, que muitas vezes até são as menos seguras. Desta forma, libertam os humanos para que estes se concentram em atividades que exigem maior criatividade, intuição e tomada de decisões complexas [81].

A relação homem-máquina na Indústria 5.0 também envolve o desenvolvimento de interfaces intuitivas e amigáveis que facilitam a interação, garantindo que a tecnologia seja acessível e útil para todos os trabalhadores. Ao existir esta divisão de tarefas entre humanos e máquinas, automaticamente existe também um aumento de produtividade, resultado de uma produção mais rápida e com menos erros associados e desperdícios. Ao mesmo tempo, e como já referido, uma vez que são as máquinas que ficam responsáveis pelas tarefas mais perigosas ou até mais exigentes a nível físico, o operador é afastado do ambiente mais perigoso do sistema produtivo, o que aumenta o nível de segurança de toda a estrutura da fábrica de aprendizagem. Por último, com o apoio dos sistemas de automatização, o operador fica livre para exercer das suas características inerentes como a criatividade e intuição para uma melhor tomada de decisões, com uma maior rapidez e mais informações devido à colaboração com as máquinas [81], [82].

Métodos de Integração

Existem várias estratégias que podem ser utilizadas para uma melhor interação H-M na nova LF 5.0. Os robôs colaborativos (*cobots*), estratégia já utilizada na indústria 4.0, no entanto, a nova abordagem para a I5.0. passa por desenvolver novos cobots que acompanhem as novas tecnologias e necessidades, mais seguros e até mais intuitivos. Relativamente ao tema das interfaces intuitivas, a adoção de ambientes imersivos, como a realidade aumentada (AR) e a realidade virtual (VR) são também abordagens para a evolução destas fábricas de aprendizagem. Estas novas tecnologias permitem uma interação mais natural e mais acessível.

Com a inclusão de novas tecnologias é essencial que se promova o treino e a formação dos participantes sobre estas novas aquisições. É necessário que estes aprendam a operar e interagir com as novas tecnologias, assim como as utilizem da maneira mais eficiente.

Por fim, as estratégias de monitorização em tempo real e a adoção de assistência inteligente também são estratégias pertinentes para a implementação da interação H-M.

Tecnologias e Equipamentos Necessários

Para implementar as estratégias acima mencionadas, a LF 5.0 deve ser equipada com (Figura 28):

- **Cobots e Robôs Automatizados:** Robôs colaborativos como por exemplo os cobots da Universal Robots (UR3, UR5, UR10) ou os cobots da série CRX da FANUC.
- **Tecnologia de Realidade Aumentada e Virtual:** Óculos de AR, como por exemplo os da Microsoft HoloLens ou os da Google Glass Enterprise Edition, que permitem visualizar ambientes mais imersivos. Para VR, exemplos como Oculus Rift ou HTC Vive permitem treinos imersivos, onde os participantes conseguem praticar num ambiente seguro. Devido aos custos elevados, surgem as opções alternativas de AR e VR respetivamente, Nreal Light e Oculus Quest 2, como soluções mais acessíveis.
- **Sistemas de Monitorização e Feedback:** Sensores IoT, câmaras de visão computacional e sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) permitem monitorizar máquinas e até mesmo processos. Para realizar a recolha e a análise desses dados, pode recorrer-se a ferramentas como Hadoop ou Spark.
- **Interface Intuitiva:** Painéis HMI (*Human Machine Interface*) sensíveis ao toque como por exemplo os da Siemens, Allen-Bradley ou Schneider Electric, que já vêm equipados com um *software* intuitivo que facilita a operação dos sistemas.
- **Equipamentos Ergonómicos:** Mais uma vez, equipamentos modulares e que podem ser ajustados são mais ergonómicos e uma mais-valia. Exemplos disso são as marcas como Herman Miller Milwaukee Tools.



Figura 28 - Tecnologias e equipamentos necessários para integrar a Interação H-M.

A integração harmoniosa entre humanos e máquinas é essencial para enfrentar os desafios da nova era industrial e maximizar o potencial de inovação e produtividade. A Indústria 5.0 eleva a interação homem-máquina a um novo patamar, promovendo uma colaboração equilibrada onde a tecnologia complementa e enriquece o trabalho humano, resultando numa sinergia poderosa e eficaz.

Tabela 15 - Vantagens, Métodos de integração e Exemplos de Tecnologias e Equipamentos necessários para implementar a Interação H-M na LF 5.0

	Vantagens	Métodos de Integração	Tecnologias/Equipamentos
Interação H-M	• Aumento da Produtividade • Qualidade e Precisão • Segurança • Redução de Custos Operacionais • Melhoria da Tomada de Decisões	• Desenvolvimento de Cobots • Interfaces Intuitivas • Treino e Formação dos trabalhadores • Monitorização e Feedback em Tempo Real • Design Ergonómico • Sistemas de Assistência Inteligente	• Cobots: Universal Robots (UR3, UR5, UR10) ou da série CRX da FANUC • Óculos de AR: Microsoft HoloLens ou Nreal Light • Óculos de VR: Oculus Rift ou Oculus Quest 2 • Sensores IoT, câmeras de visão computacional e sistemas SCADA • Plataformas de Big Data: Hadoop ou Spark • Painéis HMI da Siemens, Allen-Bradley ou Schneider Electric • Mobiliário ergonómico da Herman Miller • Sistemas de Assistência Inteligente: Amazon Alexa for Business

3.2.3. Sustentabilidade

No âmbito da Indústria 5.0, a sustentabilidade surge como uma das suas novas abordagens e refere-se ao compromisso de implementar práticas e tecnologias que tenham como objetivo minimizar o impacto ambiental e promover a eficiência energética, ao mesmo tempo que mantêm a competitividade e a produtividade, características que também não devem ser esquecidas. [83].

O grande objetivo é que na Indústria 5.0, a sustentabilidade seja incorporada ao longo de todo o processo produtivo, desde o *design* dos produtos até à sua produção e logística, os quais devem envolver materiais recicláveis, a redução de desperdícios e a otimização do consumo de energia. Além disso, a eficiência energética e o uso de fontes de energia renovável devem ser um dos principais focos da indústria atual, reduzindo significativamente a utilização de combustíveis fósseis. Ao caminhar para um ambiente mais sustentável e implementar práticas sustentáveis, as novas fábricas de aprendizagem não só estão a atender às regulamentações ambientais, o que evita multas, mas também se tornam mais atrativas para parcerias e até investidores que se revejam nas suas práticas sustentáveis.

Métodos de Integração

De modo a tornar a LF 5.0 num ambiente sustentável, devem ser implementadas práticas de economia circular, com a utilização de materiais recicláveis e uso de energias renováveis, como eólica, fotovoltaica, geotérmica, entre outros. Os processos de fabrico devem ser otimizados, de modo a melhorar a sua eficiência e consequentemente reduzir o consumo energético. Desenvolver programas de gestão de resíduos que incluam a reciclagem, compostagem e a reutilização de subprodutos industriais. A monitorização de todo o espaço, ou o máximo possível, de modo a que se consigam fazer ajustes em tempo real e, mais uma vez, melhorar a eficiência energética. Por último, a consciencialização de todos os participantes e intervenientes da importância da sustentabilidade é de relevante importância, assim como estabelecer parcerias estratégicas neste campo de ação.

Tecnologias e Equipamentos Necessários

Para tornar possível a implementação das estratégias acima mencionadas, a LF 5.0 deve ser equipada com (Figura 29):

- **Painéis Solares Fotovoltaicos:** Como por exemplo os painéis da SunPower ou First Solar. Soluções mais acessíveis são kits de painéis fotovoltaicos completos que contêm todos os componentes necessários para montar e instalar um sistema de energia solar em pequena escala com o Kit Solar de 100W da Renogy e o Kit Solar de 200W da ACOPOWER.
- **Turbinas Eólicas:** GE Renewable Energy ou Siemens Gamesa, são boas possibilidades.
- **Sistemas de Automação e Controlo:** Implementação de sistemas de automação, como por exemplo da Siemens (SIMATIC) ou Schneider Electric, para otimizar processos produtivos.

- **Tecnologia de Reciclagem Avançada:** Máquinas de reciclagem, como as da TOMRA ou Pellenc ST.
- **Sistemas de Gestão de Resíduos:** Equipamentos para compostagem e tratamento de resíduos orgânicos, da Green Mountain Technologies, por exemplo que permitem transformar resíduos em recursos úteis.
- **Sensores de Monitorização Ambiental:** Utilização de sensores IoT, como os da Libelium ou da Bosch, para monitorizar a qualidade do ar, consumo de energia e emissões de gases, permitindo ajustes em tempo real para minimizar o impacto ambiental.
- **Materiais Sustentáveis:** Uso de materiais reciclados ou de baixo impacto ambiental.
- **Sistemas de Tratamento de Água:** Instalação de sistemas de tratamento de água, como os da Veolia Water Technologies ou SUEZ.
- **Softwares de Gestão de Sustentabilidade:** Plataformas como a SAP *Environment, Health, and Safety Management* ou a *EcoStruxure Resource Advisor* da Schneider Electric, para gerir e monitorizar o desempenho ambiental e energético da fábrica de aprendizagem.



Figura 29 - Tecnologias e equipamentos necessários para integrar a Sustentabilidade.

Com os materiais e equipamentos acima sugeridos, a nova LF 5.0 pode criar um ambiente de produção que não apenas maximiza a eficiência e a produtividade, mas também minimiza o impacto ambiental, promovendo um futuro mais sustentável e responsável.

Tabela 16 - Vantagens, Métodos de integração e Exemplos de Tecnologias e Equipamentos necessários para implementar a Sustentabilidade na LF 5.0

	Vantagens	Métodos de Integração	Tecnologias/Equipamentos
Sustentabilidade	• Redução do Impacto Ambiental • Eficiência Energética • Conformidade Regulamentar • Inovação e Competitividade • Inovação e Competitividade • Atratividade para Investidores • Fidelização dos Clientes • Maior Ciclo de Vida dos Produtos • Gestão de Resíduos	• Uso de Energia Renovável • Otimização de Processos • Economia Circular • Gestão de Resíduos • <i>Design</i> Sustentável • Monitorização Ambiental • Treino e Capacitação dos participantes • Parcerias Estratégicas	• Painéis Solares Fotovoltaicos: SunPower ou Kit Solar de 100W da Renogy • Turbinas Eólicas: GE Renewable Energy ou Siemens Gamesa • Sistemas de Automação e Controlo: SIMATIC da Siemens • Máquinas de reciclagem: TOMRA ou Pellenc ST • Equipamentos tratamento de resíduos orgânicos: Green Mountain Technologies • Sensores de Monitorização Ambiental: Sensores IoT da Libelium ou Bosch • Sistemas de tratamento de água: Veolia Water • <i>Softwares</i> de Gestão de Sustentabilidade: SAP Environment, Health, and Safety Management ou a EcoStruxure Resource Advisor da Schneider Electric

3.2.4. Customização

Nesta nova era industrial, a customização atinge novos patamares, superando a personalização em massa, característica da Indústria 4.0. Enquanto, até ao momento, se modificavam apenas algumas e pequenas características dos produtos, nesta nova abordagem da I5.0 é realizada toda uma cocriação e adaptação de maneira que cada produto sirva o seu propósito e seja único. Desta forma o produto é capaz de ser altamente customizado, ajustando-se às necessidades ou exigências do seu consumidor. [84].

A questão de que o humano e, consequentemente, o operador está no centro da operação na I5.0, vem realçar que cada um pode preferências individuais, assim como a sua criatividade. Uma vez que o operador surge como cocriador do produto, o seu papel é elevado e permite-lhe ter uma maior relevância e poder de decisão na conceção de cada produto. Esta abordagem permite, não só dar uma maior liberdade ao operador e design do produto, como também melhora a experiência do cliente que acaba por ser também cocriador do próprio produto, na medida em que é convidado a colaborar e projetar o produto de acordo com as suas preferências.

Por fim, outra vantagem recai sobre a sustentabilidade, uma vez que ao produzir-se diretamente o que o cliente procura e deseja, evita-se a produção do desnecessário e que não atende às expectativas do consumidor, reduzindo-se assim o desperdício.

Métodos de Integração

Para implementar eficazmente a customização na LF 5.0, é necessário adotar várias estratégias específicas, que combinam tecnologias de ponta já implementadas na I4.0 com práticas centradas no ser humano. A utilização de plataformas que permitam a cocriação digital é fundamental para que todos, tanto operadores, como consumidores, participem no processo de customização do produto final. Mais uma vez, o reforço da utilização de impressão 3D é importante, assim como adaptar os sistemas de produção e torná-los mais flexíveis para que possam produzir diferentes produtos e adaptar-se às sucessivas necessidades e exigências dos consumidores.

Tecnologias e Equipamentos Necessários

De modo a suportar a customização na I5.0, as seguintes tecnologias e equipamentos (Figura 30) são essenciais de integrar na LF 5.0:

- **Cobots:** Robôs colaborativos como os da Universal Robots permitem ser programados de forma flexível para corresponder às especificações de cada cliente.
- **Impressoras 3D:** Impressoras como a Formlabs Form 3 para criar peças personalizadas.
- **Óculos de Realidade Aumentada (AR):** Microsoft HoloLens é um bom exemplo, no entanto, os óculos Nreal Light surgem como uma solução mais acessível.
- **Sensores IoT:** Sensores da Siemens que monitorizam as condições de produção, permitindo ajustes imediatos.
- **Servidores e Cloud:** Amazon Web Services (AWS) para processar e armazenar grandes quantidades de dados.
- **Plataformas de Big Data e IA:** Sistemas como o IBM Watson para analisar dados e personalizar produtos em tempo real.
- **Software de Cocriação com AR/VR:** Ferramentas como o Gravity Sketch permitem a cocriação de produtos em ambientes virtuais. Blender ou Mozilla Hubs são exemplos de opções *open source* para este recurso.

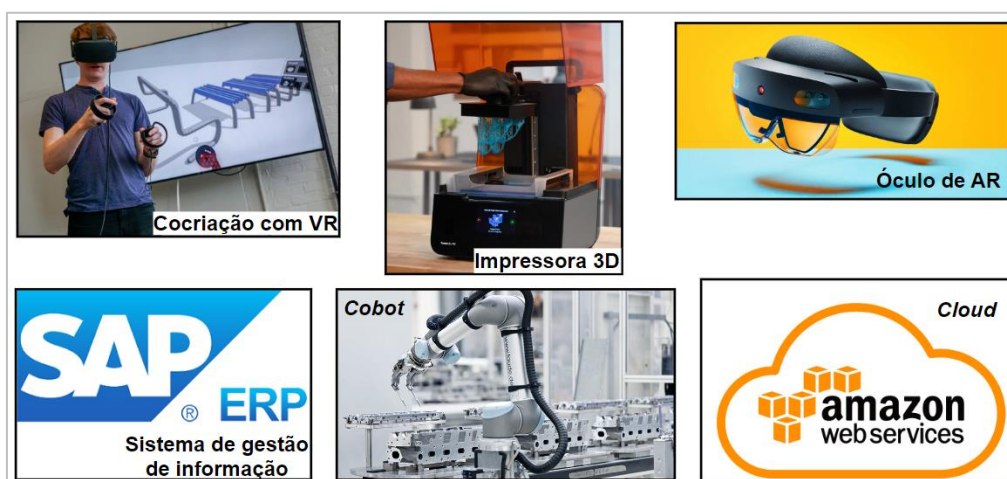


Figura 30 - Tecnologias e equipamentos necessários para integrar a customização.

A customização na Indústria 5.0 não apenas eleva a satisfação do cliente e a eficiência produtiva, mas também inaugura uma era de inovação e flexibilidade sem precedentes. Ao integrar estas práticas na LF 5.0, surge a oportunidade de oferecer soluções altamente personalizadas e sustentáveis, adaptando-se rapidamente às necessidades individuais dos clientes. Esta abordagem não só assegura uma diferenciação competitiva num mercado cada vez mais exigente, mas também promove um ambiente de produção mais centrado no ser humano, onde a criatividade e a inovação são continuamente estimuladas.

Tabela 17 - Vantagens, Métodos de integração e Exemplos de Tecnologias e Equipamentos necessários para implementar a customização na LF 5.0

	Vantagens	Métodos de Integração	Tecnologias/Equipamentos
Customização	• Centralidade do Ser Humano • Sustentabilidade e Eficiência • Experiência do Cliente Melhorada • Inovação e Criatividade	• <i>Cobots</i> Inteligentes e Flexíveis • Plataformas de Cocriação Digital • Produção Modular e produção Aditiva • <i>Feedback</i> Contínuo e Monitorização em Tempo Real	• <i>Cobots</i>: UR5 da Universal Robots • Impressoras 3D: Formlabs Form 3 • Cloud: Amazon Web Services (AWS) • Óculos de AR: Microsoft HoloLens ou Nreal Light • Sistemas de Gestão de Informação (IMS): SAP ERP • <i>Software</i> de Cocriação com AR/VR: Ferramentas como o Gravity Sketch

3.2.5. Comunicação Avançada

A comunicação avançada é outra abordagem que deve ser intrínseca da nova LF 5.0. Esta nova abordagem corresponde à criação de uma rede de comunicação e informação muito eficaz entre os grandes intervenientes da produção, os humanos, as máquinas e todos os sistemas.

Esta rede deve ser criada recorrendo às novas tecnologias emergentes nesta nova era industrial, mas também com algumas das características já existentes e da I4.0, como redes 5G, IoT, inteligência artificial, *big data*, e sistemas de realidade aumentada e realidade virtual. No entanto e mais uma vez devem ser utilizadas de outra maneira, sendo que o foco deve ser a customização e as interações H-H e H-M [22].

Esta aplicação de uma comunicação avançada melhora a eficiência operacional na medida em que melhora a comunicação entre sistemas, diminuindo atrasos, melhora a tomada de decisões, tornando este processo mais informado com os dados recolhidos e comunicados através desta nova abordagem. Por outro lado, melhora também a colaboração entre os colaboradores, facilita a gestão de todo o processo produtivo, assim como conduz a uma inovação mais acessível [85].

Métodos de Integração

De modo a promover a comunicação avançada na LF 5.0, devem ser implementadas infraestruturas de redes 5G, integrarem-se sensores IoT de modo a recolher e até comunicar os dados e plataformas de análise de dados, permitindo a monitorização e controlo constantes. A aplicação de tecnologias de AR e VR também fulcral, convergindo com uma comunicação mais visual e mais interativa. Os recursos a assistentes virtuais dão o devido suporte instantâneo que os participantes necessitam, assim como permite o controlo dos sistemas.

Tecnologias e Equipamentos Necessários

Para implementar as estratégias acima mencionadas, a LF 5.0 deve ser equipada com as seguintes tecnologias e equipamentos (Figura 31):

- **Dispositivos IoT e Sensores:** Equipamentos como por exemplo sensores de temperatura, pressão, vibração ou outros da Siemens por exemplo, que monitorizam e transmitem dados em tempo real.
- **Infraestrutura de Rede 5G:** Redes 5G para garantir uma conexão rápida e estável entre todos os sistemas e dispositivos, como os da Huawei por exemplo.
- **Cloud:** Um exemplo é a Amazon Web Services (AWS) para dados industriais.
- **Plataformas de Big Data:** *Software* especializado para recolha, armazenamento, processamento e análise de dados em grande escala, como Hadoop ou Spark.
- **Dispositivos de Realidade Aumentada e Virtual:** Óculos de AR, como Microsoft HoloLens ou Nreal Light e para VR, Oculus Rift ou Oculus Quest 2.
- **Softwares de Colaboração:** Microsoft Teams, Slack ou Zoom para comunicação interna.
- **Sistemas de Gestão de Informação (IMS):** SAP ERP, um *software* de ERP (*Enterprise Resource Planning*) que centra a gestão de informações e processos.
- **Assistentes Virtuais e Chatbots:** Plataformas como IBM Watson ou Google Dialogflow para suporte em tempo real e controlo de sistemas.

- **Dispositivos Móveis:** Tablets, smartphones entre outros dispositivos para controlar informações e comunicar de qualquer ponto da LF.



Figura 31 - Tecnologias e equipamentos necessários para integrar a Comunicação Avançada.

Implementar a comunicação avançada na LF 5.0 não apenas melhora a eficiência e a precisão da produção, mas também cria um ambiente de trabalho mais colaborativo e inovador. A integração harmoniosa entre humanos e tecnologia é essencial para enfrentar os desafios da nova era industrial e maximizar o potencial de inovação e produtividade.

Tabela 18 - Vantagens, Métodos de integração e Exemplos de Tecnologias e Equipamentos necessários para implementar a Comunicação Avançada na LF 5.0

	Vantagens	Métodos de Integração	Tecnologias/Equipamentos
Comunicação Avançada	• Melhoria da Eficiência Operacional • Tomada de Decisões Informadas • Aumento da Colaboração • Flexibilidade e Adaptabilidade • Segurança no Trabalho • Capacitação e Treino • Inovação e Desenvolvimento • Gestão de Recursos	• Rede 5G • Internet das Coisas (IoT) • Plataformas de Big Data e Análise • Tecnologias de AR e VR • Software de Colaboração e Comunicação • Assistentes Virtuais e <i>Chatbots</i>	• Sensores de temperatura, pressão, vibração: Sensores IoT da Siemens • Antenas e routers 5G: Conectividade de alta velocidade da Huawei • Cloud: Amazon Web Services (AWS) • Plataformas de Big Data: Hadoop ou Spark • Óculos de AR: Microsoft HoloLens ou Nreal Light • Óculos de VR: Oculus Rift, Oculus Quest 2 • Sistemas de Gestão de Informação (IMS): SAP ERP • Assistentes Virtuais e <i>Chatbots</i>: IBM Watson ou Google Dialogflow • Dispositivos Móveis: Tablets, smartphones, etc

3.2.6. Resiliência

Resiliência na Indústria 5.0 refere-se à capacidade de uma fábrica de aprendizagem adaptar-se e prosperar face a mudanças e desafios inesperados. O foco está na capacidade de antever os problemas e de forma muito flexível adaptar-se às novas exigências e dar continuidade à produção. Este conceito vai além da simples recuperação de falhas, focando na adaptação proativa e na antecipação de problemas para garantir a continuidade operacional, a qualidade dos produtos e a sustentabilidade. [86]. Na Indústria 5.0, a resiliência envolve a criação de um ecossistema industrial que não apenas se recupera rapidamente de falhas, mas também evolui continuamente em resposta a mudanças internas e externas. [87].

Ao beneficiar desta característica, a LF 5.0 garante que as operações não sejam interrompidas quer por falhas técnicas, catástrofes ou até mesmo mudanças na própria indústria. Além disso, isto assegura a manter elevados níveis de eficiência e qualidade, ao mesmo tempo que contribui para uma maior resiliência organizacional. [86], [87]:

Métodos de Integração

Relativamente a estratégias de implementação da resiliência na LF 5.0, uma vez mais sugere-se a utilização de sensores IoT para monitorizar a qualidade das operações, assim como a segurança e detetar qualquer anomalia para se reorganizar rapidamente. Também se sugere que se desenvolvam planos de contingência, que permitam então uma gestão de cadeia de abastecimento também mais resiliente. Outro fator importante, é investir e estabelecer parcerias estratégicas que favoreçam a LF e permitam investir numa infraestrutura mais robusta e que resista a problemas que possam pôr em causa a funcionalidade da fábrica de aprendizagem.

Tecnologias e Equipamentos Necessários

Para implementar as estratégias acima mencionadas, a LF 5.0 deve ser equipada com (Figura 32):

- **Sensores IoT e Dispositivos de Monitorização:** Sensores de temperatura, humidade, vibração e outros parâmetros como os Sensores da Siemens, já abordados anteriormente nos equipamentos necessários para promover a comunicação avançada.
- **Servidores e Sistemas de Backup:** Servidores robustos e soluções de *backup* em cloud para garantir a continuidade dos dados e das operações.
- **Plataformas de Big Data e Análise:** Ferramentas de *big data* e análise para processar grandes volumes de dados e identificar anomalias, como Hadoop também já sugerida anteriormente para outras características.
- **Plataformas de Treino e Capacitação:** Softwares de treino e formação da Strivr, como por exemplo, que utilizam AR e VR para criar cenários de simulação. Exemplos mais acessíveis e em Open Source são o Open Simulator ou o A-Frame.

- **Redes Seguras e Infraestrutura de TI:** Soluções de segurança de rede como psSense ou OPNsense que permitem criar um ambiente seguro e controlado, sem comprometer o orçamento do projeto.



Figura 32 - Tecnologias e equipamentos necessários para integrar a Resiliência.

Estas abordagens garantem que a LF 5.0 não apenas mantenha a eficiência e a produtividade em condições normais, mas também esteja preparada para enfrentar e recuperar rapidamente de eventos adversos, garantindo a continuidade e o sucesso a longo prazo. A resiliência é um componente essencial da Indústria 5.0, permitindo que as fábricas de aprendizagem prosperem num ambiente dinâmico e desafiador.

Tabela 19 - Vantagens, Métodos de integração e Exemplos de Tecnologias e Equipamentos necessários para implementar a Resiliência na LF 5.0

	Vantagens	Métodos de Integração	Tecnologias/Equipamentos
Resiliência	• Continuidade dos Negócios • Capacidade de Recuperação • Flexibilidade Operacional • Redução de Riscos • Eficiência e Qualidade • Segurança dos Participantes	• Monitorização Contínua e Análise de Dados • Planeamento de Contingência • Gestão de Cadeia de Abastecimento Resiliente • Capacitação e Formação dos Participantes • Infraestrutura Tecnológica Robusta • Parcerias e Colaborações Estratégicas	• Sensores de temperatura, pressão, vibração: Sensores IoT da Siemens • Cloud: Amazon Web Services • Ferramentas de <i>big data</i> e análise preditiva: Hadoop • Soluções de <i>Blockchain</i> para Cadeia de Abastecimento: Hyperledger Fabric ou Ethereum • Softwares de treino e formação: Strivr, Open Simulator ou o A-Frame • Soluções de cibersegurança: psSense ou OPNsense

3.2.7. Flexibilidade

Enquanto a resiliência se foca na capacidade de uma fábrica se recuperar e continuar a operar sob condições adversas, a flexibilidade surge aqui com outro foco. O termo flexibilidade no

contexto da LF 5.0 enfatiza a capacidade de os ambientes industriais serem adaptáveis e se ajustarem com facilidade face às consecutivas e rápidas mudanças do mercado. Enfatiza a capacidade de mudança e evolução contínua num ambiente dinâmico. Para isto, os sistemas devem ser desenvolvidos de modo a ser possível reconfigurá-los e adaptá-los a qualquer momento, permitindo a LF responder de forma mais proativa às novas exigências do mercado. [88], [89].

Por outro lado, a flexibilidade também está intrinsecamente ligada à sustentabilidade, na medida em que é possível implementar novas políticas sustentáveis de forma prática e rápida, reduzindo o desperdício e o consumo de energia. [90].

Métodos de Integração

Para promover a flexibilidade na LF 5.0, devem ser desenvolvidos sistemas de produção mais flexíveis para se reajustarem e reconfigurarem para novos processos ou até produtos. Mais uma vez, a aquisição de equipamentos flexíveis e modulares ajuda a integração desta abordagem. Uma vez que o objetivo é que a fábrica de aprendizagem esteja sempre na vanguarda da tecnologia e inovação é imprescindível que os participantes tenham formações e treinos constantes e contínuos que permitam estas transições de tecnologias. O mesmo se adequa à comunicação, que também deve ser eficiente para permitir a partilha de informações e mudanças rapidamente.

Tecnologias e Equipamentos Necessários

Os seguintes equipamentos e tecnologias sugeridos (Figura 33) são cruciais para a implementação das estratégias acima mencionadas na nova LF 5.0:

- **Equipamentos de Produção Modulares:** Máquinas e linhas de produção com as células de produção flexíveis da B&R Automation. Outras opções de ferramentas *open source* são ROS (*Robot Operating System*) ou OpenPLC.
- **Plataformas de Software Adaptáveis:** Sistemas ERP como o ERPNext, sugerido também no subcapítulo da Comunicação Avançada, e softwares de gestão de produção como Odoo, também *open source* que permitem a customização e a rápida integração com novas tecnologias.
- **Dispositivos de Monitorização:** Sensores IoT e sistemas de monitorização, como Hadoop ou Spark, já sugeridas anteriormente.
- **Ferramentas de Comunicação e Colaboração:** Plataformas como Microsoft Teams e Slack.
- **Equipamentos de Treino em Realidade Virtual e Aumentada:** Dispositivos como Oculus Rift e Microsoft HoloLens.



Figura 33 - Tecnologias e equipamentos necessários para integrar a Flexibilidade.

A flexibilidade na Indústria 5.0 é essencial para manter a competitividade e responder de forma ágil às mudanças contínuas do mercado e às inovações tecnológicas. Ao implementar sistemas flexíveis, *softwares* adaptáveis e práticas de treino contínuo, as fábricas de aprendizagem podem não apenas manter sua relevância, mas também prosperar num ambiente em constante evolução.

Tabela 20 - Vantagens, Métodos de integração e Exemplos de Tecnologias e Equipamentos necessários para implementar a flexibilidade na LF 5.0

	Vantagens	Métodos de Integração	Tecnologias/Equipamentos
Flexibilidade	- Resposta Rápida às Mudanças de Mercado - Customização - Implementação de Novas Tecnologias - Flexibilidade Operacional - Sustentabilidade	- Sistemas de Produção Flexíveis - Plataformas de Software Adaptáveis - Treino e Formação Contínuos - Monitorização e Análise de Dados em Tempo Real - Colaboração e Comunicação Eficientes	- Produção Modular: ROS (Robot Operating System) ou OpenPLC. - Sistemas ERP: ERPNext - Softwares de gestão de produção: Odoo - Plataformas de Big Data: Hadoop ou Spark - Plataformas de Comunicação: Microsoft Teams, Slack - Equipamentos de VR e AR: Oculus Rift e Microsoft HoloLens

3.3. Proposta da Mini LF 5.0 no OSLab4Man

De modo a transpor os conceitos abordados anteriormente para a componente prática, surge o presente capítulo, que apresenta a proposta de implementação de uma fábrica de aprendizagem orientada para a Indústria 5.0 e baseada em *Open Design*, num laboratório existente (OSLab4Man) do Instituto Superior de Engenharia do Porto do Politécnico do Porto. Este é um projeto de carácter inovador dado que são escassos os projetos existentes em Portugal que abordem o desenvolvimento de uma LF, especialmente no âmbito da I5.0 e do *Open Design*. Constatou-se que, até à data, não foram encontrados quaisquer documentos, artigos ou outro material de literacia sobre estes temas em simultâneo.

Ao longo desta secção será realizada primeiramente uma descrição detalhada da nova Mini LF 5.0 no OSLab4Man, abordando a sua localização, propósitos e objetivos. Inicialmente, será feita uma análise do laboratório OSLab4Man, avaliando o seu estado atual e identificando as lacunas e necessidades para a sua transformação numa LF orientada para a Indústria 5.0 e baseada em *Open Design*. Em seguida, será discutida a escolha do produto a desenvolver em colaboração com uma empresa parceira, incluindo a justificação da escolha e os benefícios esperados. Posteriormente, serão descritos os equipamentos e tecnologias necessários para a produção, destacando os recursos de baixo custo e fácil acessibilidade que caracterizam este projeto. Por fim, será apresentada uma proposta de estrutura e *design* da nova Mini LF 5.0, juntamente com sugestões de melhorias contínuas e estratégias de sustentabilidade para garantir o sucesso e a longevidade da LF. Esta abordagem integrada visa criar um ambiente de aprendizagem avançada, que não só prepara os alunos para os desafios da Indústria 5.0, mas também promove práticas sustentáveis e colaborativas, alinhadas com os objetivos de desenvolvimento sustentável.

3.3.1. Descrição da Mini LF 5.0 no OSLab4Man

O desenvolvimento de uma fábrica de aprendizagem orientada para a Indústria 5.0 é uma iniciativa que visa preparar o futuro da indústria, alinhando-se com as tendências mais recentes da transformação digital e dos avanços tecnológicos. A proposta de implementação desta Mini LF 5.0 no laboratório Open Science Lab for Manufacturing (OSLab4Man), localizado no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), no edifício F das infraestruturas do ISEP (Figura 34), apresenta-se como uma escolha estratégica e altamente relevante, dada a infraestrutura e as práticas já estabelecidas neste ambiente de pesquisa.

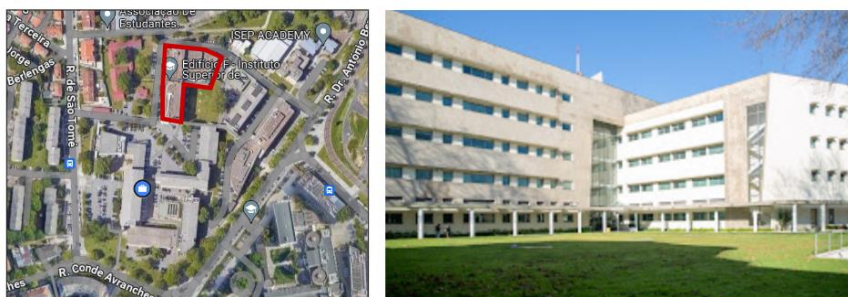


Figura 34 - Implantação geográfica do Edifício F do DEM. Edifício F, DEM, ISEP.

O OSLab4Man já adota princípios de *Open Design*, utilizando abordagens de código aberto tanto para *hardware* quanto para *software*, o que o torna um ambiente ideal para a implementação da nova Mini LF 5.0. A Indústria 5.0 destaca-se pela ênfase na colaboração entre humanos e máquinas, com foco em tecnologias que promovem a customização, a sustentabilidade e a inteligência aumentada. Neste contexto, a orientação para *Open Design* permite que as inovações sejam compartilhadas e desenvolvidas coletivamente, garantindo que o conhecimento e as tecnologias sejam acessíveis a todos os envolvidos. O laboratório já trabalha com sistemas ciberfísicos (CPS) e computação em nuvem (*Cloud*), elementos fundamentais para a Indústria 5.0, que exige a integração perfeita entre o mundo físico e o digital. Adicionalmente, a procura de soluções de baixo custo e práticas de código aberto no OSLab4Man garante que a

implementação de uma LF 5.0 seja não apenas tecnicamente viável, mas também economicamente sustentável. Esta redução de custos é crucial para garantir que as tecnologias e os processos desenvolvidos possam ser replicados e adaptados noutros contextos, independentemente das limitações de recursos. A escolha de desenvolver a Mini LF 5.0 no OSLab4Man é também justificada pela sua localização no DEM, que facilita a colaboração interdisciplinar e o acesso a recursos e conhecimentos técnicos avançados [91].

Portanto, o desenvolvimento da Mini LF 5.0 no OSLab4Man não só aproveita as capacidades existentes do atual laboratório, como também impulsiona o DEM a estar na vanguarda da pesquisa e inovação. Ao implementar esta LF, o DEM fortalece sua posição como um centro de excelência, proporcionando aos seus alunos, docentes, assim como empresas parceiras um ambiente de aprendizagem que reflete as mais recentes evoluções da indústria e da sociedade. Este projeto não só consolidará o papel do OSLab4Man como um laboratório de referência na área de produção avançada, como também servirá como um modelo replicável para outras instituições interessadas em explorar os benefícios da Indústria 5.0 e do *Open Design*.

Em suma, a escolha do OSLab4Man para o desenvolvimento da Mini LF 5.0 é uma decisão estrategicamente fundamentada, que alavanca as capacidades já existentes no laboratório e as direciona para atender às necessidades emergentes da Indústria 5.0. Ao fazê-lo, o DEM não só enriquece o seu portfólio de inovação e pesquisa, mas também contribui significativamente para a formação de futuros engenheiros preparados para enfrentar os desafios da indústria do futuro.

Além dos objetivos já descritos, que incluem a proposta de implementação de um sistema ciberfísico para a Indústria 5.0 em *Open Design*, a nova Mini LF 5.0 no OSLab4Man tem como propósito principal oferecer um ensino prático e preparar os alunos para uma visão realista da indústria. Esta LF não apenas permitirá aos estudantes e docentes conduzir pesquisas avançadas, mas também propõe um projeto de parceria com empresas, à semelhança de algumas fábricas de aprendizagem analisadas no subcapítulo 3.1.1 –Exemplos de aplicação, deste documento.

Neste modelo colaborativo, empresas que necessitem desenvolver ou testar produtos, ou até mesmo treinar seus colaboradores, poderão utilizar a infraestrutura da Mini LF 5.0 no ISEP. Trabalharão lado a lado com os alunos do ISEP, num ambiente de produção realista. Esta parceria proporciona aos estudantes uma oportunidade valiosa de vivenciar a indústria real, enquanto praticam e aprimoram as suas habilidades de trabalho em equipa e comunicação, colaborando diretamente com profissionais da indústria, geralmente com outras experiências enriquecedoras.

Assim, a LF 5.0 no OSLab4Man não só enriquece a experiência educativa dos alunos, mas também fortalece o vínculo entre o meio académico e o setor industrial, contribuindo para a formação de profissionais altamente qualificados e alinhados com as necessidades e inovações do mercado. A Tabela 21 apresenta uma síntese dos principais dados referentes ao desenvolvimento da nova Mini LF 5.0 - OSLab4Man a desenvolver, seguida por uma descrição concisa da missão e dos propósitos desta fábrica de aprendizagem.

Tabela 21 - Dados da Mini LF 5.0 no OSLab4Man

Nome	Mini LF 5.0 - OSLab4Man
Operador	Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) – Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP)
Localização	Laboratório OSLab4Man, Edifício F, ISEP – Porto, Portugal
Produto(s)	Variável, consoante as necessidades das empresas parceiras

Missão: Fomentar a integração entre o ambiente académico e industrial, proporcionando um ambiente de aprendizagem prático e inovador, alicerçado nas tecnologias da Indústria 5.0 e no *Open Design*, com o objetivo de formar profissionais altamente qualificados e preparados para enfrentar desafios reais do mercado.

Propósitos:

- Oferecer ensino prático e realista aos alunos, preparando-os para desafios industriais.
- Facilitar parcerias com empresas para o desenvolvimento e/ou testes de produtos e treino dos seus colaboradores.
- Promover a investigação académica através de projetos colaborativos.
- Desenvolver as competências de trabalho em equipa e comunicação dos alunos, através da colaboração direta com profissionais da indústria.

3.3.2. Análise do Laboratório OSLab4Man atual

O *Open Science Lab for Manufacturing* (OSLab4Man) foi concebido com o intuito de criar um espaço inovador e acessível que combina tecnologias avançadas de produção com princípios de *Open Design*. Este laboratório foi idealizado para responder à crescente necessidade de ambientes que integrem a teoria com a prática, promovendo a inovação e a colaboração aberta no campo da produção. O projeto do OSLab4Man surgiu como uma iniciativa colaborativa, envolvendo uma equipa multidisciplinar composta por investigadores, engenheiros e docentes do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), bem como de outras instituições académicas e industriais. O objetivo foi criar um laboratório que fosse, não só um centro de formação prática para alunos, mas também um espaço para investigação e desenvolvimento de novas tecnologias (Figura 35). A opção pelo *Open Design* foi uma decisão estratégica para garantir que o laboratório fosse acessível e sustentável, utilizando tecnologias *open source* e soluções de baixo custo. Esta abordagem não só reduz os custos, mas também promove a replicabilidade das soluções para outras instituições [91].

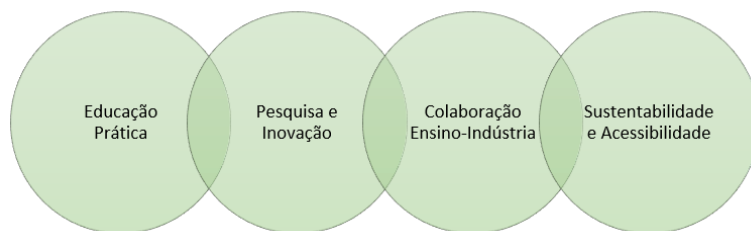


Figura 35 - Principais objetivos do OSLab4Man

Atualmente, o OSLab4Man é um laboratório ativo e funcional, que desempenha um papel crucial na formação de alunos e na pesquisa em produção. O laboratório é um espaço dinâmico que combina ensino prático com investigação aplicada, mantendo-se na vanguarda das tecnologias de produção e continua a servir como um ponto de encontro entre o ensino e a indústria, promovendo a colaboração e a transferência de tecnologia. O OSLab4Man é estruturado em camadas distintas, representadas na Figura 36, que combinam componentes computacionais (*software*) e físicos (*hardware*) para criar um ambiente experimental altamente funcional e acessível.

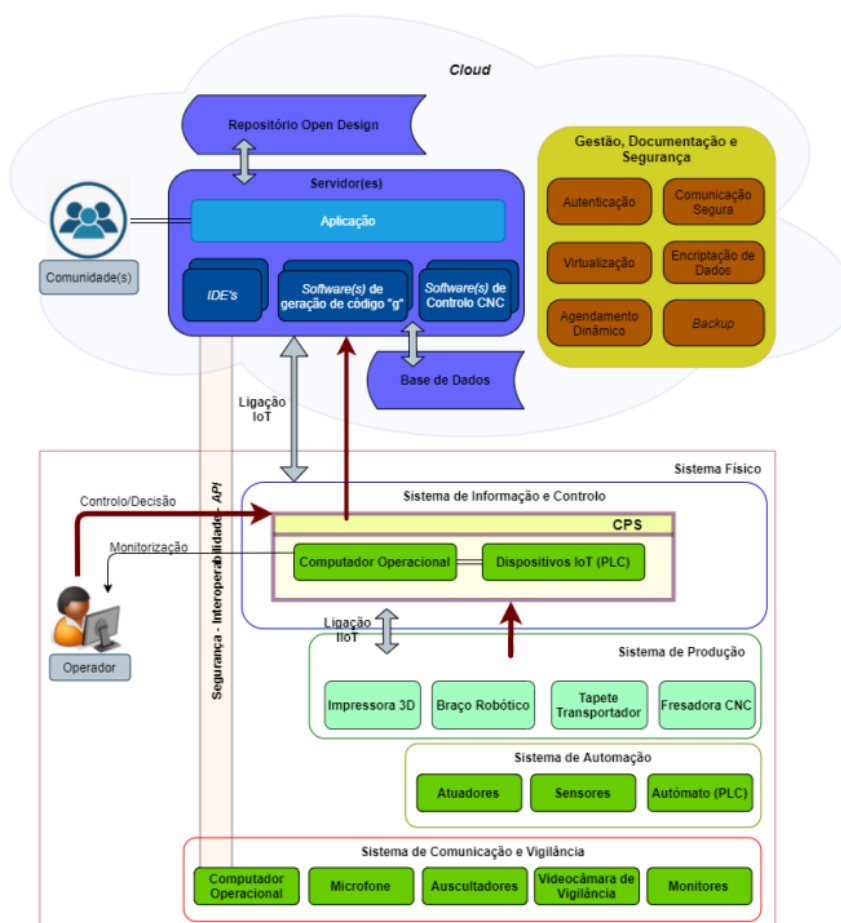


Figura 36 - Arquitetura proposta do OSLab4Man. Fonte:[92].

Software:

- **Repositório de Dados:**
 - GitHub: Serve como o repositório central para a gestão e armazenamento de documentos e código fonte. Através do GitHub, é possível aceder a uma vasta gama de arquivos e colaborar na partilha de recursos relacionados com os projetos do laboratório.
- **Servidores:**
 - Ambiente de Execução (*Runtime Environment*): O Apache HTTP Server é utilizado para gerir e fornecer aplicações web, garantindo a execução adequada das aplicações no servidor.
 - Rocket.Chat: Aplicação *open source* utilizada para comunicação e monitorização. Esta ferramenta permite a interação entre os utilizadores e a seleção dos produtos desejados, facilitando a comunicação dentro do laboratório.
 - NetBeans: IDE que suporta a programação de Sistemas Multiagente (MAS), utilizando o *framework* Java Agent DEvelopment (JADE). Esta ferramenta é essencial para o desenvolvimento de aplicações complexas de controlo e automação.
 - Arduino IDE: Utilizado para a programação de dispositivos baseados em Arduino. Fornece uma biblioteca de procedimentos comuns para o tratamento de sinais de entrada e saída.
- **Software de Gcode:**
 - OctoPrint: Utilizado para o controlo remoto de impressoras 3D, permitindo a gestão e monitorização das impressões através de uma interface web.
 - dxf2gcode: Software para converter arquivos DXF em Gcode, necessário para o funcionamento da fresadora CNC e para a execução de operações de corte e gravação.
- **Comunicação com Recursos Físicos:**
 - OctoPrint: Gere a comunicação com a impressora 3D, assegurando que as operações de impressão sejam realizadas de forma eficiente.
 - Grbl: Software para controlar a fresadora CNC, permitindo a execução precisa das operações de corte.
 - Pronterface: Aplicação que comunica com o braço robótico, facilitando o controlo e a coordenação das operações robóticas.

Hardware:

- **Sistema de Informação e Controle:**
 - Raspberry Pi 400: Atua como o núcleo do sistema de informação e controle, gerindo a conexão com a nuvem e recebendo dados. Permite a comunicação direta com a impressora 3D e a coordenação geral das operações do laboratório.
 - Controllino: Placa de controle industrial baseada em Arduino, que combina a simplicidade do Arduino com a robustez e fiabilidade de um PLC industrial. É responsável pela comunicação e controle dos sistemas de produção.
- **Sistema de Produção:**
 - BeeveryCreative B2X300: Impressora 3D que realiza a criação de protótipos e peças, permitindo a produção de modelos tridimensionais com alta precisão.
 - BCN3D MOVEO: Braço robótico com uma estrutura *open source* e de baixo custo, construída através de tecnologia de produção aditiva.
 - 3018 PRO: Fresadora CNC utilizada para cortar e gravar materiais com precisão, proporcionando uma capacidade avançada para a produção de peças.
 - Tapete Transportador: Facilita o transporte de peças entre diferentes fases do processo de produção, otimizando a eficiência da produção.
- **Sistema de Comunicação e Vigilância:**
 - ArduCAM: Conjunto de quatro câmaras de vigilância compatíveis com placas Arduino, usadas para monitorizar o ambiente do laboratório e garantir a segurança dos equipamentos e operações.
 - *Headphones* e Microfones: Utilizados para a comunicação entre operadores e membros da comunidade, facilitando a colaboração e o acompanhamento das atividades no laboratório.

De modo a compactar a informação relativa aos equipamentos atuais do OSLab4Man, segue uma lista de materiais dos componentes físicos do OSLab4Man mencionados anteriormente, assim como as suas quantidades na Tabela 22:

Tabela 22 - Lista de materiais dos componentes físicos do OSLab4Man. Adaptado de: [91].

Componente	Modelo do Componente no OSLab4Man	Quantidade
Computador Operacional	Raspberry Pi 400	1
PLC	Controllino	1
Impressora 3D	BeeveryCreative B2X300	1
Braço Robótico	BCN3D MOVEO	1
Fresadora 3D	3018 PRO	1
Tapete Transportador	Desenvolvido com sobras de materiais	1
Câmaras de Vigilância	ArduCAM (OV9782)	4
Headphones e Microfones	Tacens AH118 Headset	1

A Figura 37 apresenta uma visão prática do funcionamento do sistema físico, onde se pode verificar que o braço robótico, a impressora 3D e a fresadora CNC estão conectados a um dispositivo IoT. Juntos executam as operações e movimentos necessários para produzir o produto final, que é, posteriormente, colocado no tapete transportador para ser armazenado [91].

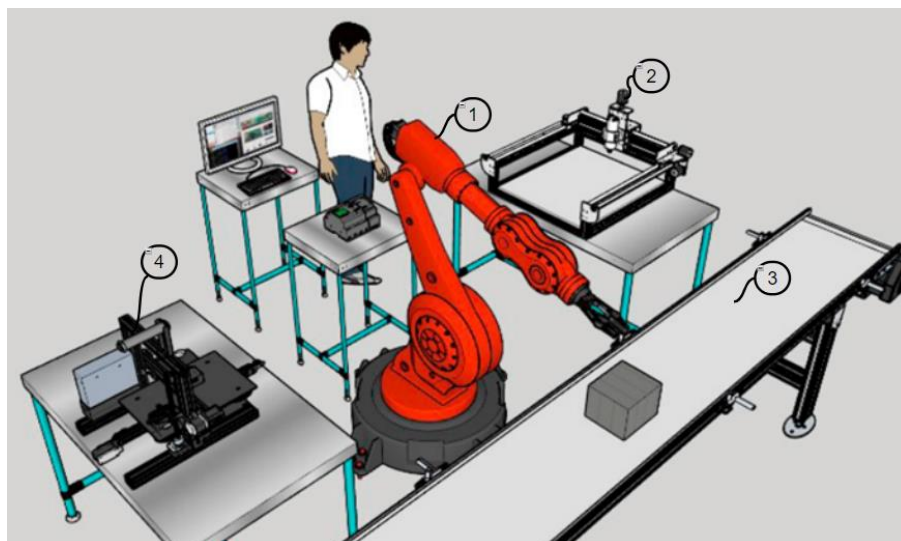


Figura 37 - Modelo representativo do OSLab4Man. 1) Braço Robótico, 2) Fresadora CNC, 3) Tapete transportador, 4) Impressora 3D. Fonte: [91].

No que diz respeito ao compromisso com as boas práticas em matéria de sustentabilidade, o OSLab4Man assume uma posição firme. Este laboratório não só adota tecnologias de ponta e abordagens de código aberto para a produção, como também alinha as suas práticas e objetivos com os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas. Os ODS constituem uma agenda global que visa erradicar a pobreza, proteger o planeta e garantir que todas as pessoas possam desfrutar de paz e prosperidade até 2030 [93],[94].

Através da sua dimensão tecnológica e social, o OSLab4Man contribui diretamente para objetivos como Educação de Qualidade, Igualdade de Género e Parcerias para a Implementação dos Objetivos, enquanto promove, de forma indireta, ações que combatam a pobreza, incentivam o consumo e a produção responsáveis e impulsionam a inovação e o crescimento económico sustentável. Com estas iniciativas, o OSLab4Man reforça o seu compromisso em promover uma produção mais inclusiva, acessível e sustentável, em consonância com os princípios dos ODS [95].

A Tabela 23 que se segue resume a contribuição do OSLab4Man para os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, o que destaca o papel do laboratório como uma ferramenta educacional e tecnológica comprometida com a sustentabilidade e a inclusão social.

Tabela 23 - Contribuição do OSLab4Man como ferramenta educativa para a sustentabilidade relativamente aos 17 ODS. Adaptado de: [95]

ODS	Efeito	
	Direto	Indireto
1. Erradicação da Pobreza		X
2. Erradicação da Fome		X
3. Saúde e Bem-Estar	-	-
4. Educação de Qualidade	X	
5. Igualdade de Género	X	
6. Água Potável e Saneamento		X
7. Energia Acessível e Limpa		X
8. Trabalho Decente e Crescimento Económico		X
9. Indústria, Inovação e Infraestruturas		X
10. Redução das Desigualdades		X
11. Cidades e Comunidades Sustentáveis		X
12. Consumo e Produção Responsáveis		X
13. Ação Climática	-	-
14. Vida na Água	-	-
15. Vida na Terra	-	-
16. Paz, Justiça e Instituições Eficazes	-	-
17. Parcerias e Meios de Implementação	X	

3.3.3. Produto a Desenvolver

A Mini LF 5.0 é uma iniciativa projetada para transformar a forma como os produtos são desenvolvidos no OSLab4Man do ISEP, aproveitando os conceitos de *Open Design* e *Open Source*. Este subcapítulo descreve a abordagem flexível da Mini LF 5.0, a integração de práticas sustentáveis e a utilização dos recursos disponíveis no laboratório para otimizar a produção e oferecer experiências de aprendizagem valiosas. A flexibilidade é uma característica que define a Mini LF 5.0. O conceito de produto variável permite ao laboratório adaptar-se rapidamente às necessidades e exigências das empresas parceiras, oferecendo soluções sob medida que atendem a uma ampla gama de requisitos. Esta abordagem não só responde às necessidades do mercado, mas também enriquece a experiência prática dos alunos.

Por outro lado, a integração de práticas sustentáveis e de reciclagem é uma prioridade na Mini LF 5.0. A LF adotará uma abordagem consciente em relação ao meio ambiente, procurando minimizar o impacto das suas atividades e promover a economia circular. Esta abordagem

passará pela escolha dos materiais, processos de fabrico, reciclagem e reutilização e ainda pela consciencialização de todos os participantes da LF.

1 Escolha de Materiais:

- **Materiais Recicláveis e Compostáveis:** O laboratório procurará utilizar plásticos e metais recicláveis, bem como filamentos para impressão 3D que sejam recicláveis ou compostáveis. Esta abordagem reduz a quantidade de resíduos gerados e contribui para uma gestão mais eficiente dos recursos.
- **Materiais de Baixo Impacto Ambiental:** Optar por materiais cuja produção e descarte tenham um impacto ambiental reduzido. Isso inclui a escolha de fornecedores que pratiquem métodos de produção sustentáveis e a utilização de materiais que sejam menos prejudiciais ao meio ambiente.

2 Processos de Fabrico:

- **Minimização de Desperdícios:** O laboratório implementará práticas para reduzir o desperdício de materiais durante o fabrico. Por exemplo, ajustando as configurações das máquinas e otimizando os processos de impressão 3D para utilizar menos material sem comprometer a qualidade do produto final.
- **Eficiência Energética:** Serão adotadas medidas para garantir que os equipamentos e processos utilizados sejam energeticamente eficientes, reduzindo o consumo de energia e a pegada de carbono associada à produção.

3 Reciclagem e Reutilização:

- **Sistema de Recolha de Resíduos:** Um sistema será implementado para a recolha e reciclagem de resíduos gerados na Mini LF 5.0, como sobras de filamentos ou outros materiais de impressão. Isso ajudará a manter o laboratório limpo e a reduzir a quantidade de resíduos enviados para aterros.
- **Reaproveitamento de Componentes:** Sempre que possível, peças e componentes de projetos anteriores serão reaproveitados em novos projetos, evitando a necessidade de novos materiais e reduzindo o desperdício.

4 Consciencialização dos Participantes:

- **Formação em Sustentabilidade:** Os alunos serão instruídos sobre a importância da sustentabilidade na indústria e aprenderão a aplicar práticas responsáveis nos seus projetos. Esta formação contribuirá para uma maior consciencialização ambiental entre os futuros profissionais da área.
- **Iniciativas de Sustentabilidade:** O laboratório promoverá eventos e *workshops* focados em práticas sustentáveis, incentivando a troca de ideias e a aplicação de conceitos de economia circular na indústria.

Um aspeto crucial a considerar na seleção do produto a desenvolver é a disponibilidade e a capacidade dos recursos disponíveis na Mini LF 5.0. É essencial compreender o que cada equipamento do OSLab4Man pode produzir e como esses recursos podem ser utilizados de

forma integrada para alcançar os objetivos do projeto. Cada recurso desempenha um papel específico no processo de fabrico e é utilizado de forma integrada para otimizar o fluxo de trabalho e a qualidade dos resultados.

- **Impressora 3D:** A impressora 3D do OSLab4Man é uma ferramenta essencial para a criação de protótipos e peças complexas. Utiliza filamentos variados, como plásticos e compósitos, para construir objetos camada por camada com alta precisão. Ideal para a produção de modelos iniciais, componentes personalizados e protótipos funcionais. Permite ajustes rápidos e alterações no *design*, facilitando a experimentação e a inovação.
- **Fresadora CNC:** A fresadora CNC é uma máquina de precisão que realiza a maquinagem de peças a partir de materiais sólidos, como plásticos e metais. É capaz de criar peças com alta exatidão e acabamentos detalhados. Utilizada para fabricar componentes finais, ajustar protótipos e criar peças estruturais com precisão. A fresadora CNC é uma ferramenta crucial para projetos que exigem acabamentos de alta qualidade e tolerâncias rigorosas.
- **Braço Robótico:** O braço robótico é uma peça fundamental do sistema automatizado do OSLab4Man. Pode ser programado para executar uma variedade de tarefas repetitivas com precisão, como montagem e manipulação de peças. Facilita processos de montagem automática, a realização de tarefas repetitivas e a integração com outras máquinas. A automação proporcionada pelo braço robótico melhora a eficiência e a consistência na produção.
- **Tapete Transportador:** O tapete transportador é utilizado para movimentar peças e produtos entre diferentes estações de trabalho dentro do laboratório. Melhora a organização e o fluxo de trabalho. Permite a transferência eficiente de peças entre a impressora 3D, a fresadora CNC e outras áreas do laboratório. Contribui para uma operação mais fluida e coordenada, reduzindo o tempo de espera e o manuseamento manual.

A Mini LF 5.0 oferece uma oportunidade valiosa para o desenvolvimento de produtos flexíveis e adaptáveis, alinhados tanto com as necessidades específicas das empresas parceiras quanto com os princípios de sustentabilidade. É certo que devem ter sido em conta os recursos avançados do OSLab4Man e devem sempre ser implementadas práticas sustentáveis, a Mini LF 5.0 não apenas impulsiona a inovação na produção, mas também proporciona uma experiência prática enriquecedora para os alunos (Figura 38). Esta abordagem integrada não só resulta na criação de soluções eficazes e ambientalmente responsáveis, mas também beneficia diretamente ambas as partes envolvidas. Os alunos do ISEP ganham uma valiosa experiência prática que os prepara para os desafios futuros da produção, enquanto as empresas parceiras obtêm soluções personalizadas e treinam os seus colaboradores de forma eficiente. Assim, a Mini LF 5.0 promove uma colaboração mutuamente benéfica que gera impacto positivo tanto no desenvolvimento académico quanto na evolução do setor industrial.



Figura 38 - Requisitos para a Seleção do Produto a desenvolver

3.3.4. Equipamentos e Tecnologias Propostas

Embora o OSLab4Man tenha alcançado muitos dos seus objetivos, continua a enfrentar desafios relacionados com a atualização tecnológica e a necessidade de novos recursos. A equipa está constantemente a procurar maneiras de melhorar e expandir as capacidades do laboratório, garantindo que continue a ser um recurso valioso para a educação e a pesquisa em produção.

Dado que o OSLab4Man foi desde a sua conceção estruturado com base em princípios como *open design*, *open source*, acessibilidade e inovação a baixo custo, o desenvolvimento de um projeto para uma fábrica de aprendizagem 5.0 neste contexto torna-se uma tarefa facilitada. Isso deve-se ao facto de que muitas das abordagens e objetivos desta nova LF já estarem alinhados com os princípios fundamentais do próprio laboratório. A proposta para a implementação de uma Mini LF 5.0 no OSLab4Man consiste, portanto, em sugerir equipamentos e tecnologias que complementem e expandam as capacidades do laboratório, transformando-o numa verdadeira fábrica de aprendizagem voltada para a Indústria 5.0, sustentada em práticas de *open design*.

Considerando que o OSLab4Man já dispõe de sistemas de Informação e Controlo e de Produção que são adequados e suficientes para o novo projeto, as tecnologias, equipamentos e plataformas propostos para a Mini LF 5.0 focam principalmente nas áreas de sustentabilidade, comunicação, e introdução de novas plataformas de cocriação e dispositivos de AR e VR. A seguir, detalham-se estas adições e as vantagens que oferecem ao projeto:

Sustentabilidade

- **OpenEMS (*Open Energy Management System*)**: Ideal para a monitorização e gestão de energia, especialmente para integrar fontes de energia renovável, como painéis

fotovoltaicos e otimizar o consumo energético da LF. O OpenEMS é configurado para monitorizar em tempo real a produção e o consumo de energia.

- **OpenLCA (*Open Life Cycle Assessment*):** Ferramenta robusta para realizar análises de ciclo de vida e avaliar o impacto ambiental dos processos de produção, ajudando a identificar áreas para redução de resíduos e otimização do uso de materiais. Ajusta as práticas operacionais para reduzir a pegada ecológica.
- **Odoo:** Ferramenta de gestão empresarial (ERP) que permite monitorizar o uso de materiais, evitar desperdícios, e promover a reutilização ou reciclagem de resíduos, através dos seus módulos de gestão de inventário e produção. Possibilita o rastreamento dos materiais, desde a entrada no stock até ao uso na produção. Implementa práticas de economia circular, como a reutilização de sobras e a reciclagem de materiais.
- **InfluxDB:** Armazena e organiza dados de séries temporais, como consumo de energia, produção de resíduos e eficiência dos materiais. Recolhe dados de OpenEMS, Odoo e OpenLCA e armazena-os, preparando a integração com Grafana.
- **Grafana:** Visualiza dados armazenados no InfluxDB em *dashboards* interativos e gráficos. Exibe dados em tempo real e configura alertas para monitorização contínua e ajustes operacionais.

Tecnologias AR/VR

- **Nreal Light:** Inicialmente, consideraram-se os óculos HoloLens da Microsoft como uma solução para a integração de tecnologias de AR. Os HoloLens oferecem uma interação imersiva com o ambiente físico e virtual, sendo ideais para a visualização de dados em tempo real, assistência remota e treinos interativos, com a capacidade de sobrepor informações virtuais ao mundo real. No entanto, devido ao elevado custo desses dispositivos, procuraram-se alternativas mais acessíveis. Os Nreal Light surgem como uma excelente opção para quem procura uma solução de AR leve e económica. Estes óculos permitem a visualização de dados e interação com o ambiente físico de forma prática, integrando-se facilmente com um *smartphone*, oferecendo uma solução de AR eficiente e de custo reduzido.
- **Oculus Quest 2:** À semelhança do equipamento de AR, os Oculus Rift da Meta eram a primeira opção para a tecnologia de VR, proporcionando uma experiência imersiva completa em ambientes virtuais. No entanto, também devido ao elevado custo, optou-se por uma alternativa mais acessível. O Oculus Quest 2 é uma escolha excelente para quem deseja uma experiência completa de VR sem a necessidade de um PC, oferecendo uma solução imersiva e de custo mais reduzido para simulações e desenvolvimento de protótipos virtuais, tornando-o uma opção eficiente e económica.
- **Blender:** *Software* de cocriação de modelação 3D, animação e visualização gráfica *open source*. Ideal para criar e exportar modelos 3D que podem ser utilizados em ambientes AR/VR, facilitando o desenvolvimento de protótipos e simulações.

- **OpenSimulator:** Plataforma *open source* de treino e simulações para a criação de mundos virtuais e ambientes de simulação 3D. Permite a construção de ambientes virtuais personalizáveis para treino e outras aplicações, proporcionando uma experiência imersiva.
- **Mozilla Hubs:** Plataforma *open source* para criar e explorar espaços virtuais colaborativos. Ideal para reuniões virtuais e colaboração em ambientes imersivos, promovendo a cocriação e o trabalho em equipa.

Comunicação

- **Google Assistant:** Assistente virtual para controlo por voz de alguns sistemas, ou mesmo para fornecer notificações e atualizações em tempo real aos operadores e técnicos.
- **OBS Studio:** *Software* gratuito e de código aberto utilizado para gravação e transmissão de vídeo em tempo real. Visa otimizar a comunicação e a colaboração com *stakeholders* externos, incluindo estudantes, parceiros industriais e pesquisadores. Esta funcionalidade permitirá a realização de demonstrações ao vivo, *webinars* e sessões de treino interativas, além de fomentar a transparência e o envolvimento com a comunidade académica e industrial. O *streaming* ao vivo também facilita a recolha de *feedback* instantâneo e a colaboração remota, enriquecendo a experiência educacional e promovendo um ambiente de aprendizagem mais dinâmico e conectado.
- **Raspberry Pi Camera Module v2:** Câmara compacta de 8MP que pode ser integrada ao Raspberry Pi 400 para transmissões ao vivo e gravações, com a vantagem de ser facilmente programável e integrável com o OBS Studio.

Sensores

- **DHT22:** Sensor de ambiente que fornece leituras precisas de temperatura e humidade. Ideal para projetos *open source* com suporte extenso em plataformas como Arduino e Raspberry Pi.
- **MH-Z19:** Sensor de qualidade de ar que mede a concentração de CO₂, também compatível com plataformas como Arduino e Raspberry Pi.
- **Endstop V1.2:** Sensor ótico para fim de curso, mais preciso e sem contato mecânico, ideal para sistemas CNC e impressoras 3D.
- **Shelly 1PM:** Sensor de monitorização de energia com medição de consumo e controlo remoto, adequado para integração com sistemas de automação.

Segue a Tabela 24 abaixo atualizada com os equipamentos do OSLab4Man e os novos equipamentos propostos para completar a Mini LF 5.0, preenchidos a cinza-claro na tabela:

Tabela 24 - Lista de materiais dos componentes físicos da Mini LF 5.0.

Componente	Modelo do Componente na Mini LF 5.0	Quant.
Computador Operacional	Raspberry Pi 400	1
PLC	Controllino	1
Impressora 3D	BeeveryCreative B2X300	1
Braço Robótico	BCN3D MOVEO	1
Fresadora 3D	3018 PRO	1
Tapete Transportador	Desenvolvido com sobras de materiais	1
Monitor	Asus VS197DE	2
Câmaras de Vigilância	ArduCAM (OV9782)	4
Headphones e Microfones	Tacens AH118 Headset	1
Óculos AR	Nreal Light	1
Óculos VR	Oculus Quest 2	1
Assistente Virtual	Google Assistant	1
Câmaras web	Raspberry Pi Camera Module v2	2
Sensor de temperatura e humidade	DHT22	1
Sensor de qualidade de ar (CO2)	MH-Z19	1
Sensor de fim de curso	Endstop V1.2	1
Sensor de monitorização de energia	Shelly 1PM	1

3.3.5. Estrutura da Mini LF 5.0

É importante sublinhar que se pretende manter a estrutura já existente do laboratório (Figura 36) adicionando apenas as tecnologias, plataformas e equipamentos que sejam considerados necessários e que representem uma mais-valia para aproximar o laboratório ao conceito de Indústria 5.0. Esta abordagem é especialmente relevante uma vez que o OSLab4Man foi originalmente desenvolvido no contexto da Indústria 4.0.

A estrutura inicial do OSLab4Man será mantida, com a *Cloud* e os sistemas de Informação e Controlo, Produção, Automação, e Comunicação e Vigilância preservados e atualizados com novos equipamentos e plataformas que trazem especificações avançadas e benefícios aprimorados para o sistema.

1. Cloud

Desta forma, a nível funcional e para suportar os serviços do mundo físico, o sistema recorre à *Cloud Computing*, que corresponde à primeira camada da arquitetura proposta. Nesta camada, o processo inicia-se no repositório GitHub, onde se encontra disponível uma vasta gama de produtos, sejam eles personalizados ou não, fornecidos pela comunidade, que tem acesso livre a este repositório. Toda a informação agregada é preservada e gerida pelos servidores na *cloud* [91].

Os servidores utilizam o Apache HTTP Server como Ambiente de Execução (*Runtime Environment*) e empregam a aplicação *open source* Rocket.Chat para comunicação e monitorização, bem como para a seleção dos produtos desejados. Para o desenvolvimento do

backend, são utilizadas IDEs como o NetBeans, que facilita a programação de Sistemas Multiagentes (MAS) com o suporte do *framework* Java Agent DEvelopment (JADE), e a Arduino IDE, para a programação associada a sinais de entrada e saída [91].

Adicionalmente, os servidores podem recorrer a *software* adicional para a geração de código G, utilizando OctoPrint para impressão 3D e dxf2gcode para fresagem CNC, sempre que o ficheiro obtido do repositório não estiver no formato necessário. O código G é uma linguagem de programação de baixo nível que serve como intermediária entre o controlador e a máquina, que instrui a máquina sobre todos os movimentos a serem feitos, baseando-se em coordenadas e pontos para gerar caminhos de ferramenta. Este tipo de controlo, conhecido como Controlo Numérico Computorizado (CNC), é amplamente utilizado tanto na produção subtrativa (como a fresagem) quanto na produção aditiva (impressão 3D). Na impressão 3D, o código G é gerado a partir de arquivos STL através de programas conhecidos como Slicers, que convertem modelos 3D em instruções de impressão camada por camada[92] . Por fim, para comunicar com os recursos físicos, os servidores utilizam *softwares* especializados como OctoPrint para a impressora 3D, Grbl para a fresadora CNC e Pronterface para o braço robótico.

Além das funcionalidades já mencionadas, a *cloud* foi recentemente ampliada com a inclusão de um conjunto de *softwares* dedicados à gestão de sustentabilidade e à comunicação, abrangendo também as tecnologias associadas à realidade aumentada e à realidade virtual. Estes novos *softwares*, já detalhados no ponto 3.3.4 do presente documento, foram alojados na *cloud*, permitindo uma gestão centralizada e eficiente dos processos.

No âmbito da sustentabilidade, foi integrado o OpenEMS, ideal para a monitorização e gestão de energia, especialmente na integração de fontes de energia renovável, como painéis fotovoltaicos e na otimização do consumo energético. Também foi adicionado o OpenLCA, uma ferramenta para realizar análises de ciclo de vida e avaliar o impacto ambiental dos processos de produção, ajudando a identificar áreas para a redução de resíduos e a otimização do uso de materiais. Para a gestão empresarial, o Odoo foi implementado, permitindo monitorizar o uso de materiais, evitar desperdícios, e promover a reutilização ou reciclagem de resíduos através dos seus módulos de gestão de inventário e produção. Complementarmente, o InfluxDB foi adicionado para armazenar e organizar dados de séries temporais, como consumo de energia, produção de resíduos e eficiência dos materiais, recolhendo informações de sistemas como OpenEMS, Odoo e OpenLCA. Estes dados são então visualizados através do Grafana, que exibe informações em tempo real e permite a configuração de alertas para uma monitorização contínua e ajustes operacionais.

No domínio da comunicação, o OBS Studio foi integrado para otimizar a gravação e transmissão de vídeo em tempo real, facilitando a comunicação e colaboração com estudantes, parceiros industriais e investigadores. Além disso, foi implementado o Blender, um *software* de modelação 3D e animação *open source*, ideal para criar e exportar modelos 3D utilizados em ambientes AR/VR, facilitando o desenvolvimento de protótipos e simulações. Para criar ambientes virtuais e simulações 3D, o OpenSimulator foi adicionado, proporcionando uma plataforma para treino e outras aplicações, oferecendo uma experiência imersiva. Por fim, o Mozilla Hubs foi incluído para criar e explorar espaços virtuais colaborativos, promovendo a cocriação e o trabalho em equipa em ambientes imersivos.

Com estas adições, a *cloud* (Figura 39) não só centraliza a gestão de todos os recursos e processos da Mini LF 5.0, mas também aprimora a eficiência, sustentabilidade e comunicação dentro e fora da organização.

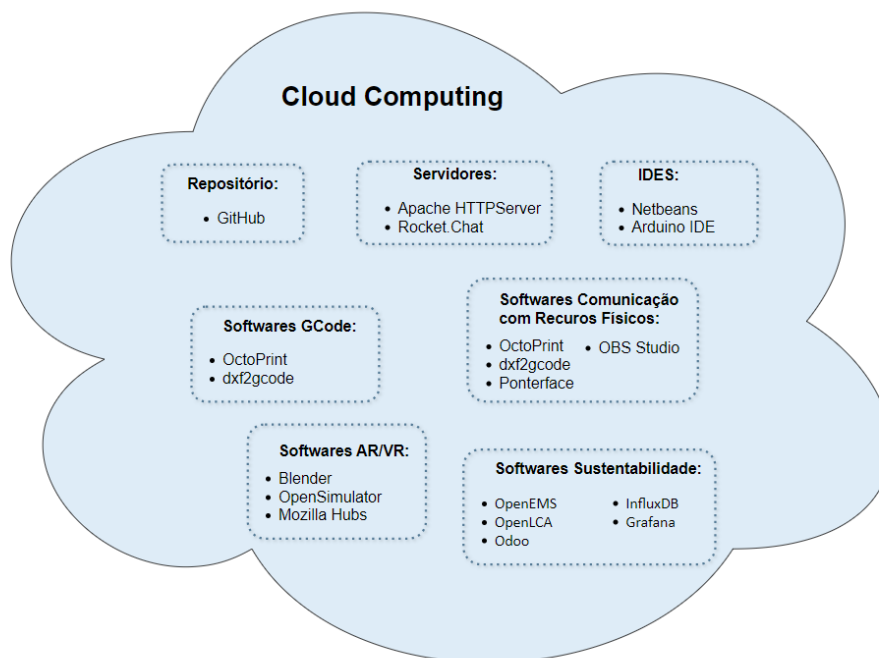


Figura 39 - *Cloud* da Mini LF 5.0 e respectivos componentes.

2. Sistema de Informação e Controle

O sistema de informação e controlo da Mini LF 5.0 é constituído por dois dispositivos essenciais que desempenham funções cruciais na arquitetura proposta: o Raspberry Pi 400 e o Controllino (Figura 40). Estes dispositivos são responsáveis por assegurar a gestão eficiente das operações e a integração com a *cloud*, garantindo assim a conectividade e o controlo necessários para o funcionamento do laboratório [91].

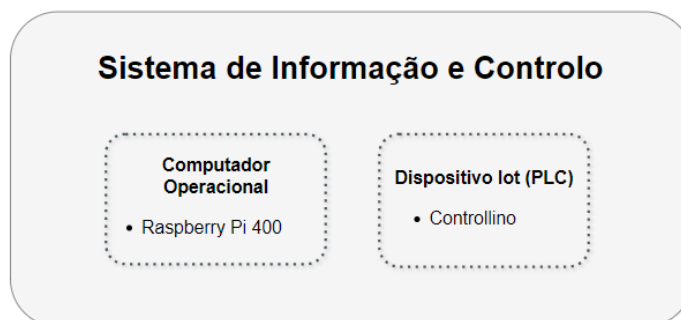


Figura 40 - Sistema de Informação e Controlo da Mini LF 5.0 e respectivos componentes.

O Raspberry Pi 400, representado pela letra (a) na Figura 41, é o núcleo do sistema de informação. Este dispositivo, que é um computador integrado num teclado compacto, possui

um processador *quad-core* de 64 bits, conectividade *wireless*, suporte para dois monitores e capacidade de reprodução de vídeo em 4K. Estas características fazem do Raspberry Pi 400 uma solução ideal para tarefas que exigem alta capacidade de processamento e comunicação. A sua principal função na arquitetura da Mini LF 5.0 é assegurar a ligação à nuvem, onde recebe e processa informações cruciais para o funcionamento do laboratório. Adicionalmente, o Raspberry Pi 400 facilita a comunicação direta com a impressora 3D, que possibilita o controlo preciso e eficiente das operações de produção [92].

O Controllino, assinalado pela letra (b) na Figura 41 atua como o componente de controlo deste sistema. Este dispositivo é essencialmente um controlador lógico programável (PLC), desenvolvido com base na plataforma *open source* Arduino. A sua arquitetura aberta e compatibilidade com outros dispositivos tornam-no altamente flexível e adaptável, características essenciais num ambiente industrial em constante evolução. O Controllino combina a versatilidade do ecossistema Arduino com a robustez, segurança e fiabilidade típicas de um PLC de nível industrial. Isto significa que, além de ser uma excelente ferramenta para prototipagem, o Controllino é também perfeitamente adequado para a implementação em produtos finais que requerem um elevado grau de confiança e segurança [92].



Figura 41 - Componentes físicos do Sistema de Informação e Controlo: a) Raspberry Pi 400, b) Controllino.

A integração entre o Raspberry Pi 400 e o Controllino permite uma coordenação eficiente entre o Sistema de Informação e Controlo. O Raspberry Pi 400, ao estabelecer a ligação à cloud, recebe dados que são posteriormente utilizados pelo Controllino para controlar os processos de automação e monitorização no laboratório. Esta combinação proporciona um sistema flexível, escalável e seguro, capaz de atender às exigências de um ambiente industrial moderno e adaptado às necessidades de uma fábrica de aprendizagem [91].

3. Sistema de Produção

O Sistema de Produção da Mini LF 5.0 é composto por quatro equipamentos principais: uma impressora 3D BeeveryCreative B2X300, um braço robótico BCN3D MOVEO, uma fresadora CNC 3018 PRO e um tapete transportador, como representado na Figura 42. Estes quatro equipamentos permitem realizar várias operações de produção, desde a produção aditiva

através da impressora 3D até à produção subtrativa com a fresagem CNC, auxiliados pela integração de automação através do braço robótico.



Figura 42 - Sistema de Produção da Mini LF 5.0 e respetivos componentes.

A impressora 3D BeeveryCreative B2X300 destaca-se pelo seu elevado volume de impressão, o que permite a produção de objetos grandes ou a produção de vários objetos simultaneamente, sem necessidade de qualquer intervenção humana. Com uma capacidade de até dezoito litros, a impressora é extremamente versátil e permite a utilização de dois tipos diferentes de materiais, cada um deles com temperaturas de extrusão distintas. Outra característica importante deste componente é a capacidade de detetar a ausência de filamento e reagir adequadamente, assim como a possibilidade de retomar a impressão após uma interrupção de energia, garantindo assim a continuidade do trabalho sem perda de material ou tempo.

Por outro lado, o braço robótico BCN3D MOVEO é um dos componentes centrais deste sistema devido ao seu *design open source* e custo acessível. Desenvolvido pela BCN3D Technologies, este braço robótico foi projetado para ser uma solução de baixo custo, com a estrutura completamente impressa em material Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) e utilizando tecnologia de produção aditiva. O controlo dos componentes eletrónicos é feito através de um *software* Arduino também *open source*, o que facilita a sua integração com o Sistema de Informação e Controlo.

A fresadora CNC 3018 PRO é uma máquina de fresagem que permite uma experiência prática no corte e esculpimento de materiais, desde plásticos até alumínio macio. Com este equipamento podem ser feitos cortes, tanto na vertical, como na horizontal, e é também possível criar peças com elevada precisão a partir de blocos de material bruto. O kit da CNC 3018 PRO, após montado, transforma-se numa mesa CNC estável com uma área de trabalho de 300 x 180 mm nos eixos X e Y, e um fuso que pode alcançar uma profundidade de 45 mm. A máquina inclui uma pinça ER-11 que suporta uma variedade de fresadoras de topo, oferecendo assim versatilidade na seleção de ferramentas para diferentes tipos de trabalho. A CNC 3018 PRO é uma excelente ferramenta para aprender e aplicar conceitos de CNC, permitindo uma visão detalhada de como estas máquinas operam tanto a nível mecânico quanto de programação.

Embora com menos detalhes disponíveis, o tapete transportador complementa este sistema de produção ao facilitar a movimentação de peças entre os diferentes estágios do processo de produção. Este componente é essencial para automatizar o fluxo de trabalho, assegurando a

transferência eficiente de peças entre a impressora 3D, o braço robótico e a fresadora CNC, minimizando o tempo de manipulação manual e aumentando a eficiência global do sistema (Figura 43).

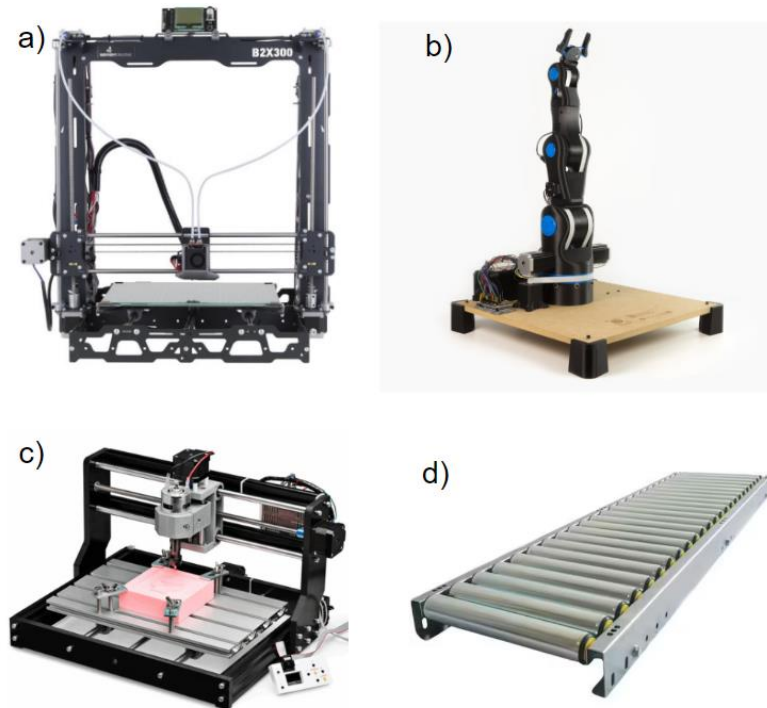


Figura 43 - Componentes físicos do Sistema de Produção: a) Impressora 3D BeeveryCreative B2X300, b) Braço robótico BCN3D MOVEO, c) Fresadora CNC 3018 PRO, d) Tapete transportador.

Em suma, o sistema de produção da Mini LF 5.0 integra diversas tecnologias para criar um fluxo automatizado e eficiente. A impressora 3D produz componentes que o braço robótico manipula e posiciona na fresadora CNC para fresagem. O tapete automatiza o transporte entre etapas, garantindo uma produção contínua e otimizada, adequada às exigências da indústria 5.0.

4. Sistema de Automação

O Sistema de Automação desempenha um papel fundamental na coordenação e execução das operações na fábrica de aprendizagem, garantindo uma integração perfeita entre os diferentes sistemas e equipamentos. A automação da LF é assegurada por uma combinação de atuadores, PLC e sensores, que trabalham em conjunto para monitorizar e controlar as operações em tempo real (Figura 44).

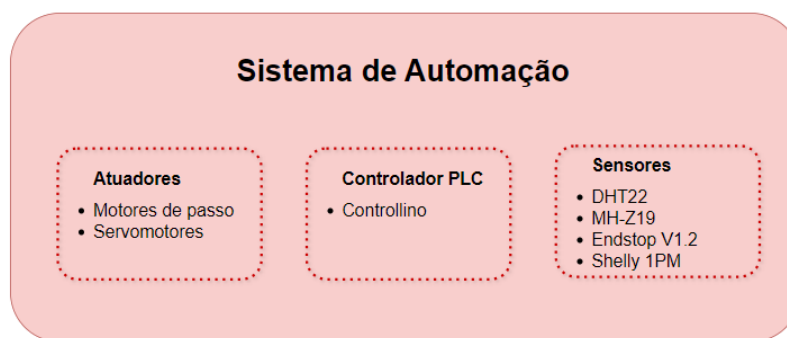


Figura 44 - Sistema de Automação da Mini LF 5.0 e respetivos componentes.

Os atuadores, fundamentais para o funcionamento do sistema de automação, já estão incluídos nos kits dos componentes do Sistema de Produção, como a impressora 3D, o braço robótico, a fresadora CNC e o tapete transportador. Cada um destes equipamentos vem equipado com os atuadores necessários para suas operações específicas, como motores de passo e servomotores. Desta forma, não há custos adicionais para o projeto relacionados à aquisição de atuadores, uma vez que estes já estão integrados nos dispositivos do sistema de produção.

O PLC utilizado no sistema de automação é o Controllino, um dispositivo baseado na plataforma Arduino, que já foi detalhado no Sistema de Informação e Controlo. O Controllino, além de proporcionar a robustez de um PLC industrial, oferece a flexibilidade de programação típica do ecossistema Arduino, permitindo uma automação eficiente e de baixo custo.

Os sensores desempenham um papel vital na monitorização e controlo do ambiente de produção, fornecendo dados cruciais para o sistema de automação. Na Mini LF 5.0, os sensores são os componentes necessários a acrescentar na estrutura da Mini LF 5.0, uma vez que não fazem parte do OSLab4Man. O DHT22 será utilizado para fornecer leituras precisas de temperatura e humidade, garantindo que o ambiente do laboratório se mantém dentro dos parâmetros ideais para o funcionamento dos equipamentos e a qualidade dos processos. Complementando a monitorização ambiental, o MH-Z19 será incorporado para medir a concentração de dióxido de carbono, permitindo o controlo da qualidade do ar e assegurando um ambiente seguro e saudável para as operações. O sensor ótico de fim de curso Endstop V1.2 será integrado para oferecer uma solução precisa e sem contato mecânico, fundamental para garantir que sistemas CNC e impressoras 3D operem dentro dos limites estabelecidos, prevenindo danos aos componentes e aumentando a segurança do sistema. Para monitorizar o consumo de energia, o Shelly 1PM será adicionado, permitindo a medição detalhada do consumo energético. Os dados recolhidos pelos sensores serão enviados para a *cloud*, onde serão analisados pelos *softwares* como OpenEMS e OpenLCA, por exemplo, já aprofundados anteriormente.

Com a adição destes sensores, o Sistema de Automação da Mini LF 5.0 estará completo e totalmente integrado (Figura 45), permitindo uma monitorização e controlo precisos de todas as operações no laboratório, alinhados com os princípios de eficiência e sustentabilidade do projeto.

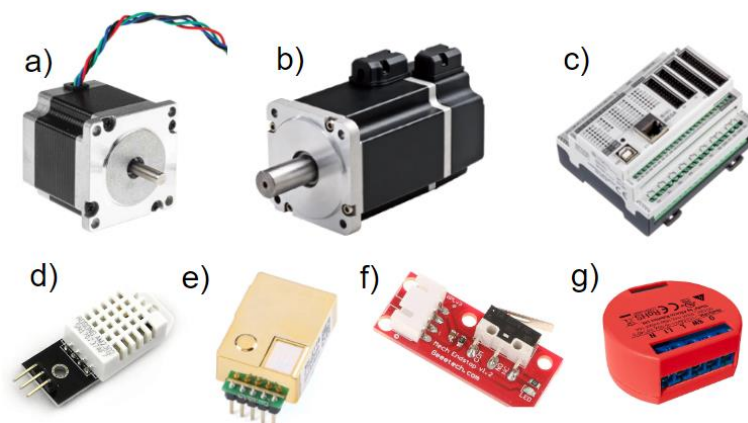


Figura 45 - Componentes físicos do Sistema de Automação: a) Motor de passo, b) Servomotor, c) Controllino, d) DHT22, e) MH-Z19, f) Endstop V1.2, g) Shelly 1PM.

5. Sistema de Comunicação e Vigilância

O Sistema de Comunicação e Vigilância da Mini LF 5.0 (Figura 46), que desempenha um papel crucial na integração e monitorização da estrutura da Mini LF 5.0, foi ampliado e atualizado para suportar as exigências da Indústria 5.0 (Figura 47). Na base deste sistema está o Raspberry Pi 400 que serve como o núcleo de processamento e comunicação.



Figura 46 - Sistema de Comunicação e Vigilância da Mini LF 5.0 e respetivos componentes.

A comunicação visual e vigilância na Mini LF 5.0 é garantida por um conjunto de monitores e câmaras estrategicamente posicionados. Dois monitores Asus VS197DE oferecem uma visualização de alta qualidade, ideal para monitorização em tempo real. Com uma relação de contraste elevada e uma retroiluminação LED, estes monitores permitem uma visualização detalhada e precisa, essencial para a supervisão de processos e a gestão multitarefa. O sistema de vigilância inclui quatro câmaras ArduCAM Mini, que se destacam pela sua compatibilidade com o ecossistema Arduino, o que facilita a sua integração no sistema de controlo. Estas câmaras garantem uma monitorização eficaz e detalhada do ambiente de produção. Além disso, o sistema de comunicação é complementado pelos auscultadores Tacens AH118 Headset, que permitem uma comunicação eficaz e mãos-livres entre operadores e técnicos. Estes

auscultadores, com microfone incorporado, proporcionam um ambiente de trabalho mais interativo e colaborativo, essencial para a coordenação em tempo real das operações da Mini LF 5.0.

Para potencializar ainda mais a eficiência e a capacidade de interação do sistema, foram integrados novos dispositivos e ferramentas tecnológicas. O Google Assistant foi adicionado como assistente virtual, permitindo o controlo por voz de determinados sistemas e oferecendo notificações em tempo real. Duas Raspberry Pi Camera Module v2 foram incorporadas para permitir a transmissão ao vivo e gravações de alta qualidade, sendo facilmente integráveis com o *software* de transmissão OBS Studio.

A adoção de tecnologias de realidade aumentada e virtual também foi implementada para transformar a forma como os operadores interagem com o ambiente de produção. Os óculos Nreal Light, com capacidades de realidade aumentada, permitem uma visualização em tempo real de dados operacionais sobrepostos ao mundo físico, facilitando a assistência remota e os treinos interativos. Da mesma forma, os Oculus Quest 2 proporcionam uma experiência imersiva em ambientes virtuais, essenciais para a criação e teste de simulações de processos produtivos.



Figura 47 - Componentes físicos do Sistema de Comunicação e Vigilância: a) Monitor Asus VS197DE, b) Câmara ArduCAM OV9782, c) Auscultadores Tacens AH118 Headset, d) Google Assistant, e) Raspberry Pi Camera Module v2, f) Nreal Light, g) Oculus Quest 2.

O novo sistema de comunicação da Mini LF 5.0 foi concebido para oferecer uma supervisão robusta, interação eficiente e uma integração avançada de tecnologias, garantindo assim uma comunicação eficaz e uma gestão de produção alinhada com os princípios da Indústria 5.0.

Em conclusão, a estrutura de todo o sistema ciberfísico foi ampliada para incorporar novos elementos que aprimoram a funcionalidade e a interatividade do sistema. Com a adição das tecnologias recentes, a Mini LF 5.0 oferece uma integração mais completa e avançada, fortalecendo o desempenho geral. Esta evolução reflete um compromisso com a inovação e a melhoria contínua. Para uma visão geral da estrutura atualizada, está representado o esquema

na Figura 48, que resume a estrutura global da Mini LF 5.0 e a integração dos novos e antigos componentes.

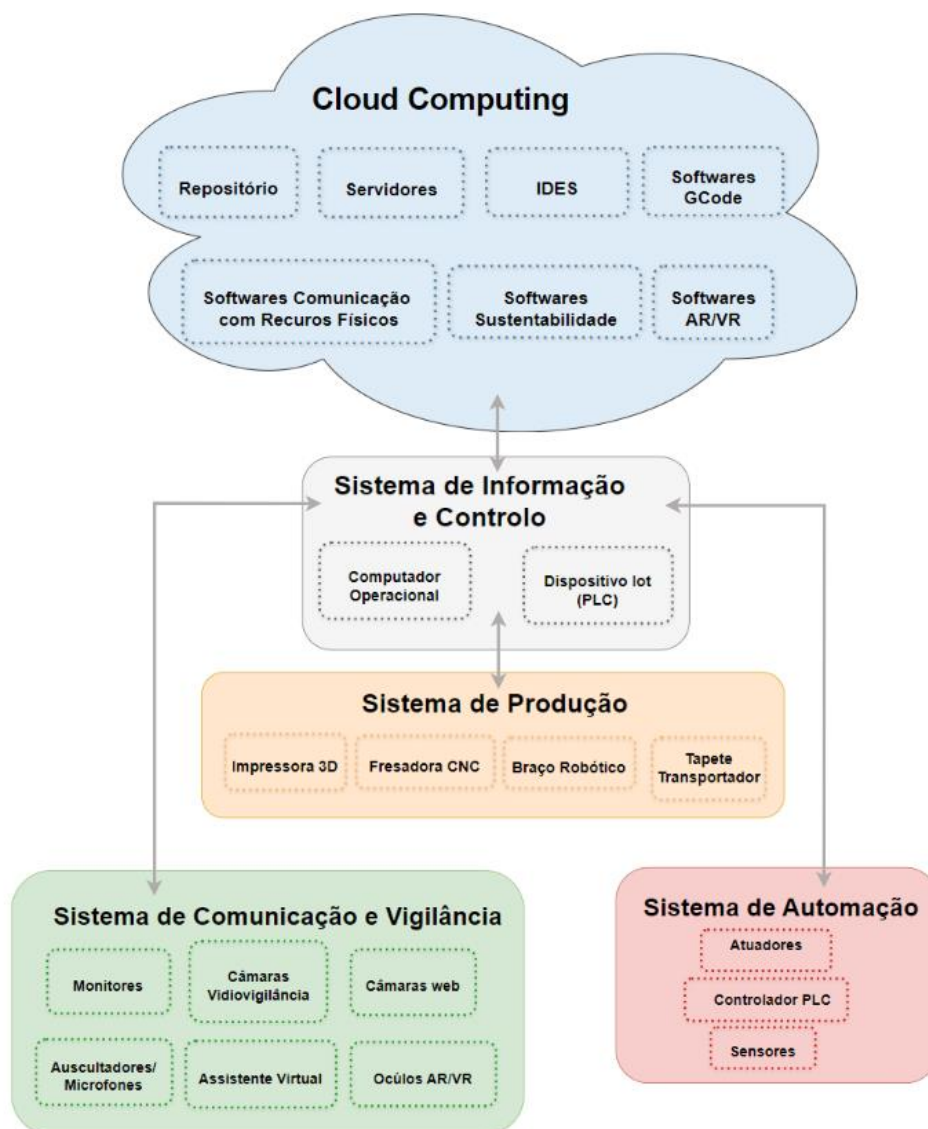


Figura 48 - Estrutura global da Mini LF 5.0

3.3.6. Orçamento e Propostas Alternativas

A gestão eficaz de recursos financeiros é muito importante para o sucesso de este projeto, especialmente porque este surge num contexto de desenvolvimento tecnológico e de inovação. Este subcapítulo visa analisar o orçamento associado à proposta de implementação da Mini LF 5.0, comparando o custo dos componentes e sistemas existentes no laboratório OSLab4Man com o orçamento necessário para integrar as novas tecnologias e melhorias propostas.

O objetivo principal é fornecer uma visão clara dos custos associados à atualização do sistema atual e explorar alternativas viáveis. Através desta análise, procura-se não apenas entender as

implicações financeiras da expansão do projeto, mas também identificar oportunidades para reduzir custos sem comprometer a funcionalidade e sustentabilidade do projeto.

Na Tabela 25, é apresentada uma visão geral dos custos associados aos componentes já existentes no OSLab4Man, seguida pela estimativa financeira dos novos elementos a serem integrados, destacados pela cor cinza. Finalmente, são propostas soluções alternativas que possam oferecer uma solução mais económica ou eficiente, garantindo que o projeto é acessível e replicável, reforçando as premissas de *open design* e acessibilidade.

Tabela 25 - Orçamento final da Mini LF 5.0 e propostas alternativas.

Componente da Mini LF 5.0	Qt.	Preço (€)	Propostas Alternativas
Computador Operacional: Raspberry Pi 400	1	76€	Raspberry Pi 4 Raspberry Pi 5 Raspberry Pi 3 Model B
PLC: Controllino	1	209€	PLC Arduino Ardbox & DALI Arduino MEGA 2560 Rev3 OpenPLC
Impressora 3D: BeeveryCreative B2X300	1	650€	RepRap Creality Ender 3 Anet A8 Original Prusa i3 MK3S
Braço robótico: BCN3D MOVEO	1	650€	Dorna 2 UFactory uArm Zortrax Robotic Arm
Fresadora CNC: 3018 PRO	1	150	rBotCNC Carbide 3D Shapeoko 4 Ooznest Workbee Millright CNC M3
Tapete transportador	1	-	Instructables: DIY Conveyor Belt GitHub: Conveyor Belt Open Source Design
Monitor: Asus VS197DE	2	80€	Acer V196HQL AOC e970Swn
Câmara Videovigilância: ArduCAM OV9782	4	25€	ESP32-CAM Waveshare OV9655 SainSmart Surveillance Arduino Camera
Auscultadores com microfone: Tacens AH118 Headset	1+2	9€	1Life Sound One Headset Ngs Ms103
Assistente Virtual: Google Assistant	1	56€	Alexa Echo (50€) Mycroft AI (OS)
Câmara de transmissão ao vivo: Raspberry Pi Camera Module v2	2	9€	Logitech C270 Microsoft LifeCam HD-3000 TP-Link Tapo C100
Óculos AR: Nreal Light	1	130€	Lenovo Mirage AR DreamWorld AR Glasses
Óculos VR: Oculus Quest 2	1	240€	Lenovo Mirage Solo Samsung Gear VR

Sensor de temperatura e humidade: DHT22	1	6€	DHT11 BME280
Sensor de qualidade de ar (CO2): MH-Z19	1	25€	MH-Z14 CCS811
Sensor de fim de curso: Endstop V1.2	1	2€	Reed Switch A114S Omron D2F-01L
Sensor de monitorização de energia: Shelly 1PM	1	16€	PZEM-004T ACS712
Orçamento implementação OSLab4Man:		2004€	
Orçamento implementação Mini LF 5.0:		511€	
Orçamento Total Mini LF 5.0:		2515€	

Importa destacar que a maioria dos valores apresentados são preços de revenda, visando tornar este projeto mais acessível e sustentável.

Como se pode constatar pela Tabela 25, o investimento necessário para a proposta de implementação da Mini LF 5.0, estimado em 511€, é significativamente inferior ao investimento de 2004€ realizado para o desenvolvimento do OSLab4Man. Esta diferença sublinha a viabilidade financeira do projeto Mini LF 5.0, uma vez que grande parte do material necessário já foi adquirido no âmbito do OSLab4Man.

Quanto às propostas alternativas para os componentes físicos, algumas soluções *low cost* e *open source* foram identificadas também como soluções viáveis financeiramente. Embora existam alternativas de monitores e câmaras de videovigilância mais acessíveis, os equipamentos já adquiridos para o OSLab4Man serão aproveitados no novo projeto da Mini LF 5.0. Mesmo que estes equipamentos não fossem a primeira escolha para o projeto, a sua reutilização representa uma estratégia eficiente de gestão de recursos.

3.3.7. Propostas de Melhoria e Sustentabilidade

A Mini LF 5.0 surge como uma evolução do conceito de fábricas de aprendizagem, alinhando-se com as tendências da Indústria 5.0. Implementada no OSLab4Man do ISEP, a Mini LF 5.0 é projetada para oferecer uma plataforma prática e flexível que integra tecnologias avançadas e práticas de *Open Design*.

Este projeto visa proporcionar uma experiência educativa realista e colaborativa, preparando alunos e docentes para os desafios da indústria moderna. Ao permitir a colaboração direta com empresas, a Mini LF 5.0 facilita o desenvolvimento de produtos, o treino de colaboradores e a aplicação prática de conceitos industriais. Além de focar na formação prática, a Mini LF 5.0 adota uma abordagem sustentável, utilizando tecnologias de baixo custo e práticas ambientalmente responsáveis. A Mini LF 5.0 representa um passo significativo para o ISEP,

contribuindo para a integração entre o ambiente acadêmico e o setor industrial, e reafirmando o compromisso com a vanguarda tecnológica e a sustentabilidade.

Para descrever e caracterizar a Mini LF 5.0, recorreu-se novamente à Tabela 4, que resume as características e dimensões essenciais do projeto. A Tabela 26 fornece uma visão abrangente dos principais aspetos da Mini LF 5.0, incluindo os seus propósitos, configuração física e funcionalidades propostas. Através desta análise, é possível entender melhor a estrutura e os objetivos do novo sistema a ser implementado, bem como avaliar como se alinha com as necessidades e as expectativas do ambiente acadêmico e industrial.

Tabela 26 - Morfologia da Mini LF 5.0 de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG CIRP.

2.1	Propósito Principal	Ensino			Treino		Investigação						
2.2	Propósito Secundário	Ambiente de Testes/Piloto			Produção Industrial		Transferência de Inovação		Imagem Pública				
3.1	Ciclo de Vida Produto	Desenvolvimento Produto		Planeamento Produto	Prototipagem		Manufatura	Asserblagem	Logística	Reciclagem		Serviço	
3.2	Ciclo de Vida Fábrica	Conceito Fábrica	Plano Investimento	Planeamento Processo	Ramp-Up					Reciclagem		Manutenção	
3.3	Ciclo de Vida Pedido	Configuração & Pedido	Sequência Pedido	Planeamento e Marcação						Recolha, Embalagem		Expedição	
3.4	Ciclo de Vida Tecnológico	Planeamento	Desenvolvimento	Testes virtuais						Modernização		Manutenção	
3.5	Funções Indiretas	Atividade Primárias					Atividades Secundárias						
		Logística Fluxo Entrada e Saída	Marketing & Vendas			Serviços		Instalações		HR	Inovação Tecnológica	Procurement	
4.1	Ambiente de Aprendizagem	Puramente Físico		Físico com Suporte Digital		Fluxo Físico estendido a Virtual		Puramente Virtual					
4.2	Escala do Ambiente	À escala							Tamanho Real				

Nos subcapítulos anteriores foram propostas diversas soluções de *hardware* e *software* para a implementação da nova Mini LF 5.0, no entanto seguem algumas propostas de melhoria e sustentabilidade que podem e devem ser implementadas neste projeto.

Além de estabelecer parcerias com empresas para prototipagem, teste de produtos e treino dos seus trabalhadores conforme já sugerido nos propósitos da Mini LF 5.0, é recomendável que a LF também sirva alunos de outras instituições. Este passo permitirá que estudantes de diferentes instituições tenham a oportunidade de experienciar a aprendizagem prática numa fábrica de aprendizagem, promovendo a colaboração interinstitucional e reforçando o prestígio do ISEP. Esta abordagem alinha-se com a premissa de *Open Design*, tornando o projeto acessível a todos e ampliando a sua influência.

Em termos de ergonomia e segurança, é essencial que os participantes da Mini LF 5.0 sejam formados regularmente sobre práticas seguras e ergonómicas. A implementação de materiais ergonómicos e assistência virtual, sugeridos no ponto 3.3.4, deve ser acompanhada por *workshops* e formações frequentes que abordem a postura correta durante o trabalho e a utilização segura das tecnologias. Estas formações devem também enfatizar a importância da sustentabilidade e a consciencialização ambiental, abordando conceitos como economia circular, sustentabilidade energética e social. Todos os participantes devem estar bem informados sobre estas questões para garantir que são adotadas práticas responsáveis e sustentáveis.

Adicionalmente, é importante promover dinâmicas de grupo regulares entre os participantes, com o objetivo de desenvolver as suas habilidades de comunicação e colaboração. Dado que a Mini LF 5.0 é um projeto colaborativo e aberto, estas competências são fundamentais para o sucesso do mesmo. Após cada palestra ou formação, deve oferecer-se um espaço para que os participantes possam refletir e, através de sessões de *brainstorming*, sugerir novas ideias ou melhorias tanto para os projetos que estão a desenvolver na LF quanto para a própria Mini LF 5.0.

No que diz respeito à sustentabilidade, a instalação de equipamentos de reciclagem e compostagem pode ser financeiramente inviável para um projeto de *open source* e baixo custo como a Mini LF 5.0. Em alternativa, sugere-se a formação de uma parceria com o Departamento de Química do ISEP. Esta colaboração permitirá que o departamento auxilie no processo de reciclagem e compostagem de materiais, bem como na seleção dos mesmos. Assim, reforça-se o ambiente colaborativo e proporciona-se uma experiência prática aos alunos de ambos os departamentos, aproximando-os da realidade de uma fábrica de aprendizagem.

Por fim, apresenta-se uma proposta de melhoria mais ambiciosa: a instalação de painéis fotovoltaicos. Embora esta solução não tenha sido contemplada inicialmente no ponto 3.3.4 devido à complexidade e ao custo associados, ela continua a ser uma opção válida para o futuro. O ISEP ainda não utiliza esta fonte de energia renovável e as instalações da Mini LF 5.0 estão localizadas no 2º andar do edifício F. Implementar um sistema de energia renovável apenas para essa área seria uma tarefa desafiadora. Assim, a proposta é aguardar a implementação de um sistema de energia renovável para todo o ISEP. Desta forma, a Mini LF 5.0 poderá beneficiar da evolução institucional em direção à sustentabilidade energética, alinhando-se com os objetivos mais amplos da instituição. No entanto, caso o ISEP não avance com a implementação de um sistema de energia renovável para toda a instituição nos próximos anos, sugere-se considerar a instalação de um sistema de energia fotovoltaica dedicado exclusivamente à Mini LF 5.0. Neste caso, poderiam ser exploradas as opções apresentadas no ponto 3.2.3, como o Kit Solar de 100W da Renogy ou o Kit Solar de 200W da ACOPOWER. Estas soluções proporcionariam uma alternativa viável e de custo relativamente baixo para fornecer energia renovável à Mini LF 5.0, alinhando o projeto com os princípios de sustentabilidade e eficiência energética.

4. Resultados e Discussão

Este capítulo representa a sexta e última etapa da metodologia DSR, onde são apresentados os resultados finais. Após a identificação das limitações presentes nas fábricas de aprendizagem existentes, discutidas no ponto 3.1.4, emergem as características que devem estar intrinsecamente associadas ao projeto de implementação da nova Mini LF 5.0 no ISEP. Tendo em conta estas limitações e após uma análise detalhada das condições do laboratório OSLab4Man, onde se pretende implementar a Mini LF 5.0, foram propostas abordagens inovadoras, bem como a introdução de novos componentes físicos e computacionais. Estas propostas visam garantir que o desenvolvimento e a implementação da Mini LF 5.0 sejam alinhados com os objetivos inicialmente traçados: a criação de uma fábrica de aprendizagem voltada para a Indústria 5.0, sustentada pelos princípios do *Open Design* (Figura 49).

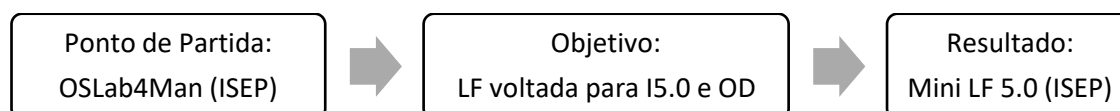


Figura 49 - Objetivos e resultados finais do projeto

4.1. Componentes Físicos e Computacionais Adotados

Nas Tabela 27 apresentam-se os componentes físicos e computacionais propostos para a implementação da Mini LF 5.0:

Tabela 27 - Componentes físicos e computacionais da Mini LF 5.0

Componentes Físicos			
Computador Operacional Raspberry Pi 400		Câmaras de Vigilância ArduCAM (OV9782)	
PLC Controllino		Headphones/Microfones Tacens AH118	
Impressora 3D BeeveryCreative B2X300		Óculos AR Nreal Light	
Braço Robótico BCN3D MOVEO		Óculos VR Oculus Quest 2	
Fresadora 3D 3018 PRO		Assistente Virtual Google Assistant	
Tapete Transportador		Câmaras web Raspberry Pi Camera Module v2	
Monitor Asus VS197DE		Sensores DHT22, MH-Z19, Endstop V1.2 e Shelly 1PM	
Componentes Computacionais			
GitHub	OctoPrint	Blender	OpenLCA
HTTPServer	Dxf2gcode	OpenSimulator	Odoo
Rocket.Chat	Ponterface	Mozilla Hubs	InfluxDB
NetBeans	OBS Studio	OpenEMS	Grafana
Arduino IDE			

A integração dos novos sensores e *softwares* de gestão ambiental, como o OpenLCA e OpenEMS, trouxe maior eficiência na monitorização da energia e das emissões, permitindo uma gestão ambiental em tempo real e promovendo a sustentabilidade do projeto. Adicionalmente, tecnologias de comunicação e colaboração, como o Rocket.Chat, e as soluções de realidade aumentada e virtual, como os óculos Nreal Light e Oculus Quest 2, proporcionaram uma abordagem mais imersiva e interativa, facilitando treinos, simulações e a comunicação eficiente entre os utilizadores.

Ferramentas como o OBS Studio, para *streaming*, e o InfluxDB com Grafana, para visualização de dados em tempo real, reforçam a transparência e o acompanhamento contínuo do desempenho dos sistemas. Este controlo constante impacta diretamente na eficiência energética e na gestão de recursos, tornando o sistema mais adaptável e resiliente, qualidades intrínsecas a uma fábrica de aprendizagem 5.0.

Os componentes já presentes no OSLab4Man, como o PLC Controllino, a impressora 3D e o braço robótico, continuam a desempenhar um papel essencial. Contudo, a sua integração com as novas tecnologias adicionadas à Mini LF 5.0, sobretudo os *softwares* de controlo e monitorização, aumentou a precisão e a eficiência operacional, reduzindo desperdícios e otimizando processos.

O conceito de *open design* foi aplicado na conceção da estrutura e funcionamento da Mini LF 5.0, promovendo a colaboração contínua com a comunidade académica e industrial. Isso garante que o projeto possa ser replicado, adaptado e melhorado por outras instituições, democratizando o acesso à inovação e alinhando-se com os princípios da Indústria 5.0. Por fim, as tecnologias introduzidas, como os óculos de AR e VR e as ferramentas colaborativas, melhoraram a interação H-H e H-M, reforçando a centralidade do ser humano no processo produtivo e promovendo um ambiente mais colaborativo e participativo.

4.2. Viabilidade Financeira

A gestão eficiente de recursos financeiros foi uma das prioridades no desenvolvimento da Mini LF 5.0, em alinhamento com os princípios de *open design*, *open source* e soluções de baixo custo. Este subcapítulo visa comparar o orçamento necessário para a implementação da Mini LF 5.0 com o investimento prévio no OSLab4Man, destacando os fatores que contribuíram para uma solução mais acessível e sustentável.

Como se constata na Figura 50, que compara os valores dos diferentes projetos, o projeto OSLab4Man exigiu um investimento de 2004€, enquanto a proposta de implementação da Mini LF 5.0 foi estimada em 511€, totalizando um orçamento final de 2515€. Esta redução significativa nos custos de expansão deve-se, em grande parte, à reutilização de componentes e à adoção de soluções *low-cost* e *open source*.

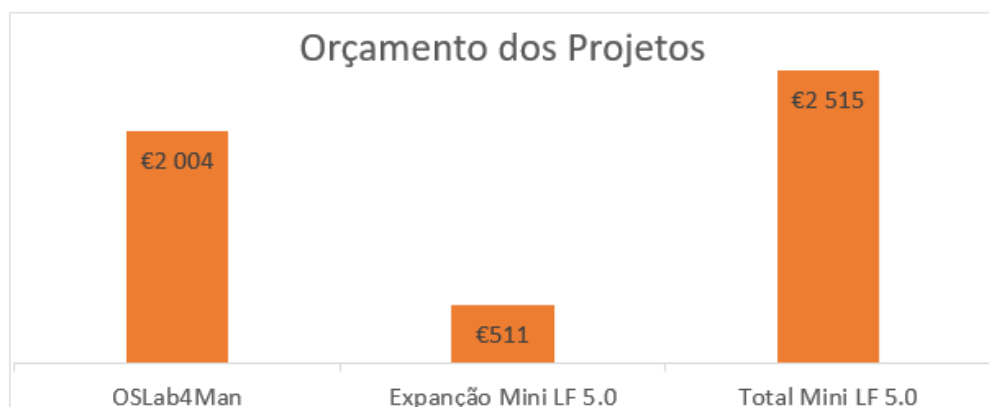


Figura 50 - Gráfico dos Orçamentos dos Projetos

A totalidade dos *softwares* adotados são ferramentas *open source*, eliminando custos associados a licenças proprietárias e possibilitando a customização e adaptação conforme as necessidades da LF. Adicionalmente, a escolha de componentes físicos, como os sensores e os óculos de AR e VR, foi baseada em soluções de baixo custo, adquiridas em revenda, resultando numa significativa redução de preço sem comprometer a funcionalidade. Outros equipamentos, como o PLC Controllino e os equipamentos de produção, foram reaproveitados do OSLab4Man, permitindo uma gestão mais eficiente dos recursos já existentes. O *open design* aplicado ao projeto permite que a Mini LF 5.0 seja replicada e modificada por outras instituições, sem necessidade de grandes investimentos. Este modelo promove a acessibilidade, replicabilidade e a colaboração contínua, alinhando o projeto aos princípios da Indústria 5.0.

A implementação da Mini LF 5.0 revela-se financeiramente viável, com significativa redução de custos graças à reutilização de componentes, soluções *low-cost* e *softwares open source*. Esta abordagem garante acessibilidade e eficiência, sem sacrificar a funcionalidade. O uso de *open design* permite ainda que o projeto seja facilmente replicado e adaptado por outras instituições, reforçando sua sustentabilidade e viabilidade futura.

5. Conclusão

5.1. Conclusões finais

A proposta de implementação da Mini LF 5.0 no ISEP representa um avanço significativo na criação de ambientes de ensino mais práticos e alinhados com as novas abordagens da Indústria 5.0. Esta proposta de projeto promove a integração de tecnologias emergentes e a centralização do ser humano no processo produtivo, características intrínsecas da I5.0, como também se reflete como um projeto inovador e acessível para a educação técnica. A abordagem adotada, que se baseia em *open design* e *open source*, demonstra a capacidade de resposta às novas necessidades e exigências da quinta revolução industrial.

Ao ser utilizada neste trabalho, a metodologia DSR, seguiu um processo estruturado de seis etapas consecutivas como: a identificação das necessidades, definição de objetivos, desenvolvimento e avaliação de artefactos, e apresentação e discussão dos resultados. Esta abordagem permitiu não só a criação de uma solução prática e eficaz, mas também a adaptação contínua às necessidades emergentes da Indústria 5.0. Os resultados obtidos confirmam que a Mini LF 5.0 atende aos objetivos estabelecidos (Tabela 28), oferecendo uma plataforma prática e interativa que capacita os alunos para enfrentar os desafios da nova era industrial.

A viabilidade financeira e técnica do projeto também foi comprovada, destacando-se pela redução de custos em cerca de 80% e pela possibilidade de replicabilidade noutras instituições. Assim, a Mini LF 5.0 não só serve como um modelo de inovação educacional, mas também como uma referência para a aplicação prática dos conceitos da Indústria 5.0 em ambientes académicos e industriais.

Tabela 28 - Requisitos da Mini LF 5.0 concluídos.

Requisitos da Mini LF 5.0	Concluído
Projeto para I5.0	✓
Projeto em <i>Open Design</i>	✓
Projeto Sustentável	✓
Projeto Acessível/baixo custo	✓

5.2. Limitações e trabalhos futuros

Este projeto apresenta algumas limitações que devem ser consideradas em trabalhos futuros. Em primeiro lugar, por se tratar de uma proposta de implementação, a Mini LF 5.0 ainda não foi efetivamente implementada no OSLab4Man. Assim, o passo natural será a realização desta implementação, permitindo avaliar na prática os benefícios e desafios desta fábrica de aprendizagem orientada para a Indústria 5.0.

Adicionalmente, por ser um projeto de pequena escala e localizado num laboratório com espaço limitado, há a necessidade de, no futuro, considerar a expansão para instalações maiores, o que permitiria a inclusão de novos componentes e a exploração de tecnologias ainda mais avançadas. Esta transição torna-se essencial para acomodar o crescimento do projeto e assegurar que o mesmo continue a cumprir os objetivos e a acompanhar a evolução da indústria.

Outra limitação é a procura de fundos. Sendo este um projeto inovador e diretamente ligado à sustentabilidade, devem ser explorados financiamentos governamentais, apoios do Instituto Politécnico do Porto e até mesmo parcerias com empresas que vejam nesta iniciativa uma oportunidade de investimento e inovação. A captação de recursos poderá assegurar a continuidade e o aperfeiçoamento da Mini LF 5.0.

Por fim, novos trabalhos devem explorar o desenvolvimento de metodologias de ensino ainda mais integradas com a Indústria 5.0 e com as próximas revoluções industriais já abordadas no segundo capítulo deste documento, aliando o uso de tecnologias emergentes a modelos de formação contínua e adaptativa, alinhando-se com as constantes mudanças tecnológicas e de mercado.

Referências

- [1] "Industry 5.0 Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry", doi: 10.2777/308407.
- [2] E. Abele, J. Metternich, and M. Tisch, *Learning Factories*. Cham: Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-92261-4.
- [3] É. Boisseau, J. F. Omhover, and C. Bouchard, "Open-design: A state of the art review," *Design Science*, vol. 4, 2018, doi: 10.1017/dsj.2017.25.
- [4] H. A. Simon, "The Science of Design: Creating the Artificial," 1988. [Online]. Available: <http://www.jstor.orgURL:http://www.jstor.org/stable/1511391>
- [5] M. Pimentel and D. Filippo, "RE@D-Revista de Educação a Distância e Elearning Design Science Research: pesquisa científica atrelada ao design de artefatos."
- [6] J. Venable, J. Pries-Heje, and R. Baskerville, "FEDS: A Framework for Evaluation in Design Science Research," Jan. 01, 2016, *Palgrave Macmillan Ltd*. doi: 10.1057/ejis.2014.36.
- [7] P. Coelho, C. Bessa, J. Landeck, and C. Silva, "Industry 5.0: The Arising of a Concept," in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2022, pp. 1137–1144. doi: 10.1016/j.procs.2022.12.312.
- [8] V. Özdemir and N. Hekim, "Birth of Industry 5.0: Making Sense of Big Data with Artificial Intelligence, 'the Internet of Things' and Next-Generation Technology Policy," *OMICS*, vol. 22, no. 1, pp. 65–76, 2018, doi: 10.1089/omi.2017.0194.
- [9] J. Alves, T. M. Lima, and P. D. Gaspar, "Is Industry 5.0 a Human-Centred Approach? A Systematic Review," Jan. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/pr11010193.
- [10] "Industry 5.0 Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry", doi: 10.2777/308407.
- [11] D. Ø. Madsen and T. Berg, "An exploratory bibliometric analysis of the birth and emergence of industry 5.0," *Applied System Innovation*, vol. 4, no. 4, Dec. 2021, doi: 10.3390/asi4040087.
- [12] D. Paschek and A. Draghici, "INDUSTRY 5.0-THE EXPECTED IMPACT OF NEXT INDUSTRIAL REVOLUTION."
- [13] M. Di Nardo and H. Yu, "Special issue 'industry 5.0: The prelude to the sixth industrial revolution,'" Sep. 01, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/asi4030045.
- [14] L. Wang, "A futuristic perspective on human-centric assembly," *J Manuf Syst*, vol. 62, pp. 199–201, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jmsy.2021.11.001.
- [15] R. Sindhwani, S. Afridi, A. Kumar, A. Banaitis, S. Luthra, and P. L. Singh, "Can industry 5.0 revolutionize the wave of resilience and social value creation? A multi-criteria framework to analyze enablers," *Technol Soc*, vol. 68, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.techsoc.2022.101887.
- [16] M. Xu, J. M. David, and S. H. Kim, "The fourth industrial revolution: Opportunities and challenges," *International Journal of Financial Research*, vol. 9, no. 2, pp. 90–95, Apr. 2018, doi: 10.5430/ijfr.v9n2p90.

Referências

- [17] M. A. K. Bahrin, M. F. Othman, N. H. N. Azli, and M. F. Talib, "Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic," 2016, *Penerbit UTM Press*. doi: 10.11113/jt.v78.9285.
- [18] M. Golovianko, V. Terziyan, V. Branytskyi, and D. Malyk, "Industry 4.0 vs. Industry 5.0: Co-existence, Transition, or a Hybrid," in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2022, pp. 102–113. doi: 10.1016/j.procs.2022.12.206.
- [19] R. Munhoz, "A Importância da Indústria 5.0 para a Inclusão Social e o Papel do ITSM nessa Transição," LinkedIn.
- [20] E. Annanperä, "FROM INDUSTRY X TO INDUSTRY 6.0 : ANTIFRAGILE MANUFACTURING FOR PEOPLE, PLANET, AND PROFIT WITH PASSION." [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10138/335672>
- [21] N. H. Mahmood *et al.*, "White Paper on Critical and Massive Machine Type Communication Towards 6G," Apr. 2020, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2004.14146>
- [22] A. Adel, "Future of industry 5.0 in society: human-centric solutions, challenges and prospective research areas," Dec. 01, 2022, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1186/s13677-022-00314-5.
- [23] J. Leng *et al.*, "Industry 5.0: Prospect and retrospect," *J Manuf Syst*, vol. 65, pp. 279–295, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jmsy.2022.09.017.
- [24] D. E. Santana, I. T. S. ; Jankowitsch, Í. Terezinha, S. De Santana, and J. Jankowitsch, "A SOCIEDADE 5.0 E A QUINTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL: SEUS BENÉFICOS E ADVERSIDADES-UM ESTUDO DE CASO." [Online]. Available: www.icmr.com
- [25] C. Narvaez Rojas, G. A. Alomia Peñafiel, D. F. Loaiza Buitrago, and C. A. Tavera Romero, "Society 5.0: A Japanese concept for a superintelligent society," Jun. 02, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/su13126567.
- [26] G. D. Putnik, L. Ferreira, N. Lopes, and Z. Putnik, "What is a Cyber-Physical System: Definitions and models spectrum," *FME Transactions*, vol. 47, no. 4, pp. 663–674, 2019, doi: 10.5937/fmet1904663P.
- [27] K. J. Park, R. Zheng, and X. Liu, "Cyber-physical systems: Milestones and research challenges," Dec. 01, 2012, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.comcom.2012.09.006.
- [28] R. Rajkumar, I. Lee, L. Sha, and J. Stankovic, "Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution," 2010.
- [29] L. Monostori *et al.*, "Cyber-physical systems in manufacturing," *CIRP Annals*, vol. 65, no. 2, pp. 621–641, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.06.005.
- [30] W. Duo, M. C. Zhou, and A. Abusorrah, "A Survey of Cyber Attacks on Cyber Physical Systems: Recent Advances and Challenges," May 01, 2022, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/JAS.2022.105548.
- [31] C. Tan *et al.*, "Product personalization enabled by assembly architecture and cyber physical systems," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 66, no. 1, pp. 33–36, 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.106.
- [32] T. Tomiyama and F. Moyen, "Resilient architecture for cyber-physical production systems," *CIRP Annals*, vol. 67, no. 1, pp. 161–164, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.cirp.2018.04.021.
- [33] E. Lee and S. Seshia, *INTRODUCTION TO EMBEDDED SYSTEMS*, Second. London, 2012.
- [34] V. Gunes, S. Peter, T. Givargis, and F. Vahid, "A survey on concepts, applications, and challenges in cyber-physical systems," *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, vol. 8, no. 12, pp. 4242–4268, Dec. 2014, doi: 10.3837/tiis.2014.12.001.
- [35] S. A. Lintelman, K. Sampigethaya, M. Li, R. Poovendran, and R. V Robinson, "High Assurance Aerospace CPS & Implications for the Automotive Industry." [Online]. Available: <http://www.commoncriteriaportal.org>

- [36] V. Gunes, S. Peter, T. Givargis, and F. Vahid, "A survey on concepts, applications, and challenges in cyber-physical systems," *KSI Transactions on Internet and Information Systems*, vol. 8, no. 12, pp. 4242–4268, Dec. 2014, doi: 10.3837/tiis.2014.12.001.
- [37] K. B. Adedeji and Y. Hamam, "Cyber-physical systems for water supply network management: Basics, challenges, and roadmap," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 22, pp. 1–30, Nov. 2020, doi: 10.3390/su12229555.
- [38] R. Rajkumar, I. Lee, L. Sha, and J. Stankovic, "Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution," 2010.
- [39] K. J. Park, R. Zheng, and X. Liu, "Cyber-physical systems: Milestones and research challenges," Dec. 01, 2012, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.comcom.2012.09.006.
- [40] T. Sanislav and L. Miclea, "Cyber-Physical Systems-Concept, Challenges and Research Areas ↔," 2012. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/289701937>
- [41] L. Esterle and R. Grosu, "Cyber-physikalische Systeme: Herausforderung des 21. Jahrhunderts," *Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 133, no. 7, pp. 299–303, Nov. 2016, doi: 10.1007/s00502-016-0426-6.
- [42] B. van Abel, *Open design now : why design cannot remain exclusive*. BIS Publishers, 2011. Accessed: Jan. 05, 2024. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000795280521216.bib?lang=en>
- [43] J. Heskett, *Design: A very short introduction*, vol. 136. Oxford University Press, USA, 2005.
- [44] J. Tooze, S. Baurley, R. Phillips, P. Smith, E. Foote, and S. Silve, "Open design: Contributions, solutions, processes and projects," *Design Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 538–559, Aug. 2014, doi: 10.2752/175630614X14056185480069.
- [45] É. Boisseau, J. F. Omhover, and C. Bouchard, "Open-design: A state of the art review," *Design Science*, vol. 4, 2018, doi: 10.1017/dsj.2017.25.
- [46] M. Avital, "THE GENERATIVE BEDROCK OF OPEN DESIGN / MICHEL AVITAL | Open Design Now." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/279409150>
- [47] H. Castro, G. Putnik, A. Castro, and R. Dal Bosco Fontana, "Open design initiatives: An evaluation of CAD Open Source Software," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2019, pp. 1116–1119. doi: 10.1016/j.procir.2019.08.001.
- [48] H. Chesbrough, *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*. Bosten, 2003.
- [49] O. Gassmann and E. Enkel, "Open Innovation: Die Öffnung des Innovationsprozesses erhöht das Innovationspotenzial," 2006. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/36397370>
- [50] A. Isomaki, "Open Innovation – What It Is and How to Do It," Vima by HYPE.
- [51] D. Chiaroni, V. Chiesa, and F. Frattini, "The Open Innovation Journey: How firms dynamically implement the emerging innovation management paradigm," *Technovation*, vol. 31, no. 1, pp. 34–43, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.technovation.2009.08.007.
- [52] D. Chiaroni, V. Chiesa, and F. Frattini, "The Open Innovation Journey: How firms dynamically implement the emerging innovation management paradigm," *Technovation*, vol. 31, no. 1, pp. 34–43, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.technovation.2009.08.007.
- [53] B. Perens and M. Sroka, "The Open Source Definition," 2007. [Online]. Available: <http://perens.com/OSD.html>

- [54] M. Avital, "THE GENERATIVE BEDROCK OF OPEN DESIGN / MICHEL AVITAL | Open Design Now." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/279409150>
- [55] M. Wesoly, P. Ohlhausen, M. Bucher, and R. Hichert, *Information und Kommunikation*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [56] J. P. Wulfsberg, T. Redlich, and F. L. Bruhns, "Open production: Scientific foundation for co-creative product realization," *Production Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 127–139, Apr. 2011, doi: 10.1007/s11740-010-0286-6.
- [57] S. Basmer, S. Buxbaum-Conradi, P. Krenz, T. Redlich, J. P. Wulfsberg, and F. L. Bruhns, "Open production: Chances for social sustainability in manufacturing," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2015, pp. 46–51. doi: 10.1016/j.procir.2014.07.102.
- [58] D. Plorin, D. Jentsch, H. Hopf, and E. Müller, "Advanced learning factory (aLF) -method, implementation and evaluation," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2015, pp. 13–18. doi: 10.1016/j.procir.2015.02.115.
- [59] D. Kreimeier, F. Morlock, C. Prinz, B. Krückhans, and D. C. Bakir, "Holistic learning factories - A concept to train lean management, resource efficiency as well as management and organization improvement skills," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2014, pp. 184–188. doi: 10.1016/j.procir.2014.01.040.
- [60] M. Tisch, C. Hertle, E. Abele, J. Metternich, and R. Tenberg, "Learning factory design: a competency-oriented approach integrating three design levels," *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 29, no. 12, pp. 1355–1375, Dec. 2016, doi: 10.1080/0951192X.2015.1033017.
- [61] M. Tisch and J. Metternich, "Potentials and Limits of Learning Factories in Research, Innovation Transfer, Education, and Training," *Procedia Manuf*, vol. 9, pp. 89–96, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.04.027.
- [62] S. Reith, "Außerbetriebliche CIM-Schulung in der „Lernfabrik“,“ in *Produktionsforum '88. Die CIM-fähige Fabrik*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1988, pp. 581–601. doi: 10.1007/978-3-662-01109-6_24.
- [63] J. E. Jorgensen, J. S. Lamancusa, J. L. Zayas-Castro, and J. Ratner, "THE LEARNING FACTORY Curriculum Integration Of Design And Manufacturing."
- [64] E. Abele *et al.*, "Learning factories for research, education, and training," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2015, pp. 1–6. doi: 10.1016/j.procir.2015.02.187.
- [65] M. Tisch, F. Ranz, E. Abele, J. Metternich, and H. Vera, "Learning Factory Morphology- Study Of Form And Structure Of An Innovative Learning Approach In The Manufacturing Domain," 2015.
- [66] E. Abele *et al.*, "Learning factories for future oriented research and education in manufacturing," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 66, no. 2, pp. 803–826, 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.05.005.
- [67] U. Wagner, T. AlGeddawy, H. ElMaraghy, and E. Müller, "The state-of-the-art and prospects of learning factories," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2012, pp. 109–114. doi: 10.1016/j.procir.2012.07.020.
- [68] M. Tisch, C. Hertle, J. Cachay, E. Abele, J. Metternich, and R. Tenberg, "A systematic approach on developing action-oriented, competency-based Learning Factories," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2013, pp. 580–585. doi: 10.1016/j.procir.2013.06.036.
- [69] M. Steffen, S. Frye, and J. Deuse, "Vielfalt Lernfabrik *," *wt Werkstattstechnik online*, vol. 103, no. 3, pp. 233–239, 2013, doi: 10.37544/1436-4980-2013-3-233.
- [70] P. Para, A. Pedro, and N. Morais, "CIA-UBI Learning Factory Engenharia e Gestão Industrial."
- [71] S. Seifermann, J. Böllhoff, J. Metternich, and A. Bellagnach, "Evaluation of work measurement concepts for a cellular manufacturing reference line to enable low cost

- automation for lean machining,” in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2014, pp. 588–593. doi: 10.1016/j.procir.2014.01.065.
- [72] M. Callupe, E. Negri, and L. Fumagalli, “An inclusive overview of Learning Factories around the globe-review statement: Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 11th Conference on Learning Factories 2021,” 2021. [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=3863491>
- [73] Festo Didactic SE, “FESTO,” Hardware.
- [74] C. Konegen-Grenier, B. Placke, and O. Stettes, “Bewertung der Kompetenzen von Bachelorabsolventen und personalwirtschaftliche Konsequenzen der Unternehmen *,” 2011.
- [75] P. Balve and M. Albert, “Project-based learning in production engineering at the heilbronn learning factory,” in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2015, pp. 104–108. doi: 10.1016/j.procir.2015.02.215.
- [76] M. Hennig, G. Reisinger, T. Trautner, P. Hold, D. Gerhard, and A. Mazak, “TU Wien Pilot Factory Industry 4.0,” in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2019, pp. 200–205. doi: 10.1016/j.promfg.2019.03.032.
- [77] M. B. Mion, H. Castro, P. Ávila, J. Bastos, and J. Moreira, “ScienceDirect-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>) Peer-review under responsibility of the scientific Quo Vadis Learning Factories?,” 2024. [Online]. Available: www.sciencedirect.comwww.elsevier.com/locate/procedia2212-8271
- [78] Y. Lu *et al.*, “Outlook on human-centric manufacturing towards Industry 5.0,” *J Manuf Syst*, vol. 62, pp. 612–627, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jmsy.2022.02.001.
- [79] C. Zhang *et al.*, “Towards new-generation human-centric smart manufacturing in Industry 5.0: A systematic review,” Aug. 01, 2023, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.aei.2023.102121.
- [80] N. C. Krämer, A. Von Der Pütten, and S. Eimler, “SCI 396 - Human-Agent and Human-Robot Interaction Theory: Similarities to and Differences from Human-Human Interaction.” [Online]. Available: <http://project-sera.eu/>
- [81] M. Nardo, D. Forino, and T. Murino, “The evolution of man–machine interaction: the role of human in Industry 4.0 paradigm,” *Prod Manuf Res*, vol. 8, no. 1, pp. 20–34, Jan. 2020, doi: 10.1080/21693277.2020.1737592.
- [82] S. Rani, D. Jining, K. Shoukat, M. U. Shoukat, and S. A. Nawaz, “A Human–Machine Interaction Mechanism: Additive Manufacturing for Industry 5.0—Design and Management,” *Sustainability*, vol. 16, no. 10, p. 4158, May 2024, doi: 10.3390/su16104158.
- [83] R. Rame, P. Purwanto, and S. Sudarno, “Industry 5.0 and sustainability: An overview of emerging trends and challenges for a green future,” *Innovation and Green Development*, vol. 3, no. 4, p. 100173, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.igd.2024.100173.
- [84] J. Pallant, S. Sands, and I. Karpen, “Product customization: A profile of consumer demand,” *Journal of Retailing and Consumer Services*, vol. 54, p. 102030, May 2020, doi: 10.1016/j.jretconser.2019.102030.
- [85] W. Afriyani, M. H. Harahap, and N. Harahap, “Komunikasi yang Canggih di Era Society Industri 5.0,” *Da’watuna: Journal of Communication and Islamic Broadcasting*, vol. 4, no. 2, pp. 914–919, Jan. 2024, doi: 10.47467/dawatuna.v4i2.6257.
- [86] J. Leng *et al.*, “Towards resilience in Industry 5.0: A decentralized autonomous manufacturing paradigm,” *J Manuf Syst*, vol. 71, pp. 95–114, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jmsy.2023.08.023.
- [87] D. Ivanov, “The Industry 5.0 framework: viability-based integration of the resilience, sustainability, and human-centricity perspectives,” *Int J Prod Res*, vol. 61, no. 5, pp. 1683–1695, Mar. 2023, doi: 10.1080/00207543.2022.2118892.

Referências

- [88] C. Folke, S. R. Carpenter, B. Walker, M. Scheffer, T. Chapin, and J. Rockström, "Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability," 2010. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/26268226?seq=1&cid=pdf->
- [89] A. Radziwon, A. Bilberg, M. Bogers, and E. S. Madsen, "The smart factory: Exploring adaptive and flexible manufacturing solutions," in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2014, pp. 1184–1190. doi: 10.1016/j.proeng.2014.03.108.
- [90] M. Reeves, K. Haanaes, C. Love, and S. Levin, "Sustainability as Adaptability," *Journal of Applied Corporate Finance*, vol. 24, no. 2, pp. 14–22, Jun. 2012, doi: 10.1111/j.1745-6622.2012.00373.x.
- [91] H. Castro *et al.*, "Cyber-Physical Systems using Open Design: an approach towards an Open Science Lab for Manufacturing," *Procedia Comput Sci*, vol. 196, pp. 381–388, 2022, doi: 10.1016/j.procs.2021.12.027.
- [92] N. DA Joel Rocha Pinto, "Sistemas Ciberfísicos orientados para a Produção Aberta."
- [93] G. H. C. Okado and L. Quinelli, "Megatendências Mundiais 2030 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): uma reflexão preliminar sobre a 'Nova Agenda' das Nações Unidas," *Baru*, vol. 2, no. 2, p. 111, Dec. 2016, doi: 10.18224/baru.v2i2.5266.
- [94] P. De Giovanni, "Sustainability of the Metaverse: A Transition to Industry 5.0," *Sustainability*, vol. 15, no. 7, p. 6079, Mar. 2023, doi: 10.3390/su15076079.
- [95] H. Castro *et al.*, "Open Science Laboratory for Manufacturing: an education tool to contribute to sustainability," in *Ninth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality (TEEM'21)*, New York, NY, USA: ACM, Oct. 2021, pp. 819–823. doi: 10.1145/3486011.3486564.

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: Rita Miguel Amaral

ISEP, Porto, 9 de setembro de 2024

Anexo A

Learning factory morphology, dimension 1: Operational Model

1.1	operator	academic institution (university, college etc.)		non-academic institution (vocational school, high school, chamber, union, industrial network etc.)			profit-oriented operator (consulting business, producing company etc.)	
1.2	trainer	researcher	student assistant	technical expert	manager	consultant	educationalist	
1.3	develop- ment	own development			external assisted development		external development	
1.4	initial funding	internal funds			public funds		external funds	
1.5	ongoing funding	internal funds			public funds		external funds	
1.6	funding continuity	short term funding (e.g. single events)			mid term funding (projects and programs < 3 years)		long term funding (projects and programs > 3 years)	
1.7	business model for trainings	open models				closed models (training program only for single company)		
		club model		course fees				

Anexo B

Learning factory morphology, dimension 2:

Targets and Purpose

2.1	main purpose	education			vocational training			research									
2.2	secondary purpose	test environment / pilot environment			industrial production		innovation transfer		public image								
2.3	target groups for education & training	schoolchildren	students			employees						self-employed	unemployed	open public			
			bachelor	master	phd students	apprentices	skilled workers	semi-skilled worker	unskilled	managers							
										lower mgmt	middle mgmt				top mgmt		
2.4	group constellation	homogenous			heterogenous (Knowledge level, hierarchy, students+employees, etc.)												
2.5	targeted industries	mechanical & plant eng.		automotive		logistics		transportation		FMCG		aerospace					
		chemical industry		electronics		construction		insurance / banking		textile industry		...					
2.6	subject-rel. learning contents	product creation processes		energy & resource efficiency		global production		industrial engineering		Industrie 4.0		lean mgmt		design		...	
2.7	role of LF for research	research object						research enabler									
2.8	research topics	product creation processes		energy & resource efficiency		global production		industrial engineering		Industrie 4.0		lean mgmt		design		didactics ...	

Anexo C

Learning factory morphology, dimension 3:

Process

3.1	product life cycle	product planning	product development		prototyping		manufacturing	assembly	logistics	service	recycling
3.2	factory life cycle	investment planning	factory concept	process planning	ramp-up					main-tenance	recycling
3.3	order life cycle	configuration & order	order sequencing		planning and scheduling					picking, packaging	shipping
3.4	technology life cycle	planning	development		virtual testing					main-tenance	moderni-zation
3.5	indirect functions	primary activities				secondary activities					
		Inbound & outbound logistics		marketing & sales	service	firm infra-structure	HR	technology development	procurement		
3.6	material flow	continuous production				discrete production					
3.7	process type	mass production		serial production		small series production		one-off production			
3.8	manufact. organization	fixed-site manufacturing		work bench manufacturing		workshop manufacturing		flow production			
3.9	degree of automation	manual			partly automated / hybrid automation			fully automated			
3.10	manufact. methods	cutting	primary shaping	forming	joining	coating		change material properties			
3.11	manufact. technology	physical			chemical			biological			

Anexo D

Learning factory morphology, dimension 4: Setting

4.1	learning environment	purely physical (planning + execution)	physical LF supported by digital factory (see line "IT-Integration")		physical value stream of LF extended virtually		purely virtual (planning + execution)	
4.2	environment scale	scaled down				life-size		
4.3	work system levels	station	cell	system	segment	factory	network	
4.4	enablers for changeability	mobility	modularity	compability		scaleability		universality
4.5	changeability dimensions	product		process		organization		building & layout
4.6	IT-integration	IT before SOP (CAD, CAM, simulation)		IT after SOP (PPS, ERP, MES)			IT after production (CRM, PLM...)	

Anexo E

Learning factory morphology, dimension 5:

Product

5.1	materiality	material (physical product)				immaterial (service)			
5.2	form of product	general cargo			bulk goods		flow products		
5.3	product origin	own development		development by participants			external development		
5.4	marketability of product	available on the market		available on the market but didactically simplified			not available on the market		
5.5	functionality of product	functional product		didactically adapted product with limited functionality			without function/ application, for demonstration only		
5.6	no. of different products	1 product	2 products	3-4 products	> 4 products	flexible, developed by participants	acceptance of real orders		
5.7	no. of variants	1 variant	2-4 variants	5-20 variants	...	flexible, depending on participants	determined by real orders		
5.8	no. of components	1 comp.	2-5 comp.	6-20 comp.	21-50 comp.	51-100 comp.	> 100 comp.		
5.9	further product use	re-use / re-cycling		exhibition / display		give-away		sale	disposal

Anexo F

Learning factory morphology, dimension 6: Didactics

6.1	competence classes	technical and methodological competencies	social & communication competencies	personal competencies	activity and implementation oriented competencies		
6.2	dimensions learn. targets	cognitive		affective		psychomotor	
6.3	learn. sce- nario strategy	instruction	demonstration	closed scenario	open scenario		
6.4	type of learn. environment	greenfield (development of factory environment)			brownfield (improvement of existing factory environment)		
6.5	communica- tion channel	onsite learning (in the factory environment)			remote connection (to the factory environment)		
6.6	degree of autonomy	instructed		self-guided/ self-regulated		self-determined/ Self-organized	
6.7	role of the trainer	presenter	moderator	coach		instructor	
6.8	type of training	tutorial	practical lab course	seminar	workshop	project work	
6.9	standardi- zation of trainings	standardized trainings			customized trainings		
6.10	theoretical foundation	prerequisite	in advance (en bloc)	alternating with practical parts	based on demand	afterwards	
6.11	evaluation levels	feedback of participants	learning of participants	transfer to the real factory	economic impact of trainings	return on trainings / ROI	
6.12	learning success evaluation	knowledge test (written)	knowledge test (oral)	written report	oral presentation	practical exam	none

Anexo G

Learning factory morphology, dimension 7: Learning factory Metrics

7.1	no. of participants per training	1-5 participants	6-10 participants	11-15 participants	16-30 participants	>30 participants
7.2	no. of standardized trainings	1 training	2-4 trainings	5-10 trainings	> 10 trainings	
7.3	aver. duration of a single training	≤ 1 day	> 1 day until ≤ 2 days	> 2 days until ≤ 5 days	> 5 days until ≤ 10 days	> 10 days bis ≤ 20 days
7.4	participants per year	< 50 participants	50-200 participants	201-500 participants	501-1000 participants	> 1000 participants
7.5	capacity utilization	< 10%	> 10 until ≤ 20%	> 20% until ≤ 50%	> 50% until ≤ 75%	> 75%
7.6	size of LF	≤ 100 sqm	> 100sqm bis ≤ 300sqm	> 300sqm bis ≤ 500sqm	>500sqm bis ≤ 1000sqm	> 1000 sqm
7.7	FTE in LF	< 1	2-4	5-9	10-15	> 15