

CIA-UBI Learning Factory
Proposta para a Implementação de um Centro de
Conhecimento, Aprendizagem e Investigação em
Engenharia

António Pedro Nascimento Morais

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia e Gestão Industrial

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutora Tânia Daniela Felgueiras de Miranda Lima

junho de 2021

Dedicatória

À minha Família.

Agradecimentos

Deixo o meu agradecimento à minha orientadora Professora Doutora Tânia Daniela Felgueiras de Miranda Lima, pelo seu profissionalismo e pela excelente professora que demonstrou ser ao longo destes dois anos, sempre preocupada com os alunos e incentivando-os a darem o seu melhor. Um obrigado pela orientação na dissertação, apesar de todos os obstáculos e pela ideia da implementação da CIA-UBI. Ao Professor Doutor Fernando Manuel Bigares Charrua Santos, pela ajuda e colaboração na idealização da Learning Factory. A Universidade precisa de mais Professores assim.

Um Grande Obrigado aos meus pais e irmãos, que sempre me apoiaram, em todos os momentos da minha vida, e por sempre me incentivarem ano após ano, dando-lhes sempre muitas dores de cabeça. Aos meus queridos avós que sempre se mostraram preocupados com os meus estudos e ansiosos que terminasse mais uma etapa da minha vida. A toda a minha família um enorme obrigado.

Um agradecimento muito especial, à minha namorada por estar sempre ao meu lado, por me aturar em todos os momentos, me incentivar todos os dias para que acabasse a dissertação e por todos os conselhos que me deu.

Resumo

O crescimento da tecnologia na indústria, para ajudar na produtividade e qualidade de uma empresa tem aumentado ano após ano, por outro lado, tem-se vindo a verificar a escassez de mão-de-obra qualificada para lidar com esta tecnologia emergente. Com vista a tentar resolver este problema, na raiz, ou seja, nas universidades, com esta dissertação pretende-se colmatar a falta de um ensino mais prático conjugado com o ensino atual, isto é, teórico, para que os alunos consigam integrar o mundo do trabalho já com alguma experiência e conhecimentos práticos mais próximos da realidade industrial. A solução encontrada será a construção de uma *Learning Factory* na Universidade da Beira Interior. A implementação desta *Learning Factory* pretende que os alunos dos três ciclos de estudo de Engenharia e Gestão Industrial, adquiram conhecimentos práticos e consolidem a teoria que é lecionada em contexto de sala de aula, sobre as ferramentas *Lean* e as tecnologias da Indústria 4.0. Desta forma, a aquisição e posterior gestão de novos conhecimentos e competências, proporcionará aos alunos, uma vivência num ambiente de aprendizagem mais eficiente e próximo da realidade do mundo do trabalho atual e futuro. Numa segunda fase de implementação, tenciona-se aumentar as valências da *Learning Factory*, através da criação de um centro de estudo de casos reais, estabelecendo-se parcerias com empresas, para posterior aplicação em ambiente real. Deste modo, pretende-se garantir uma simbiose entre os alunos e as respetivas empresas, possibilitando a partilha de conhecimento a vários níveis, o desenvolvimento de *soft skills* e o aumento da mão-de-obra qualificada, que nos dias de hoje tem vindo a diminuir. Foi utilizada como metodologia, o método científico através de uma abordagem indutiva adotando o princípio construtivista. Através desta dissertação é possível implementar a *Learning Factory*, uma vez que esta foi caracterizada e detalhado ao pormenor cada secção a implementar e servir de documento guia na sua implementação.

Palavras-chave

Learning Factory; *Lean*; Indústria 4.0; Ensino Superior Universitário; Ensino da Engenharia

Abstract

The growth of technology in industry, to help the productivity and quality of a company has been increasing year after year, on the other hand, it has been verified the shortage of qualified labour to deal with this emerging technology. In order to try to solve this problem, at the root, that is, in the universities, with this dissertation we intend to fill the lack of a more practical teaching combined with the current teaching, that is, theoretical, so that the students can integrate the world of work already with some experience and practical knowledge closer to the industrial reality. The solution found will be the construction of a Learning Factory at the University of Beira Interior. The implementation of this Learning Factory intends that the students of the three study cycles of Industrial Engineering and Management, acquire practical knowledge and consolidate the theory that is taught in classroom context, about Lean tools and Industry 4.0 technologies. In this way, the acquisition and subsequent management of new knowledge and competences will provide students with an experience in a more efficient learning environment, close to the reality of the current and future working world. In a second implementation phase, it is intended to increase the Learning Factory's valences, through the creation of a real case study centre, establishing partnerships with companies for later application in a real environment. In this way, we intend to guarantee a symbiosis between students and their respective companies, enabling the sharing of knowledge at various levels, the development of soft skills and the increase of qualified labour, which nowadays has been decreasing. The scientific method was used as methodology, through an inductive approach adopting the constructivist principle. Through this dissertation it is possible to implement the Learning Factory, since it was characterized and detailed each section to be implemented and serve as a guide document in its implementation.

Keywords

Learning Factory; Lean; Industry 4.0; University Higher Education; Engineering Education

Índice

Dedicatória.....	iii
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	ix
Índice	xi
Lista de Figuras.....	xv
Lista de Tabelas	xvii
1. Introdução	1
1.1. Contextualização do Trabalho Desenvolvido	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Metodologia	3
1.4. Estrutura da Dissertação	4
2. Filosofia <i>Lean</i>	7
2.1. Evolução Histórica.....	7
2.2. Conceitos.....	11
2.2.1. Desperdícios	12
2.2.2. Princípios Lean	15
2.2.3. Casa do Sistema de Produção Toyota	17
2.3. Ferramentas e Exemplos Práticos	18
2.3.1. Kaizen	18
2.3.2. Kanban.....	19
2.3.3. Poka-Yoke	19
2.3.4. Andon.....	19
2.3.5. Value Stream Mapping	20
2.3.6. Células de Produção.....	20
2.3.7. Exemplos Práticos	24
3. Indústria 4.0.....	31

3.1.	Evolução Histórica	31
3.2.	Conceito de Indústria 4.0.....	33
3.3.	Tecnologias.....	36
3.3.1.	Cyber Phisycal Systems (CPS).....	36
3.3.2.	Internet of Things (IoT)	37
3.3.3.	Big Data	38
3.3.4.	Simulação	38
3.3.5.	Manufatura aditiva/Impressão 3D	39
3.3.6.	Cloud Computing	40
3.3.7.	Robots Autónomos.....	40
3.3.8.	Realidade Aumentada e Virtual	41
3.3.9.	Inteligência Artificial.....	42
3.3.10.	Sensores Inteligentes	42
3.4.	Integração do Lean com a Indústria 4.0	42
4.	<i>Learning Factories</i>	45
4.1.	Contexto Histórico	45
4.2.	Conceito de <i>Learning Factory</i>	48
4.3.	Morfologia de uma <i>Learning Factory</i>	54
4.3.1.	Modelo Operacional	56
4.3.2.	Propósito	57
4.3.3.	Processo.....	59
4.3.4.	Configuração	59
4.3.5.	Produto.....	60
4.3.6.	Didática	60
4.3.7.	Métrica	61
4.4.	<i>Learning Factories</i> Existentes.....	62
5.	Implementação da <i>Learning Factory</i>	71
5.1.	Localização	71
5.2.	Motivação.....	72

5.3.	Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP da <i>Learning Factory</i>	73
5.3.1.	Modelo Operacional.....	73
5.3.2.	Propósito.....	74
5.3.3.	Processo	75
5.3.4.	Configuração.....	76
5.3.5.	Produto	77
5.3.6.	Didática.....	81
5.3.7.	Métrica.....	82
5.4.	Descrição detalhada da <i>Learning Factory</i>	83
5.4.1.	Cadeia de Valor	83
5.4.2.	Células de Produção.....	85
5.4.3.	Ferramentas <i>Lean</i> e Tecnologia da Indústria 4.0	103
5.4.4.	Unidades Curriculares	106
5.4.5.	Custos Estimados e Reais de Implementação	108
6.	Conclusões.....	113
6.1.	Limitações.....	115
	Referências Bibliográficas	117

Lista de Figuras

Figura 1 - Fluxo do Processo de Investigação.	4
Figura 2 - Os sete desperdícios da Filosofia Lean.	12
Figura 3 - Objetivos e Princípios do <i>Lean</i>	15
Figura 4 - Sistema de Produção Toyota.	17
Figura 5 - Tipo de sistema de fabrico ideal.	21
Figura 6 - Layout de Célula de Produção em "U"	23
Figura 7 - Prós e Contras da implementação das Células de Produção.	23
Figura 8 - As quatro Revoluções Industriais	31
Figura 9 - Marcos importantes na evolução das Learning Factories.	48
Figura 10 - Learning Factory no sentido restrito e no sentido amplo.	49
Figura 11 -Objetivos das Learning Factories.	50
Figura 12 -Conceção de uma Learning Factory.	51
Figura 13 -Vantagens da Implementação de <i>Learning Factories</i>	53
Figura 14 -Modelo da Tripla-Hélice das <i>Learning Factories</i>	53
Figura 15 - Dimensões da Morfologia do Modelo de Descrição Multidimensional do CIRP.	56
Figura 16 - Localização da <i>Learning Factory</i>	71
Figura 17 - Sala destinada para a implementação da Learning Factory.	72
Figura 18 - Logótipo da Learning Factory.	73
Figura 19 - Produto da CIA-UBI Learning Factory.	78
Figura 20 - Cadeia de Valor da CIA-UBI Learning Factory.	84
Figura 21 - Layout proposto para a CIA-UBI.	86
Figura 22 - Visão 3D da CIA-UBI.	86
Figura 23 - Secção 1 do Layout da CIA-UBI.	87
Figura 24 - Secção 2 do Layout da CIA-UBI.	88
Figura 25 - Secção 3 do Layout da CIA-UBI.	88
Figura 26 - Secção 4 do Layout da CIA-UBI.	96
Figura 27 - Secção 5 do Layout da CIA-UBI.	103
Figura 28 - Quadro <i>Kanban</i> desenvolvido para a CIA-UBI.	104
Figura 29 - Cronómetro para contabilizar a duração da montagem.	105
Figura 30 - Suposto sistema <i>Andon</i> a implementar na CIA-UBI.	105
Figura 31 - Custos de Implementação - Quadro.	109
Figura 32 - Custos de Implementação - Estações.	109
Figura 33 - Custos de Implementação - Sensores.	110
Figura 34 - Custos de Implementação - Equipamento.	111

Figura 35 - Custos de Implementação - Outros..... 111

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Exemplos Práticos de Ferramentas Lean em diversas áreas de aplicação....	24
Tabela 2 - Interação entre as Tecnologias da Indústria 4.0 e as Ferramentas da <i>Lean Manufacturing</i>	43
Tabela 3 - Morfologias existentes de <i>Learning Factories</i>	55
Tabela 4 - Primeira Dimensão - Modelo Operacional.	57
Tabela 5 - Segunda Dimensão - Propósito.....	58
Tabela 6 - Terceira Dimensão - Processo.	59
Tabela 7 - Quarta Dimensão - Configuração.	60
Tabela 8 - Quinta Dimensão - Produto.....	60
Tabela 9 - Sexta Dimensão - Didática.....	61
Tabela 10 - Sétima Dimensão - Métrica.....	62
Tabela 11 - Exemplos de <i>Learning Factories</i> pelo mundo e os tipos de propósitos	63
Tabela 12 - Modelo Operacional CIA-UBI <i>Learning Factory</i>	74
Tabela 13 - Propósito CIA-UBI <i>Learning Factory</i>	75
Tabela 14 - Processo CIA-UBI <i>Learning Factory</i>	76
Tabela 15 - Configuração CIA-UBI <i>Learning Factory</i>	77
Tabela 16 - Componentes do produto.....	78
Tabela 17 - Outros Componentes do Produto.....	80
Tabela 18 - Produto CIA-UBI <i>Learning Factory</i>	81
Tabela 19 - Didática CIA-UBI <i>Learning Factory</i>	82
Tabela 20 - Métrica CIA-UBI <i>Learning Factory</i>	83
Tabela 21 - Instruções do Posto de Trabalho 3A.	89
Tabela 22 - Instruções do Posto de Trabalho 3B.....	90
Tabela 23 - Instruções do Posto de Trabalho 3C.....	90
Tabela 24 - Instruções do Posto de Trabalho 3D.....	91
Tabela 25 - Instruções do Posto de Trabalho 3E.	91
Tabela 26 - Instruções do Posto de Trabalho 3F.	92
Tabela 27 - Instruções do Posto de Trabalho 3G.....	93
Tabela 28 - Instruções do Posto de Trabalho 3H.	93
Tabela 29 - Instruções do Posto de Trabalho 3I.....	94
Tabela 30 - Instruções do Posto de Trabalho 3J.	95
Tabela 31 - Função do Posto 3K.....	95
Tabela 32 – Função do Posto de Trabalho 4L.	97
Tabela 33 – Função do Posto de Trabalho 4M.	98
Tabela 34 – Função do Posto de Trabalho 4N.....	99

Tabela 35 – Função do Posto de Trabalho 4O.	100
Tabela 36 – Função do Posto de Trabalho 4P.....	101
Tabela 37 – Função do Posto de Trabalho 4Q.	101
Tabela 38 – Função do Posto de Trabalho 4R.	102
Tabela 39 - Possíveis Unidades Curriculares de Engenharia e Gestão Industrial na CIA-UBI.	107
Tabela 40 - Custo Total de Implementação da CIA-UBI Learning Factory.....	112

1. Introdução

Neste capítulo é apresentada a contextualização ao tema em estudo, os objetivos gerais e específicos a atingir com o presente trabalho, a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho e a estrutura da presente dissertação.

1.1. Contextualização do Trabalho Desenvolvido

Atualmente, com o constante avanço da tecnologia em concomitância com o crescimento da economia, torna-se imperativo a existência de uma mão-de-obra cada vez mais qualificada para responder aos desafios da indústria. Para que tal aconteça, é necessária uma mudança no modo como a formação das gerações, atuais e futuras, tem vindo a ser adquirida. A educação com uma vertente mais técnica, na qual exista o contacto com diversas ferramentas, tecnologias e com a própria indústria, poderá ser a solução para responder a estes desafios.

A *Lean Manufacturing* (LM) é uma Filosofia que está relacionada com a indústria automóvel, mais propriamente, associado ao Sistema de Produção Toyota (TPS) (Gento et al., 2020). A LM está associado ao TPS, utilizada, no Japão, em 1950, e continuando a ser utilizada, tendo como objetivos a melhoria contínua, o envolvimento dos colaboradores, a redução de custos e a satisfação do cliente (Gupta and Jain, 2013). De acordo com (Womack and Jones, 1997), a LM é baseada em cinco princípios: a Especificação do valor, a Identificação do valor, o *Flow* (Criação do Fluxo), o *Pull* e a Procura da perfeição.

Segundo Womack and Jones (apud Dilanthi, 2015; 2008), um dos principais objetivos da implementação da LM é a eliminação de tudo o que não agrega valor ao produto e/ou serviço prestado. A adoção desta filosofia por parte das empresas é uma tarefa muito difícil, pois exige experiência, tempo e o comprometimento de todos os níveis hierárquicos, mas uma vez implementada, trará vantagens associadas.

As empresas industriais estão hoje e, cada vez mais, posicionadas num elevado patamar de competitividade. Foram surgindo novos desafios tais como, diversos conceitos inovadores e díspares, assim como equipamentos de alta tecnologia. Para poderem acompanhar o crescimento do mercado e atingirem os seus objetivos, a filosofia *Lean* e os novos paradigmas da Indústria 4.0 (I4.0) surgiram com o intuito de ajudar as empresas a alcançarem as suas metas (Pagliosa et al., 2019).

A I4.0 é um novo conceito de produção industrial, baseado numa produção automatizada com a integração de novas tecnologias, a fim de se obter produtos com melhor qualidade, melhor produtividade e melhores condições de trabalho para os trabalhadores (Di Nardo et al., 2020). É a fusão do mundo real com o virtual, através de Sistemas Ciber-Físicos (CPS), da *Internet of Things* (IoT) e dos *Big Data*.

Os sistemas tendem a ser, cada vez mais, complexos, situação esta que há uns anos nunca se imaginaria existir, o que pressupõe a necessidade de um grande conhecimento técnico e empírico para utilizar os novos equipamentos e dispositivos no mundo industrial.

Com o aumento da complexidade dos equipamentos e da tecnologia envolvida na indústria, há a necessidade, por parte das empresas, de possuírem trabalhadores com melhor formação, que sejam capazes de gerir e solucionar problemas complexos, com a maior brevidade possível. A competitividade, a produtividade e a qualidade de uma empresa, dependem do modo como os seus trabalhadores enfrentam os problemas inerentes às tecnologias da Indústria 4.0 (Adam et al., 2020).

No presente, para a indústria, a falta de mão-de-obra qualificada e, para os jovens recém-formados, a falta do contacto com as técnicas, ferramentas e equipamentos necessários nos seus trabalhos futuros, deve ser colmatada. A criação de parcerias entre as universidades e as empresas poderá constituir uma importante ajuda aos estudantes, para que possam adquirir as competências e a formação adequada às exigências do mercado de trabalho. Segundo Abele (2019), de forma a estarem capacitados para uma carreira na indústria, os estudantes devem compreender a complexidade dos sistemas e dos processos produtivos, desenvolver a capacidade de melhorar os fluxos de valor, conhecer as aplicações da tecnologia num contexto prático e desenvolver o espírito de equipa e de liderança.

A criação de *Learning Factories* (LF) dentro das universidades irá permitir aos estudantes desenvolverem as suas competências, consolidar o seu conhecimento e realizar investigação nas diversas áreas da produção industrial. O termo LF é constituído por dois conceitos, a aprendizagem e as fábricas, ou seja, é a aplicação da educação e formação em ambientes de fábrica próximos dos processos reais (Abele et al., 2010). Segundo Tisch et al. (2016), existem duas perspetivas relacionadas com as LF, a perspetiva Didática e a perspetiva Operacional.

A conceção destas fábricas didáticas traz benefícios, tanto para a indústria como para a formação dos alunos nas universidades. Para a Indústria, a simulação num ambiente de aprendizagem, permite custos e riscos mais reduzidos e uma pressão mais baixa, podendo os resultados da simulação serem traduzidos numa melhoria nos processos, para posterior aplicação em ambiente real. Para os estudantes, permite-lhes adquirir experiência, conhecimento e um maior contacto entre o mundo académico e o mundo real (Carvalho et al., 2013).

1.2. Objetivos

O objetivo geral que se pretende atingir com a presente dissertação é a criação de uma *Learning Factory* na Universidade da Beira Interior e posteriormente um Centro de Investigação. O primeiro objetivo específico é a realização de uma revisão bibliográfica sobre a Filosofia Lean, a Indústria 4.0 e as *Learning Factories*. De seguida projetar a *Learning Factory* como propósito de educação e investigação, selecionando as ferramentas Lean e as tecnologias da Indústria 4.0, o produto que vai ser produzido de forma didática, assim como o processo que irá produzir os componentes do produto e por fim detalhar ao pormenor a configuração e as funções de cada estação da *Learning Factory*.

1.3. Metodologia

A presente dissertação foi desenvolvida de acordo com o método científico através de uma abordagem indutiva, onde se inferem conceitos teóricos. Foram realizadas várias pesquisas bibliográficas e análises de artigos. O presente trabalho apoia-se numa perspetiva qualitativa, de princípio construtivista, caracterizado pela construção de uma realidade subjetiva através da interação entre o investigador e o tema em estudo. Nesta dissertação foi aplicado o método interpretativo que se define por uma base empírica, onde a pesquisa e a interpretação de documentos como artigos científicos e dissertações suportam o texto produzido pelo investigador, com a finalidade de relacionar diversas informações sobre o tema em estudo. O método de investigação-ação também foi aplicado, uma vez que o autor da dissertação está envolvido, na criação da *Learning Factory*. As pesquisas bibliográficas foram realizadas nas bases de dados de artigos científicos, *Science Direct*, *Scopus* e *IEEE Xplore*. Na Figura 1, apresenta-se o fluxograma do processo de investigação, onde a exploração corresponde à análise da bibliografia publicada na área da investigação para compreender o estado atual do conhecimento no tema em questão, a conceção da investigação diz respeito à seleção de um método de investigação a utilizar e execução da investigação corresponde à criação do relatório da

investigação, documentando tudo o que foi analisado e apresentado neste caso sob a forma de uma dissertação (Bhattacharjee, 2012).



Figura 1 - Fluxo do Processo de Investigação.
(Adaptado de Bhattacharjee, 2012)

1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação, quanto à sua estrutura, encontra-se dividida em seis capítulos.

O primeiro capítulo é referente à introdução em que é apresentada uma contextualização do trabalho, a definição do objetivo geral e dos objetivos específicos, a metodologia utilizada no desenvolvimento desta dissertação e a sua estruturação.

No segundo capítulo é abordada e enquadrada teoricamente a Filosofia *Lean*, com uma contextualização histórica, apresentam-se os conceitos que a caracterizam, assim como algumas das suas ferramentas e por fim são apresentados exemplos práticos da aplicação das referidas ferramentas.

O terceiro capítulo é destinado ao enquadramento da Indústria 4.0, onde primeiramente se aborda a sua evolução histórica, os conceitos e as suas tecnologias e dispositivos eletrónicos. No final deste capítulo, é ainda analisada a possibilidade de integração da Filosofia *Lean* com a Indústria 4.0.

No capítulo número quatro é apresentado o conceito de *Learning Factory*, iniciando-se pelo seu contexto histórico, de seguidas os conceitos, a morfologia de uma *Learning Factory* nas sete dimensões convencionadas e por fim apresentados alguns exemplos de *Learning Factories* espalhadas pelo mundo.

No quinto capítulo é apresentada a proposta de implementação da *Learning Factory* na Universidade da Beira Interior, em que primeiramente esta é contextualizada geograficamente, de seguida é apresentada a motivação que levará a sua implementação e caracterizada segundo o modelo descritivo multidimensional. Por fim, ainda no capítulo 5, é detalhado ao pormenor a cadeia de valor, as células de produção, as ferramentas *Lean* e tecnologias da Indústria 4.0 selecionadas, as unidades curriculares que poderão ser lecionadas na *Learning Factory* e um estudo dos custos da implementação da CIA-UBI.

O último capítulo é referente às considerações finais, apresentando-se as conclusões e as limitações ao desenvolvimento da presente dissertação.

2. Filosofia *Lean*

O *Lean* é um termo que remonta ao final do século XIX e início do século XX, com a criação do sistema de produção *Ford* e outros fabricantes de automóveis. Alguns dos principais contribuintes para a criação e desenvolvimento desta filosofia são Frederick Taylor, Frank e Lillian Gilbreth, Henry Ford, Sakichi e Kichiro Toyoda, e Taiichi Ohno (Dave, 2020). Nos subcapítulos seguintes serão abordados temas como a evolução histórica, alguns conceitos e ferramentas que caracterizam a filosofia *Lean*, assim como, casos práticos da sua aplicação.

2.1. Evolução Histórica

O conceito *Lean* é o resultado de anos de melhoria contínua, no setor da indústria e nas áreas da engenharia e da gestão. Muitos autores, organizações e líderes contribuíram em larga escala, para a criação desta filosofia (Protzman et al., 2016).

No século XVIII, um livro escrito por Adam Smith, intitulado “A Riqueza das Nações”, relata que William Petty afirmou que se obtém mais lucro se as tarefas forem divididas por todos os trabalhadores, em vez de, um único trabalhador realizar as diferentes tarefas. No livro, é ainda referido, que numa fábrica de produção de alfinetes, o processo foi dividido em 18 operações diferentes e distribuídas por 10 operadores, e o resultado foi a produção de 48.000 alfinetes por dia. Na mesma fábrica, se um único operador realizasse todas as tarefas, fabricava apenas 20 alfinetes diários. Com esta descoberta constatou-se que era mais produtivo especializar os trabalhadores numa única tarefa, uma vez que a produtividade seria maior. Esta estratégia foi aplicada anos mais tarde na fabricação de automóveis (Protzman et al., 2016).

Antes do século XX, outro livro, denominado “O Caminho para Riqueza”, e escrito por Benjamin Franklin, aborda o tema da redução de resíduos (Dilanthi, 2015). Depois deste século, Frederick Taylor, pai do estudo do tempo, utilizou diversas abordagens como a divisão de tarefas, a eliminação de movimentos desnecessários e o registo do tempo de cada movimento, relativamente a cada trabalhador, adicionando a fadiga e os atrasos. Esta última abordagem foi utilizada com o intuito de selecionar as etapas adequadas e que devem ser empregues por um trabalhador, para a produção de qualquer produto. Com o incremento da produtividade, Taylor, conseguiu perceber que a longo prazo, se conseguiriam eliminar os desperdícios, reduzir os custos e oferecer produtos mais baratos (Protzman et al., 2016).

Frank Gilbreth também contribuiu para o desenvolvimento do *Lean* e, é conhecido por ser o pai do estudo do movimento, aquando da Primeira Guerra Mundial. Gilbreth, desenvolveu 18 movimentos fundamentais mais rápidos e eficientes, identificando e eliminando movimentos desperdiçados, sendo este considerado um dos oito desperdícios do pensamento *Lean*. Gilbreth foi, ainda, um dos primeiros apoiantes da melhoria contínua e do trabalho padronizado. Os trabalhos de Taylor e Gilbreth, embora se relacionassem, tinham conceitos distintos. Para Taylor, o estudo do tempo era o principal objetivo para cronometrar e extrair a eficiência dos trabalhadores. Enquanto Gilbreth se focava em tornar o trabalho mais fácil para o trabalhador e reduzir movimentos desnecessários e perigosos. A sua esposa, Lillian Gilbreth, foi a primeira mulher engenheira com um doutoramento, a trabalhar na indústria. Após a morte do marido, Lillian continuou o trabalho que fora desenvolvido por Gilbreth, com uma dissertação intitulada “Alguns aspetos da eliminação do desperdício no ensino”. Embora Taylor, pai da gestão científica, seja mais célebre, são os estudos de Frank e Lillian Gilbreth que mais se refletem nos principais alicerces do *Lean*. Estas temáticas estudadas serviram de base à construção e desenvolvimento de muitas teorias sobre a gestão de produção. Um exemplo disso, é a filosofia de produção *Ford* construída sobre os fundamentos de Taylor (Dilanthi, 2015; Protzman et al., 2016).

No início do ano de 1900, Henry Ford desenvolveu uma linha de montagem, em que a atividade era a produção de automóveis em larga escala (Dilanthi, 2015). Hoje, é um dos exemplos conhecidos, de levar o trabalho aos operadores, sendo estas pessoas qualificadas. A estratégia de crescimento, adotada por Ford, era a de fabricar automóveis que os seus trabalhadores os pudessem adquirir, assim como, grande parte da população (Protzman et al., 2016). A produção de automóveis em larga escala tornava-se um processo dispendioso e demorado, e desta forma, Ford, incorporou a teoria de Taylor na linha de produção. A teoria de gestão de Taylor, afirmava que se melhorava a produtividade de um trabalhador se lhe fossem atribuídas atividades adequadas às suas aptidões e experiência profissional. Esta teoria permitiu que Ford conseguisse identificar o desperdício dos movimentos físicos, realizados pelos trabalhadores, o tempo despendido em todo o processo de montagem, o movimento das peças do motor e a sua má disposição no chão de fábrica. Todos estes desperdícios identificados, ajudaram Ford a desenvolver a produção automobilística em massa, para operar com mais eficiência, convertendo a fabricação de automóveis numa linha de produção compacta. Esta Filosofia, não permite que seja aplicada em ambientes dinâmicos, uma vez que este

método requer ambientes estáveis como comprovado nos diversos casos de estudo apresentados nos próximos subcapítulos (Dilanthi, 2015 apud Levinson, 2002).

Outra figura importante para o conceito *Lean*, foi Sakichi Toyoda, cidadão japonês que cresceu no final do século XIX, em Nagoya, comunidade agrícola no Japão. Na sua infância aprendeu as artes da carpintaria com o seu pai, acabando por inventar máquinas de fição de madeira. Mais tarde, em 1894, construiu teares que eram mais baratos e mais eficientes que os existentes. Ainda insatisfeito com a *performance* do tear, pois era uma atividade cansativa, desenvolveu um tear elétrico que tinha como fonte de energia os motores a vapor, principal fonte de energia da época. Em 1926, fundou a Toyota Automatic Loom Works. As constantes mudanças e invenções de Toyoda acabaram por resultar no desenvolvimento de teares automáticos. Entre as suas invenções, estava um mecanismo que conseguia parar o tear automaticamente, sempre que um fio rebentasse, que mais tarde se tornou um dos pilares do TPS, o *Jidoka* (Liker, 2004).

Em 1929, Sakichi Toyoda com a venda das patentes do seu tear automático avançado, criou a fundação da Toyota Motor Company. O filho de Sakichi, Kiichiro, foi quem tomou as rédeas do negócio da produção de automóveis, com o intuito de servir o país como o seu pai serviu, com o negócio da fição e tecelagem (Holweg, 2007; Ohno, 1988).

A produção de automóveis no Japão era pouco desenvolvida e, por isso, relativamente pequena, nas primeiras décadas do século XX. Com a entrada das gigantes produtoras de automóveis, Ford e General Motors, em 1925 e 1927 respetivamente, o paradigma mudou e em pouco tempo estas empresas americanas dominavam o mercado japonês em 92%. A Toyota produzia apenas 3% da produção total do país. De modo a resolver este domínio americano, Kiichiro Toyoda realizou pesquisas em motores automotivos e em 1934, foi fabricado o primeiro protótipo do motor Toyota. Kiichiro visitou os fabricantes de automóveis americanos com o objetivo de melhorar o sistema de produção em massa da Toyota. Um ano depois, a Toyota, com todo os esforços de Kiichiro lançou o primeiro automóvel do Modelo A1. Com a entrada em vigor da lei empresarial do automóvel, que obrigava ao encerramento das fábricas americanas no Japão e, por sua vez, subsidiava as empresas automobilísticas japonesas, o crescimento e o desenvolvimento livre da Toyota foi facilitado (Dave, 2020).

Kichiro construiu a Toyota Automotive Company, não só pelas estratégias de gestão do seu pai, mas também pelas suas ideias e inovações. Enquanto Sachiki Toyoda desenvolveu o *Jidoka*, Kiichiro foi o pai do *Just-in-Time* (JIT) (ferramenta que consistia na produção de quantidades precisas de artigos já encomendados, com o mínimo

absoluto de desperdício), dois pilares do TPS. Kiichiro baseou-se numa visita às fábricas de produção *Ford* e aos supermercados norte-americanos, nos quais existia a substituição de produtos nas prateleiras, mesmo a tempo de os clientes os adquirirem (Liker, 2004; Protzman et al., 2016).

Com a Segunda Guerra Mundial, a produção automóvel sofreu quebras e dificuldades económicas, por conseguinte, verificou-se um aumento dos inventários e uma quebra nas vendas. Em 1948, a dívida da Toyota era oito vezes superior ao valor total do seu capital (Reingold, 1999). A Toyota adotou medidas rigorosas, como a redução de custos, tanto nas remunerações dos gestores (cortes voluntários), bem como 10% no salário dos trabalhadores, com o intuito de não contrariar a filosofia de Kiichiro Toyoda, que não era a favor de despedimentos. Só os cortes salariais não foram suficientes e, cerca de 1600 trabalhadores reformaram-se voluntariamente. Por fim, a empresa acabou por não resistir e é nesta altura que Kiichiro decide despedir-se e aceitar a responsabilidade do fracasso da empresa automotiva, apesar de que, na realidade, os problemas estavam para além da sua alçada. Ao despedir-se e afirmar-se como responsável do fracasso, Kiichiro mostrou que a filosofia da Toyota é pensar para além das preocupações individuais para o sucesso a longo prazo das empresas, bem como, assumir as responsabilidades. Todos os membros da família Toyota cresceram com filosofias semelhantes e, todos eles tinham a visão de criar uma empresa especial com um futuro a longo prazo (Liker, 2004).

É nesta altura que um primo, Eiji Toyoda assume funções como Diretor Geral da produção da Toyota. Eiji, depois da visita aos Estados Unidos da América, para estudar os métodos de fabricação americanos, pretendia implementar técnicas de produção em massa na Toyota e entrega essa missão ao gerente da fábrica, Taiichi Ohno, engenheiro mecânico de profissão e o homem que impulsionou o sistema de produção Toyota, conhecido por TPS. O grande objetivo passava por melhorar o processo de fabrico da Toyota para que este igualasse a produtividade da Ford. O sistema de produção Ford, baseava-se na produção em massa e foi concebido para fabricar quantidades enormes de automóveis de um número limitado de modelos. A Toyota, ao contrário da Ford, necessitava de produzir quantidades mais reduzidas de automóveis, mas de diferentes modelos, utilizando a mesma linha de montagem, porque a procura era demasiado baixa para suportar linhas de produção dedicadas. Por este motivo, era necessário adaptar o processo de fabrico do sistema Ford para alcançar em simultâneo, alta qualidade, baixo custo, prazos de entrega curtos e flexibilidade (Holweg, 2007; Liker, 2004).

Ohno, analisando os sistemas de produção ocidentais, verificou a existência do fabrico de uma grande quantidade de produtos em grandes lotes, o que resultava em grandes volumes de *stock* e por sua vez custos de armazenamento e falta de espaço, observando-se ainda que muitos desses componentes tinham defeitos. A diversidade dos produtos para poder satisfazer os clientes, era outra das falhas destes sistemas de produção. O conceito de Ohno, de produzir em pequenos lotes, foi ampliado progressivamente em toda a Toyota. O objetivo desta produção baseava-se na redução de custos através da eliminação de desperdícios. Em 1950, este conceito tornou a produção da indústria automóvel japonesa mais eficaz quando comparada com a norte-americana. A produção de pequenos lotes associada às economias de escala, na aquisição de componentes e fabricação de automóveis, trouxe vantagens para o TPS em que a sua implementação tinha uma duração significativa (Holweg, 2007). Para Protzman (2016), Ohno é agora considerado o pai do TPS, ao ter aplicado a visão de Kichiro, o JIT.

Alguns anos depois, empresas de grande renome, como a Nissan, Honda Sony e a Toyota começaram a liderar o mercado, não só no Japão como também na América do Norte e no continente Europeu. Com o crescimento rápido destas empresas, vários investigadores e consultores atuaram no sentido de descobrir o modo como estas empresas inventaram, implementaram e operavam os seus sistemas de produção. A estes processos era chamada *Lean Manufacturing* (Dave, 2020). O resultado de uma destas investigações deu origem ao livro intitulado por “The Machine That Changed The World”, publicado por Womack et al.(1990), onde foi possível compreender o sucesso japonês e conseguir identificar as lacunas que as empresas teriam de superar para atingir o mesmo sucesso.

2.2. Conceitos

O conceito *Lean* é descrito em diversos trabalhos científicos por inúmeros autores, de diferentes modos, mas que acabam por convergir na mesma conclusão e, deste modo, se complementarem. Em 1988, o conceito de *Lean Production* foi caracterizado como uma estratégia, em que se utilizaria menos em detrimento de se produzir o necessário (Krafcik, 1988). Articulado com Scherrer-Rathje (2009), pode-se encontrar na literatura, quem defenda que o conceito *Lean* é considerado uma visão filosófica ou uma visão prática.

Sob uma perspetiva prática Drew, McCallum and Roggenhofer (2004), definem *Lean* como um conjunto de princípios, práticas, ferramentas e técnicas formuladas para resolver as causas do baixo desempenho operacional, sendo uma aplicação sistemática

para eliminar desperdícios do fluxo de valor de uma organização. O *Lean* sob o ponto de vista prático pode, ainda ser definido como um sistema de fabrico cujo objetivo é agilizar o fluxo de produção, procurando de forma contínua reduzir os recursos necessários para fabricar um determinado produto ou conjunto de produtos (Treville and Antonakis, 2006).

Numa perspetiva filosófica, o conceito *Lean* é caracterizado como uma filosofia de gestão, centrada na identificação e eliminação contínua dos desperdícios ao longo de toda a cadeia de valor de um produto e de uma organização, deixando apenas as atividades que acrescentam valor (Shah and Ward, 2007; Stone, 2012).

2.2.1. Desperdícios

De acordo com Melton (2005), o termo desperdício, no Japão denominado “muda”, pode ser definido como todas as atividades num processo que não agregue valor para o cliente. Se todos os desperdícios forem identificados e eliminados, poderá resultar num aumento do lucro para qualquer organização. A identificação de desperdícios é possível, através da observação dos operadores, dos equipamentos, dos materiais, da linha de produção, entre outros. Todos os desperdícios resultarão, sempre, num aumento de custo e nunca melhorarão o valor. Taiichi Ohno (1988), aquando da evolução do TPS, descreveu sete tipos de desperdícios que se encontram ilustrados na Figura 2.

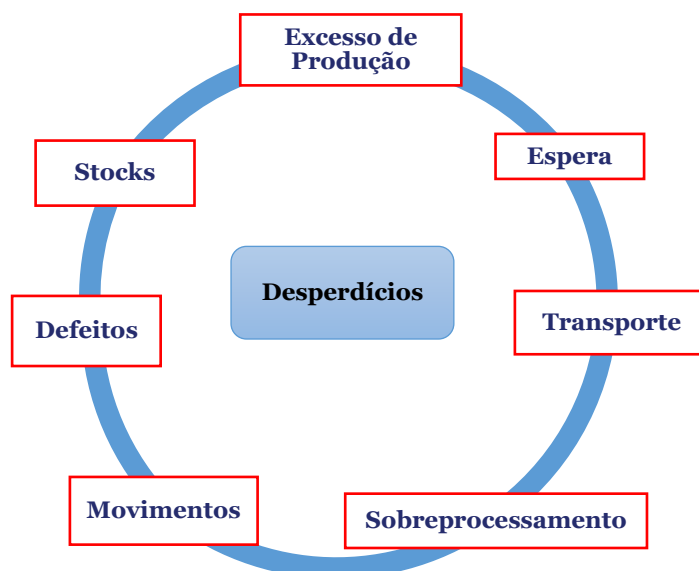


Figura 2 - Os sete desperdícios da Filosofia Lean.
(adaptado de Ohno, 1988)

O Excesso de Produção divide-se em dois tipos, excesso de produção quantitativa e precoce. A quantitativa refere-se à produção de produtos não encomendados pelo cliente, enquanto que a precoce diz respeito ao fabrico de um produto, antecipadamente de este ser realmente indispensável ao cliente (Okpala, 2014; Shingo, 1989). Os principais efeitos do excesso de produção são o aumento do espaço utilizado pelo *stock*, aumento dos custos de armazenamento, utilização de mais matéria-prima, consumo excessivo de recursos, o que poderá também traduzir-se no aumento do risco de produção com defeito (Amaro et al., 2019; Art of Lean, 2000; El-namrouty and Abushaaban, 2013).

O desperdício em relação à espera, é caracterizado como o tempo gasto pelos trabalhadores para iniciar a próxima etapa, tempo esse que não acarreta valor ao fluxo (Okpala, 2014; Womack and Jones, 2008). Isto é, o tempo de espera ocorre quando há estrangulamentos na produção, quando os trabalhadores necessitam de uma ferramenta, quando existem roturas de stock, paragem de equipamentos, até que os processos voltem ao normal funcionamento, sem contabilizar os atrasos de produção (El-namrouty and Abushaaban, 2013; Liker, 2004). O risco da existência de produtos danificados, a energia desperdiçada e o aumento dos prazos de entrega são algumas das principais causas deste tipo de desperdício (Amaro et al., 2019; Goshime et al., 2018).

O transporte pode ser definido pelos movimentos desnecessários de peças, ferramentas, produtos e informações, de um local para outro, não acrescentando qualquer valor ao produto (Okpala, 2014). Estes movimentos resultam num aumento do tempo de produção e na utilização de mão-de-obra dispensável e, por conseguinte, verifica-se a fabricação de produtos com defeito, um custo associado e a perda de informação (El-namrouty and Abushaaban, 2013; Goshime et al., 2018).

Quando se denomina sobreprocessamento como um tipo de desperdício, refere-se a esforços que, para o cliente, não acrescentam valor ao produto (El-namrouty and Abushaaban, 2013). Uma abordagem mais cautelosa na conceção do produto, levando a que os tempos de processamento sejam prolongados, a duplicação de etapas de verificação ou testagem e a existência de documentação desnecessária, são exemplos de desperdício que caracterizam o sobreprocessamento (Liker, 2004; Melton, 2005).

A matéria-prima e os produtos finalizados, que estejam armazenados em excesso, ou seja, que ultrapassem os valores da procura, são considerados desperdícios e não acrescentam valor para o cliente (Liker, 2004; Okpala, 2014). O excesso de *stocks* tem como efeito, o aumento dos custos de armazenamento, dos produtos obsoletos, do espaço

usado e dos recursos utilizados, relativos ao acondicionamento do produto e/ou da matéria-prima (Amaro et al., 2019; Melton, 2005).

As especificações pouco perceptíveis de um produto, requeridos por um cliente, os processos mal realizados, a não qualificação dos trabalhadores, o planeamento dos processos mal definido e um controlo da qualidade ineficaz, traduzem-se em produtos com defeito (Melton, 2005). Estes produtos são considerados como desperdício, isto é, vão precisar de tempo e de mão-de-obra para serem reparados, aumentando os custos e os riscos de novos defeitos. Em muitos dos casos existe a perda financeira desse produto por não estar conforme o pretendido e com uma qualidade inferior à exigida pelo cliente (Art of Lean, 2000).

Os movimentos desnecessários, realizados pelos trabalhadores, no chão de fábrica, que não acrescentam valor ao produto ou serviço, constituem um tipo de desperdício, resultando na perda de tempo e esforços (Okpala, 2014). Por outras palavras, este desperdício inclui qualquer deslocação no chão de fábrica, para procurar uma ferramenta e deslocações difíceis provocadas pela ergonomia do próprio *layout* (El-namrouty and Abushaaban, 2013). O atraso no início de um processo e a perturbação do fluxo de trabalho são efeitos de movimentos desnecessários (Goshime et al., 2018).

Alguns autores consideram como oito, o número de desperdícios, referindo-se às pessoas subutilizadas como o oitavo desperdício. As empresas tendem a não beneficiar eficientemente das capacidades intelectuais dos seus trabalhadores, sendo estes considerados o maior ativo dentro das organizações. As capacidades intelectuais destes, ao serem corretamente aproveitadas, auxiliariam na identificação e redução de todas as formas de desperdícios acima mencionadas (Okpala, 2014).

Como suprarreferido, estes desperdícios são intitulados de “muda”, existindo ainda mais dois tipos de desperdícios, o “muri” e o “mura”. O *Muri* diz respeito à sobrecarga de um trabalhador ou de um equipamento para além dos seus limites, enquanto que, o *Mura* refere-se ao desnivelamento do planeamento da produção ao longo do tempo (Järvenpää and Lanz, 2019).

2.2.2. Princípios Lean

A Filosofia *Lean* tem como objetivo fornecer produtos e/ou serviços de qualidade para satisfazer as expectativas dos clientes, de forma a que a organização possa ser considerada um exemplo a seguir, na indústria e na sociedade (Art of Lean, 2000). Segundo Silva (2020), os objetivos por detrás da Filosofia *Lean* são atingidos através dos cinco princípios definidos por Womack and Jones (2008). Na Figura 3, são apresentados os princípios e os objetivos deste pensamento.



Figura 3 - Objetivos e Princípios do *Lean*.
(adaptado de Womack and Jones, 2008)

A criação de valor é o primeiro princípio crítico de partida para o pensamento *Lean*. O valor é sempre definido pelo cliente, por isso, a base fundamental deste princípio é perceber o que os clientes pretendem e o que lhe acrescenta valor. Um produto e/ou serviço que satisfaça as necessidades do cliente a um preço e num momento específico, traduz-se em valor para o cliente (Järvenpää and Lanz, 2019; Womack and Jones, 2003).

O segundo princípio e, em seguimento do primeiro, é definir a cadeia de valor. De acordo com Järvenpää e Lanz (2019), é o conjunto de processos necessários para transformar uma ideia de um produto até chegar às mãos do cliente. A conceção do produto, a gestão de informação, a transformação da matéria-prima no produto final são etapas que se incluem na cadeia de valor.

Quanto ao princípio da otimização do fluxo, Melton (2005) refere que é o conceito mais difícil de compreender. O fluxo, ou do inglês *Flow*, preocupa-se com os processos, as pessoas e a cultura. Segundo Dilanthi (2015) consegue-se otimizar o fluxo através da eliminação dos desperdícios referidos na secção anterior.

Uma produção baseada num sistema “*Pull*”, caracteriza-se por fabricar produtos ou realizar serviços, exatamente quando os clientes necessitam e quando requerem, ou seja,

é fazer com que o cliente “puxe” o produto, em vez da organização lho impingir (Womack and Jones, 2003).

Por último, a procura da perfeição, também abordado como forma de melhoria contínua, do japonês, *Kaizen*, refere-se a uma Filosofia que visa a perfeição, com recurso à eliminação de desperdícios, através do incremento de processos de melhoria (Dilanthi, 2015; Järvenpää and Lanz, 2019).

O autor Jeffrey Liker (2004), no livro intitulado “*The Toyota Way*”, refere-se a 14 princípios, sendo eles apresentados de seguida:

1. Fundamentar as decisões de gestão numa Filosofia a longo prazo, mesmo que isso acarrete não atingir os objetivos financeiros a curto prazo;
2. Criação de um fluxo contínuo de modo a evidenciar os problemas;
3. Utilização do sistema *Pull* com o intuito de evitar a sobreprodução (sistema baseado no *JIT*);
4. Nivelar a carga de trabalho;
5. Produzir com qualidade à primeira, inculcando uma política de paragem para resolver problemas;
6. A padronização das tarefas são a base da melhoria contínua (perfeição) e da capacitação dos trabalhadores;
7. Empregar o controlo visual para identificar problemas e poder solucioná-los;
8. Utilizar apenas tecnologia testada e fiável, para assim suportar os processos e os trabalhadores;
9. Formar os líderes para que compreendam bem o trabalho, respirem a Filosofia e ensinem toda a organização;
10. Capacitar os trabalhadores e as equipas para que sigam a Filosofia da empresa;
11. Respeitar todos dentro da organização e os *stakeholders*, motivando-os assim a melhorar;
12. Ver por si mesmo, deslocando-se até ao chão de fábrica e comunicar com os trabalhadores;
13. Tomar decisões consensuais, considerando sempre todas as opiniões e implementando-as de forma célere;
14. Estabelecer um ambiente de aprendizagem, na organização, através da reflexão e da melhoria contínua.

2.2.3. Casa do Sistema de Produção Toyota

O diagrama em forma de casa do TPS transformou-se numa representação conhecida e marcante, nos dias de hoje. Esta representação pretende comparar um sistema estrutural, como uma casa, com o TPS. Uma casa torna-se robusta, se os seus alicerces forem fortes e o telhado estiver assente em pilares que o suportem (Liker, 2004). Assim acontece com o TPS, conforme ilustrado na Figura 4.

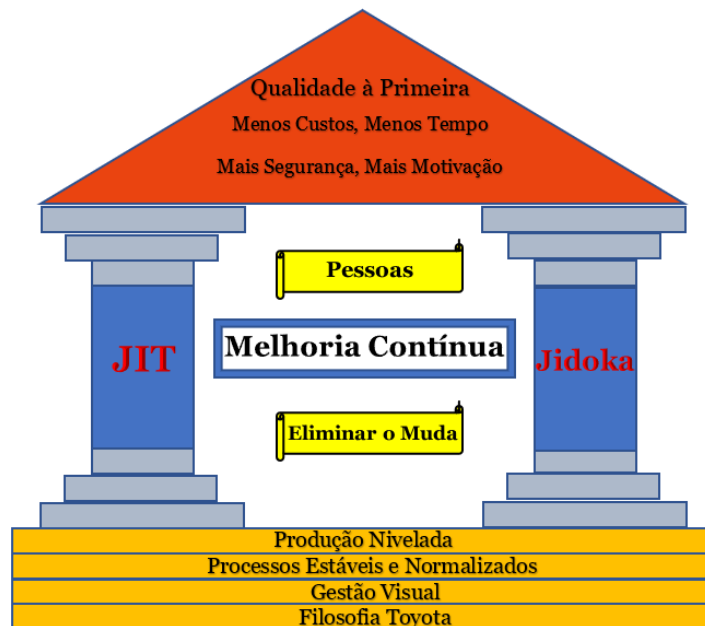


Figura 4 - Sistema de Produção Toyota.
(adaptado de Liker, 2004)

O objetivo do TPS começa quando é aceite uma encomenda até que esta seja entregue ao cliente. Como alicerce do sistema, encontra-se a produção nivelada, que permite suavizar a produção das encomendas dos clientes, ao longo do tempo, os processos estáveis e normalizados, a gestão visual e a filosofia Toyota (Art of Lean, 2000). Quanto aos pilares que suportam o telhado, existem dois conceitos, o *JIT* e o *Jidoka*. O primeiro, é considerado uma ferramenta do *Lean*, que permite às organizações produzir a quantidade exata de produtos que os clientes necessitam e quando são necessários. Esta ferramenta, costuma ser utilizada para reduzir os desperdícios associados à sobreprodução e aos excessos de *stock*, e foi criada por Kichiro (Okpala, 2014). O *Jidoka*, do japonês automação, é também, uma ferramenta da Filosofia *Lean* e foi desenvolvida, como referido acima, por Sakichi Toyoda, como um equipamento de automação dotado de inteligência humana, para parar uma máquina sempre que é detetado um problema (Liker, 2004). No interior da casa evidenciam-se o envolvimento das pessoas e a eliminação de desperdícios, cujo intuito é o de trabalhar tendo sempre presente o espírito

da melhoria contínua. Por fim, o telhado, que alberga todo o sistema, que se esforça por produzir com qualidade à primeira, aos menores custos e tempo possíveis, com mais segurança e motivação (Art of Lean, 2000). Todos estes elementos do sistema do TPS referem-se a ferramentas que irão ser abordadas no subcapítulo seguinte e que, se forem utilizadas devidamente, atingirão os resultados esperados (Okpala, 2014).

2.3. Ferramentas e Exemplos Práticos

Neste subcapítulo são apresentadas as definições e exemplos práticos de algumas ferramentas da Filosofia *Lean*.

2.3.1. Kaizen

O termo *Kaizen* teve origem no Japão e é um conceito que aglutina duas palavras japonesas, KAI que significa mudança e ZEN que significa melhor (Rof, 2011). Segundo Razmeh (2014), *Kaizen* pode ser definido como um processo contínuo e que envolve toda a organização, mas uma definição mais completa é dado por Masaaki Imai (1986), que reconhece este conceito como filosófico e fundamental, que alberga a maior parte das técnicas e ferramentas do *Lean*, e que tem sido uma grande ajuda para as organizações. A melhoria contínua ou *Kaizen*, assenta em três pilares, a melhoria da qualidade dos produtos e serviços, o desperdício zero e a satisfação do cliente (Razmeh, 2014). Em concordância com Helmold (2020), uma organização deve seguir a perfeição e todos os trabalhadores devem estar continuamente empenhados na melhoria de processos, produtos e infraestruturas. Este autor, refere que o *Kaizen* assenta em 10 princípios:

1. Dizer não ao estado anterior das coisas;
2. Corrigir se algo estiver errado;
3. Não aceitar desculpas e fazer acontecer;
4. Melhorar tudo como um processo contínuo;
5. Abolir conceitos antigos e tradicionais;
6. Economizar;
7. Envolver todos os trabalhadores na resolução de problemas;
8. Tomar decisões depois de utilizar os 5 porquês;
9. Adquirir opiniões/informações de diversas pessoas;
10. Não há limites quando se fala em melhorar.

Para além de introduzir estes princípios, Hemold, menciona que uma ferramenta útil para ajudar na implementação do *Kaizen* é o ciclo PDCA, que contempla quatro etapas, *Plan, Do, Check e Act*.

2.3.2. Kanban

A palavra *Kanban* é oriunda do Japão e traduzida para português significa registro ou cartão visível. Para a indústria traduz-se em Cartão *Kanban* (Rahman et al., 2013). É uma das ferramentas do sistema *Lean*, sendo um sistema de controlo da produção. Esta ferramenta foi desenvolvida por Taiichi Ohno, com o objetivo de melhorar e manter um elevado nível de produção, traduzindo-se no método através do qual o JIT é atingido (Lehekar and Urne, 2017). Os cartões *Kanban* caracterizam-se por um sinal que concede autorização para encomendar ou produzir peças (Powell, 2018). De acordo com Lin (2013), o *Kanban* assenta em três regras: a visualização do fluxo de trabalho, a limitação do “*Work in Progress*” e na medição do *Lead time* (tempo médio para completar um produto). O tipo de *Kanban* mais comum, é o *Kanban* primário e divide-se em dois (Lehekar and Urne, 2017; Lin et al., 2013):

1. *Kanban* de Produção: utilizado para autorizar a fabricação de peças nas quantidades indicadas.

2. *Kanban* de Transporte: utilizado para autorizar o movimento de peças entre operações.

Existem ainda mais tipos de *Kanban*, como o caso do *Kanban* de fornecimento, de aquisição, de subcontratação, de auxílio e o E-*Kanban*. Este último é a integração de interna e externa de todos os tipos de *Kanban*, através da internet ou de um *software* (Ricky and Kadono, 2020).

2.3.3. Poka-Yoke

Poka-Yoke é um termo da gestão de qualidade, que significa “à prova de erros”. Esta ferramenta foi desenvolvida por Shingeo Shingo, para o TPS. Caracteriza-se por uma técnica inovadora para afastar o erro humano nos processos (Kumar et al., 2016). Segundo Lazaveric (2019), o principal objetivo do *Poka-Yoke* é prevenir ocorrência de defeitos. Existem duas formas em que o *Poka-Yoke* pode ser utilizado para corrigir erros, a de controlo, em que quando o *Poka-Yoke* é ativado a máquina ou a linha de produção desliga-se para que o problema seja resolvido, e de aviso, em que através de um som ou de uma luz, o trabalhador é avisado que algo está mal (Shingo, 1989).

2.3.4. Andon

A ferramenta *Andon* é, também, uma palavra japonesa, que significa “lanterna de papel” e é uma ferramenta de controlo visual que permite ao trabalhador pedir ajuda e parar a linha de produção (Li and Blumenfeld, 2006). Quando um trabalhador ativa um botão, automaticamente acende-se uma luz que alerta o supervisor que algum defeito ou avaria

ocorreu naquele sector, desencadeando um processo de verificação e identificação do que ocorreu (Everett and Sohal, 1991). De acordo com (Ohno, 1988), *Andon* é um dispositivo que está situado por cima da linha de produção e possui três tipos de luzes, uma de cor verde, que indica um bom funcionamento da linha de produção, uma de cor amarela, que indica quando um trabalhador precisa de introduzir ou ajustar algo na linha e, por fim, uma de cor vermelha, que é sinal que a linha foi interrompida para resolver um problema.

2.3.5. Value Stream Mapping

A ferramenta do *Value Stream Mapping* foi inicialmente desenvolvida como um método no seio do Sistema de Produção Toyota e mais tarde apresentado como uma ferramenta por Rother e Shook (Demirci and Gunduz, 2020). O VSM pode ser definido como uma ferramenta que permite compreender através do fluxo de informação e material, todas as atividades que acrescentam e não acrescentam valor, e, por conseguinte, eliminar essas atividades que são consideradas como desperdício pela filosofia Lean (Shou et al., 2017). Segundo Shou (2017) e Sunk (2017) citando Rother e Shook (1999), o VSM pode ser construído através de um procedimento de quatro etapas apresentadas de seguida:

1. Identificação da família de produtos;
2. Definição do mapa de estado atual – recolha de dados do processo e respetivas atividades desenvolvidas que agreguem e não agreguem valor;
3. Definição do mapa de estado futuro, realizado posteriormente à análise do mapa de estado atual e identificado as atividades de valor não acrescentado;
4. Comprometimento para atingir o estado futuro.

2.3.6. Células de Produção

Até aos dias de hoje, as empresas defrontam-se com alguns desafios relativos à globalização e à existência de um mercado muito competitivo. Estes desafios devem-se ao facto de os produtos estarem a tornar-se cada vez mais complexos, do seu ciclo de vida ser mais reduzido, da rápida mudança de procura do produto e pela constante mudança das tecnologias de fabricação (Bi and Wang, 2020; Houshyar et al., 2014).

Resultante destes desafios, que vão sendo encontrados pelas empresas, o planeamento e a programação das atividades de fabrico são cada vez mais complexos, mas ao mesmo tempo desafiantes. Com o intuito de prevenir a ocorrência de defeitos e atividades que não agreguem valor ao produto, as empresas devem possuir uma clara gestão organizacional do modo de fabrico dos produtos (Bi and Wang, 2020).

Como estes problemas não são recentes, investigadores ao longo do tempo descobriram que ao identificar e agrupar peças com a mesma forma de fabrico isso traria vantagens na produção. A este processo de agrupamento de peças deu-se o nome de tecnologia de grupo (Kareem Sakran et al., 2016). Pode-se definir este processo como uma filosofia de fabrico que tenta reconhecer e explorar as semelhanças entre as peças produzidas. Quando se refere semelhanças, estas podem ser baseadas na forma, no processo ou em ambos. As peças também podem ser agrupadas pelos materiais utilizados, características, funções, entre outros. Por sua vez, o conjunto de peças idênticas pode-se designar por famílias, que vão ser produzidas em células de produção (Bi and Wang, 2020; Canel et al., 2005).

De acordo com Pattanaik e Sharma (2009), as células de produção são uma aplicação da tecnologia de grupo, em que as várias famílias de peças idênticas são atribuídas a células (também designados como centros de trabalho) para se tirar vantagem das semelhanças de fabricação. Os primeiros estudos sobre o tema das células de produção remontam a 1930, e teve como investigador um russo chamado Sokolovsky, o qual propôs que partes da configuração e características semelhantes deveriam ser fabricadas da mesma forma através de um processo tecnológico padrão (Hyer and Brown, 1999 apud Hyde, 1981, p. 153).

Numa empresa, a organização do tipo de sistema de fabrico a implementar está limitada a dois fatores essenciais, o volume e a variedade de produtos. O tipo de sistema de fabrico ideal varia com a combinação do volume e da diversidade de produtos, não sendo um problema tão simples de otimizar, conforme ilustrado na Figura 5. (Bi and Wang, 2020).

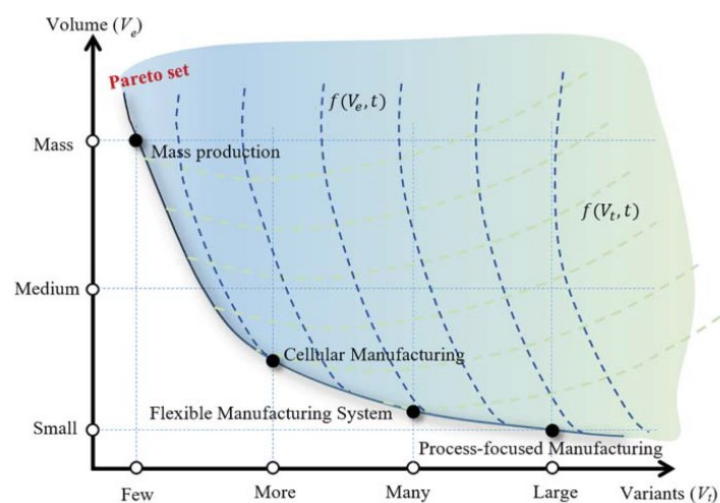


Figura 5 - Tipo de sistema de fabrico ideal (adaptado de Bi and Wang, 2020).

Como pode ser observado na figura acima, existem diferentes formas de fabricação que podem ser implementadas numa empresa, como a produção em massa, as células de produção, o sistema de produção flexível e a produção focada no fabrico. Na figura também é possível observar a referência ao gráfico de Pareto, que deve ser utilizado sempre que existam mais critérios e varáveis para se poder otimizar o desempenho global do sistema. Através da interpretação do gráfico, para a escolha incidir na produção através de células, a empresa terá que ter um volume de produtos compreendido entre um volume baixo ou médio e a variedade dos produtos produzidos não pode ir além da escala dos “more” (Bi and Wang, 2020).

Segundo (Parashar, 2009), as células de produção são qualificadas autossuficientes e autogeridas, e apresentam as seguintes características:

- Cada célula tem associado um conjunto de peças ou produtos;
- Cada célula é composta pelas máquinas e ferramentas que necessita para fabricar a família de peças que lhe compete;
- Os objetivos de cada célula são dados como um todo e não separadamente por diferentes trabalhadores, mas sim pela direção em conjunto com o responsável de cada célula e os trabalhadores;
- Dentro da célula de produção, existe mão-de-obra de reserva com determinada flexibilidade e uma equipa que é destinada exclusivamente a cada célula;
- Cada célula faz a sua própria inspeção e programação do trabalho.

O *layout* da produção por células pode ter vários formatos, mas o mais comum é em forma de “U”. As células estão ligadas entre si, onde as peças/produtos se movem desde o posto de trabalho inicial até ao posto de trabalho final, normalmente movem-se no sentido contrário ao ponteiro dos relógios. A

Figura 6 é um exemplo de um *layout* em forma de “U”, mas que pode ser modificado consoante as necessidades. As células de produção possuem um determinado controlo automático para solicitar a matéria-prima, mudar de ferramentas, transferir peças e ferramentas entre as células de trabalho. Cada célula pode ser inteiramente automatizada ou assistida por trabalhadores (Bi and Wang, 2020; Kareem Sakran et al., 2016).

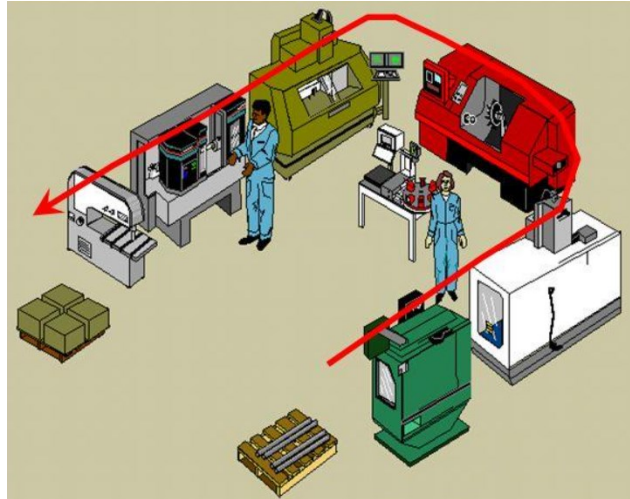


Figura 6 - Layout de Célula de Produção em "U"
(adaptado de AulaFacil, 2021)

A utilização deste sistema de fabrico possui algumas vantagens e desvantagens. A implementação deste sistema em célula numa empresa que tenha adotado a Filosofia Lean, permite alcançar os objetivos desta filosofia, devido ao facto de eliminar muitas atividades sem valor para o fluxo de produção, tais como os tempos de espera, os gargalos, o transporte e Work in Progress (Pattanaik and Sharma, 2009). Na Figura 7 são apresentados os prós e os contras da implementação de células de produção, onde o sinal mais representa os prós e o sinal menos os contras.

+	<ul style="list-style-type: none"> • Redução do tempo de Preparação • Redução do Work in Progress • Redução de movimentações e transporte • Redução do tempo de produção • Uma única máquina fabrica vários produtos • Processos de fabrico simples • Aumento da Produção • Maior Produtividade • Redução de inventários • Prazos de entrega mais curtos 	-
	<ul style="list-style-type: none"> • Reduz a flexibilidade da produção • Dificil equilíbrio das células • Grande mix de produtos para produzir poucas quantidades • Problemas na rotação de trabalho • Resistência dos trabalhadores a adotarem este sistema • Subestimar as necessidades de formação • Custo de implementação elevado • As peças agrupadas podem não ser encomendadas ao mesmo tempo 	

Figura 7 - Prós e Contras da implementação das Células de Produção
(adaptado de Canel et al., 2005; Houshyar et al., 2014; Weber, 2004)

2.3.7. Exemplos Práticos

As diversas ferramentas existentes na Filosofia Lean, são utilizadas no dia-a-dia em diversas áreas e com diferentes aplicações, como é apresentado na Tabela 1, onde estão apresentados os autores, o título, a ferramenta e o setor onde foram realizados os casos de estudo.

Tabela 1 – Exemplos Práticos de Ferramentas Lean em diversas áreas de aplicação

Autor	Título do Trabalho	Ferramenta	Aplicação
Danovaro et al., 2008	Jidoka in Software Development	<i>Jidoka</i>	Desenvolvimento de Software
Rahman et al., 2013	Lean Manufacturing Case Study with Kanban System Implementation	<i>Kanban</i>	Indústria
Astromskis et al., 2013	Andon for Dentists	<i>Andon</i>	Medicina Dentária
Consul, 2015	Aplicação de Poka-Yoke em processos de Caldeiraria	<i>Poka-Yoke</i>	Metalúrgica
Stadnicka and Ratnayake, 2016	Minimization of service disturbance: VSM based case study in telecommunication industry	VSM	Telecomunicações
Stadnicka and Ratnayake, 2017	Enhancing Aircraft Maintenance Services: a VSM Based Case Study	VSM	Aeronáutica
Pötters et al., 2018	Effectivity of quality methods used on the shop floor of a serial production— how important is Poka Yoke?	<i>Poka-Yoke</i>	Simulação
Erkayman, 2018	Transition to a JIT production system through ERP implementation: a case from the automotive industry	<i>Just-in-Time</i>	Indústria Automóvel
Deshkar et al., 2018	Design and evaluation of a Lean Manufacturing framework using Value Stream Mapping (VSM) for a plastic bag manufacturing unit	VSM	Indústria de Plásticos
Sharma and Singla, 2019	The Effects of Implementation of Kanban System on Productivity: A Case Study of Auto Parts Company	<i>Kanban</i>	Indústria Automóvel
Mohamad et al., 2019	Framework of Andon Support System in Lean Cyber-Physical System Production Environment	<i>Andon</i>	Simulação
Bălan and Janlă, 2019	Solving Quality Problems with the Poka-Yoke Tool Assistance. Case Study	<i>Poka-Yoke</i>	Indústria Automóvel
Tekin et al., 2019	An Application of SMED and Jidoka in Lean Production	<i>Jidoka</i>	Indústria Alimentar

Triana and Beatrix, 2019	Production System Improvement Through Kanban Application in Labor Intensive Company	<i>Kanban</i>	Indústria do Calçado
Wijaya et al., 2020	Design and implementation of poka-yoke system in stationary spot-welding production line utilizing internet-of-things platform	<i>Poka-Yoke</i>	Metalúrgica
Suárez-Barraza, 2020	Implementación del kaizen-innovación de procesos-jidoka para hacer frente a la Covid-19: un caso de estudio en un hospital público	<i>Jidoka</i>	Saúde
Kundgol et al., 2020	Implementation of value stream mapping (VSM) upgrading process and productivity in aerospace manufacturing industry	VSM	Indústria Aeroespacial
Simić et al., 2021	Modelling material flow using the Milk Run and Kanban systems in the automotive industry	<i>Kanban</i>	Indústria Automóvel

Na Tabela 1 são evidenciados alguns casos de estudo realizados por diversos autores sobre a implementação de ferramentas *Lean*. Danovaro, Janes and Succi (2008), implementaram o *Jidoka* na produção de software, criando um software que permite ao programador detetar problemas automaticamente nas linhas de código e parar o desenvolvimento de um programa no momento, caso exista algo que viole as regras definidas para o desenvolvimento do programa requerido pelo cliente. Estes autores, demonstraram que é possível incorporar a qualidade nos processos, agregando valor ao produto final.

O estudo realizado por Rahman (2013), demonstra a implementação da ferramenta *Lean*, *Kanban*, com o objetivo de determinar a função eficaz desta ferramenta em empresas multinacionais Malaias e por conseguinte identificar os fatores que levava a que as pequenas e médias empresas (PME), nesse país, não conseguissem implementar o sistema *Kanban*. Com os resultados deste caso de estudo concluiu-se que os fatores influenciadores da ineficácia desta ferramenta nas PME devem-se ao facto de estas possuírem uma gestão ineficaz de *stocks*, falta de participação dos fornecedores, carência de melhorias de controlo e qualidade e falta do envolvimento dos trabalhadores e gestão de topo.

Ainda em 2013, o estudo publicado por Astromskis et al. (2013) permitiu demonstrar que na área da saúde as ferramentas *Lean* (*Lean Healthcare*) também são utilizadas. Neste

caso de estudo, os autores demonstram a implementação de um sistema *Andon* numa clínica dentária. O sistema permitiu que os dentistas e os assistentes fossem capazes de visualizar em cada consultório o estado do tratamento e compreender se os consultórios e a sala de exames estava a ser utilizada ou se estava disponível, através do sistema de cores.

O trabalho realizado por Consul (2015) na indústria metalúrgica permitiu provar como a ferramenta *Poka-Yoke* é eficiente para impedir a ocorrência de erros e de defeitos no processo de fabrico de peças metalúrgicas. Os resultados desta investigação mostraram que a qualidade das peças melhorou significativamente com a utilização desta ferramenta.

Stadnicka e Ratnayake (2017, 2016), realizaram dois casos de estudo sobre o *Value Stream Mapping* na indústria aeronáutica e no setor das telecomunicações. O primeiro caso, referente a 2016, serviu para melhorar o desempenho dos serviços prestados aos clientes de uma empresa de serviços telefónicos. Como resultados, obtiveram a redução em 50% do *Lead Time* do serviço, o que levou a um aumento da quantidade de serviços fornecidos. Já em 2017, as mesmas autoras, aplicaram a mesma ferramenta no setor aeronáutico para reduzir o tempo de espera dos serviços de manutenção prestados por uma empresa, que realizava trabalhos de manutenção de aeronaves e consequentemente minimizar os custos de manutenção.

Com o trabalho de Potters (2018), a ferramenta *Poka-Yoke* (assim como o *Kanban* e os *5S*) foi utilizada para uma simulação, que teve como objetivo testar antes de implementar no chão de fábrica, as ferramentas *Lean*. Neste caso, o estudo foi realizado numa empresa de fabricação de brinquedos, onde o produto final era a montagem de várias peças de um camião. Os resultados demonstraram que o *Poka-Yoke* foi a ferramenta que obteve os melhores efeitos em relação ao cumprimento de datas de entrega e tempos de montagem.

Através de um sistema ERP (*Enterprise Resource Planning*), uma empresa da indústria automóvel na Alemanha, aplicou a ferramenta *Just-in-Time*, na sua produção, o que permitiu que se produzisse apenas por encomenda, através do site da empresa, sendo cada pedido de encomenda exportado para o sistema ERP e que a gestão de stocks nos armazéns começasse a ser gerida de acordo com as necessidades de produção. Esta implementação de uma produção baseada no *Just-in-Time*, permitiu à empresa em questão que acabasse por eliminar o armazém de matéria-prima, reduzindo significativamente os custos de armazenamento (Erkayman, 2018).

Na indústria de plásticos, o *Value Stream Mapping* também foi utilizado para identificar os desperdícios e os gargalos na linha de produção de sacos de plástico e por conseguinte obter soluções para eliminar os desperdícios encontrados. As conclusões retiradas deste estudo permitiram que a empresa reduzisse o seu *Takt time* para quase metade do valor inicial com a aplicação desta ferramenta, assim como o aumento da produção de rolos de sacos plástico (Deshkar et al., 2018).

Sharma e Singla (2019), apresentaram um trabalho onde foi possível através da implementação da ferramenta *Kanban*, numa empresa de fabricação de peças para automóveis, reduzir significativamente a produção de uma quantidade excessiva de peças, que por sua vez reduziu a quantidade de peças em *stock* para um nível de *stock* de segurança. O tempo de espera do processo também foi minimizado.

Em comparação com o trabalho desenvolvido em 2013 por Astromskis (2013), Mohamad et al. (2019) através de um *software* aplicaram a ferramenta *Andon* em conjunto com os sistemas ciber-físicos, para solucionarem mais rapidamente e eficazmente os problemas nas linhas de produção. O *software* comunicava à equipa de produção, a quantidade de funcionários envolvidos, o tempo de paragem da produção, assim como a qualidade do produto, com base na hierarquização da gravidade do problema reportado pelo sistema *Andon*.

No trabalho desenvolvido por Balan (2019), a ferramenta *Poka-Yoke* foi utilizada para solucionar problemas relacionados com a qualidade numa empresa da indústria automóvel. O estudo foi realizado tendo como alvo um produto composto por diversas peças, e que no seu processo de montagem ocorriam defeitos o que levou à implementação da ferramenta *Poka-Yoke*, resultando na diminuição dos defeitos e na redução do tempo de montagem, assim como na melhoria das atividades dos trabalhadores.

Em 2019, um estudo publicado por Tekin et al. (2019), implementa a ferramenta *Jidoka* numa fábrica de produção de farinha, na Turquia. Esta ferramenta é utilizada numa válvula, por onde passa a farinha. Sempre que ocorre o entupimento dessa válvula a produção é automaticamente interrompida, de modo a evitar uma produção com defeitos e a reduzir os desperdícios.

A grande quantidade de *stock* numa empresa de calçado levava a que as entregas aos clientes fossem cada vez menores, tendo o problema sido solucionado através da aplicação do *Kanban*, no trabalho desenvolvido por Triana e Beatrix (2019). Os resultados deste trabalho comprovam que a implementação de um sistema *Kanban* permite atingir uma produção diária específica, sem produzir para *stock*.

Outro caso de estudo relacionado com a ferramenta *Poka-Yoke*, é abordado por Wijaya (2020), em que esta ferramenta é aplicada a uma linha de produção de soldadura por pontos. A reclamação dos clientes aumentou em 2018 para um número inaceitável, devido aos defeitos identificados no produto final e pelo facto de a data de entrega sofrer atrasos resultantes da correção de tais defeitos. Esta situação conduziu à implementação de um sistema *Poka-Yoke* para reduzir os defeitos e consequentemente satisfazer as expectativas dos clientes. Os resultados deste caso de estudo evidenciaram que as reclamações feitas pelos clientes reduziram significativamente no ano seguinte, concluindo-se que esta ferramenta poderia ser uma mais-valia se alargada a outras partes da linha de produção da empresa.

De acordo com um estudo publicado por Barraza (2020), no México, um hospital implementou dois sistemas automatizados de baixo custo baseado na ferramenta *Jidoka* nas urgências. A primeira ideia surgiu por uma equipa de médicos e enfermeiros que criaram um “botão de emergência”, que sempre que um paciente fosse admitido nas urgências, o rececionista acionava o botão que emite a informação para os médicos e enfermeiros disponíveis se deslocarem à sala de urgências. O segundo sistema, foi criado por um trabalhador pertencente ao hospital, no decorrer da pandemia que surgiu em 2019, devido ao vírus Sars Cov-2. O trabalhador instalou um sensor nos ventiladores dos pacientes infetados com este vírus e sempre que esse sensor detetasse parâmetros anormais no ventilador, acendia-se uma luz vermelha que emitia um sinal sonoro nas viseiras de proteção dos médicos e enfermeiros de plantão, que rapidamente se dirigiam ao paciente.

O *Value Stream Mapping* é uma ferramenta que é utilizada em diversas áreas. O estudo realizado por Kundgol (2020), tinha como objetivo a identificação de procedimentos que não agregassem valor no processo de produção no setor da indústria aeroespacial. As conclusões retiradas deste estudo comprovaram que a utilização desta ferramenta conseguiu reduzir tempos de produção, tempos de paragem e de excesso de movimentos.

Conforme comprovado por Simic (2021), a utilização do sistema *Kanban* em conjunto com um sistema *Milk Run* (sistema que otimiza os transportes de materiais, economizando os custos de transporte), por meio de um algoritmo, numa empresa da indústria automóvel, permitiu calcular o número ótimo de contentores com materiais e o número ótimo de movimentações, desde o armazém de matéria-prima até ao chão de fábrica. Este estudo fez com que se minimizasse a capacidade total disponível no armazém, minimizando a quantidade em *stock*, a quantidade de peças transportadas para o chão de fábrica e a minimização da quantidade dessas peças no chão de fábrica.

3. Indústria 4.0

Neste capítulo serão abordadas as quatro revoluções industriais até ao momento, de seguida é apresentada a definição de Indústria 4.0 e as suas tecnologias chave. Por último, apresenta-se uma análise sobre a integração da Indústria 4.0 com a Filosofia Lean.

3.1. Evolução Histórica

O crescimento da indústria tem durado várias centenas de anos, devendo-se às revoluções industriais que foram ocorrendo, sendo estas consideradas como as transições dos processos de fabrico que mudaram essencialmente a economia e a sociedade. Em 2011 surgiu, a última revolução, denominada Indústria 4.0 pela Alemanha (Bloem et al., 2014; Vogel-Heuser and Hess, 2016). Desde a invenção do primeiro tear mecânico, em 1784, desencadearam-se até então, quatro períodos designados por Revoluções Industriais, marcados por mudanças fundamentais na forma como se produzia (Bloem et al., 2014). A Figura 8, ilustra as quatro revoluções que ocorreram e as respetivas mudanças que marcaram essas mesmas revoluções.

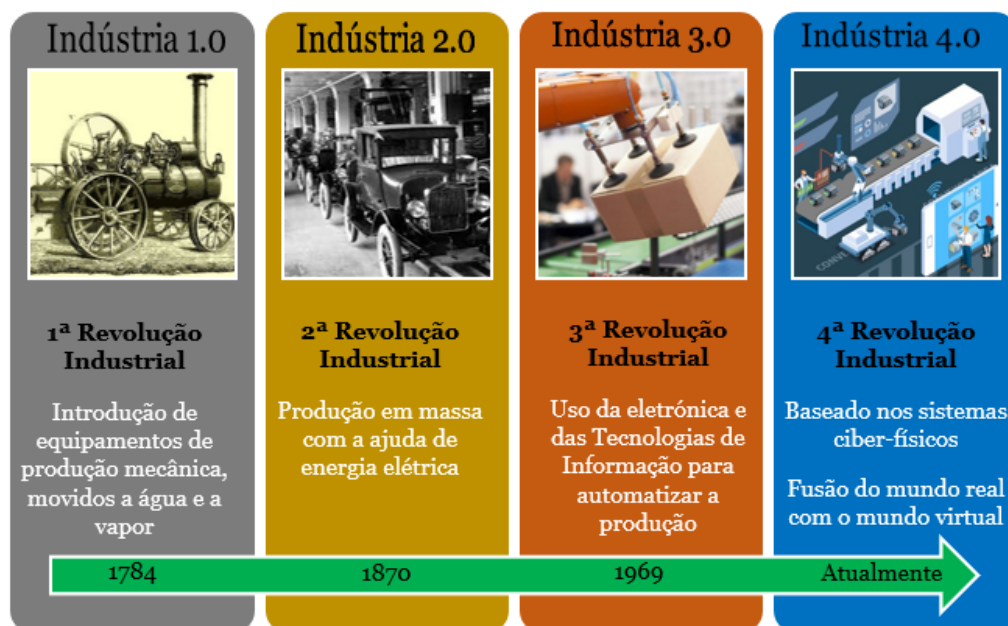


Figura 8 - As quatro Revoluções Industriais (adaptado de Deloitte, 2015)

A Primeira Revolução Industrial iniciou-se no século XVII com a invenção do primeiro tear mecânico movido a água e vapor, que substituiu os teares movidos pela força humana. Foi neste século que ocorreu a mudança da engenharia manual para a utilização

de equipamentos com motores de turbina, em que a água era a fonte de energia. Com a criação destas máquinas, as pequenas empresas industriais aumentaram a sua eficiência e o seu volume de fabrico o que levou a um aumento da carteira de clientes. As indústrias têxteis foram as que mais cresceram e beneficiaram desta revolução (Sharma and Singh, 2020).

No século XIX, surgiu a Segunda Revolução Industrial, que se iniciou com a invenção da produção de eletricidade, em conjunto com técnicas de produção em massa que gradualmente deu origem a linhas de montagem e à eletrificação das fábricas, contribuindo para a qualidade de fabrico. Como referido no capítulo anterior, Taylor, com os estudos do tempo e do movimento e assim como Ford contribuíram para que ocorresse esta revolução na indústria naquela época. Os avanços na forma de produzir para além de terem tido uma grande influência na indústria automóvel, também foram significativos na indústria metalomecânica e na indústria química. Durante aquele período a situação económica teve altos e baixos, devido às duas guerras mundiais que ocorreram. Devido a este facto, a concorrência aumentou e contribuiu para a globalização e para o crescimento da industrialização em outros países (Sharma and Singh, 2020; Xu et al., 2016; Zonnenshain and Kenett, 2020).

A Terceira Revolução Industrial começou no final de 1969 e foi caracterizada pela ascensão dos computadores e pela produção automatizada baseada na eletrónica e nas tecnologias de informação. Ao longo da segunda metade do século XX, através da introdução da eletrónica e das tecnologias de informação, a produção tornou-se mais automatizada, permitindo às empresas a reprogramação dos equipamentos de fabrico e a reorganização de processos para executar diferentes tarefas em curtos espaços de tempo (Lu, 2017; Xu et al., 2016). Neste período foram ainda desenvolvidos vários *softwares*, através da junção entre a eletrónica e as tecnologias de informação, que simplificaram uma série de operações que tradicionalmente eram realizadas manualmente. Alguns *softwares* são hoje muito utilizados como é o caso do Desenho Assistido por Computador (CAD) e da Manufatura Assistida por Computador (CAM). Com a crise petrolífera de 1973, a procura a diminuir e a inflação a aumentar, as empresas tiveram de se tornar mais competitivas através da diminuição de custos e do aumento das vendas. É nesta altura que ocorre a transformação digital das tecnologias de informação e das aplicações da eletrónica, dando origem à Terceira Revolução Industrial, com a criação de diversos equipamentos eletrónicos, incluindo transístores e circuitos integrados, que melhoravam significativamente as máquinas, originando um menor esforço e maior velocidade, eficácia e eficiência. E em certas situações a substituição da

ação humana, com a introdução de *robots* na linha de produção. A partir desta altura a produção passa a ser robótica e automatizadas (Sharma and Singh, 2020; Zonnenshain and Kenett, 2020).

Embora as revoluções industriais, anteriormente referidas, fossem desencadeadas por invenções/ inovações mecânicas, elétricas e digitais, a Quarta Revolução Industrial, ou como é conhecida, Indústria 4.0, foi originada pela facilidade de comunicação, , entre máquinas e seres humanos através de sistemas ciber-físicos (CPS), com ajuda da Internet (Brettel et al., 2014). De acordo com Bau and Wee (2015), a Indústria 4.0 é impulsionada por quatro fatores:

1. Aumento do volume de dados, poder computacional e conectividade;
2. Necessidade de análises avançadas;
3. Interação Homem-Máquina;
4. Troca de dados entre o mundo virtual e físico.

A Indústria 4.0, pode então ser caracterizada pelo número elevado de dados de sensores e dispositivos, que provêm da “Internet of Things” (IoT) e pela introdução dos Sistemas Ciber-Físicos (CPS), que ligam o mundo virtual ao físico (Zonnenshain and Kenett, 2020).

3.2. Conceito de Indústria 4.0

Nos últimos anos, e ao longo das três revoluções industriais anteriores, as empresas fornecedoras de bens e serviços melhoraram a qualidade das organizações através da introdução de tecnologias cada vez mais inovadoras. Este acontecimento deve-se ao facto de a indústria estar a sofrer uma transformação e evolução no sentido de uma digitalização integral e de uma automatização nos processos de produção para garantir uma elevada eficiência (Erol et al., 2016). A implementação de novas tecnologias é essencial, para se poder atingir os objetivos da digitalização e da automatização dos processos na indústria. Com o desenvolvimento destas novas tecnologias cada vez mais sofisticadas, surgiu a Quarta Revolução Industrial, vulgarmente conhecida como Indústria 4.0 (Petrillo et al., 2018).

O conceito de Indústria 4.0, surgiu na Alemanha, em 2011, numa feira, na cidade de Hannover, através de um conjunto de políticos, empresas e académicos, como uma nova estratégia para a indústria transformadora Alemã. A partir deste momento, diversas empresas e organizações de investigação industrial publicaram trabalhos sobre este tema (Di Nardo et al., 2020; Qin et al., 2016). Segundo o Instituto de Avaliação Tecnológica

(ITA) (2015), sediado na Áustria, o conceito de Indústria 4.0 é definido como uma mudança sistémica que provoca mudanças profundas na forma como os trabalhos são feitos, evidenciando que não se trata da introdução de novas tecnologias adaptadas aos sistemas de fabrico, como aconteceu nas revoluções anteriores, mas sim, de um conjunto de novas tecnologias e aplicações, com vários graus de complexidade técnica e efeitos sistémicos.

Este conceito foi definido por diversos autores e por vezes os significados tornam-se ambíguos, não existindo nenhuma definição única adotada convencionalmente (Bongomin et al., 2020). Schroeder (2015), define Indústria 4.0 como a transformação digital em todas as áreas dos processos industriais e de produção, enquanto Kamble (2018), refere-se a este conceito como uma revolução no fabrico que traz uma nova perspetiva à indústria sobre como a produção pode ser integrada com as novas tecnologias para obter o máximo rendimento com a mínima utilização de recursos.

Segundo Di Nardo (2020), a Indústria 4.0 é um novo conceito de fabrico que envolve a automação industrial e integra novas tecnologias de produção com o objetivo de melhorar as condições de trabalho e aumentar a produtividade e qualidade. De acordo com a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO) (2018), a Indústria 4.0 é caracterizada como uma Indústria que inclui conceitos, ferramentas e aplicações que complementam um sistema inteligente de máquinas capazes de comunicar entre si e com as pessoas, e executar tarefas autónomas nos processos de produção industrial.

A transformação digital que atualmente ocorre na Indústria 4.0, baseia-se na implementação e integração de uma variedade de Tecnologias de Informação Digitais e de Operação (IDOT) simples e complexas, tais como os sensores industriais, os controladores industriais, as tecnologias RFID (Radio Frequency Identification), a segurança cibernética, os Veículos Guiados Automaticamente (AGV), os robots, as Realidades Aumentada (AR) e Virtual (VR), a recolha e análise de grandes quantidades de dados (*Big Data*), Computação na Nuvem (*Cloud Computing*) e Inteligência Artificial (AI) e de sistemas tecnológicos avançados como os Sistemas Ciber-Físicos (CPS) e a *Internet of Things* (IOT). Estes últimos, dependem, da implementação e integração de várias combinações de IDOT (Ghobakhloo, 2020; Ustundag and Cevikcan, 2018). Todas estas tecnologias serão detalhadas e explicadas no subcapítulo seguinte.

Para que se possa prever o progresso da adaptação e fornecer conhecimentos e informação de “como fazer” no desenvolvimento de procedimentos e soluções adequadas à implementação da Indústria 4.0, os investigadores definiram princípios de conceção

denominados como (Ghobakhloo, 2020; Shafiq et al., 2015; Ustundag and Cevikcan, 2018):

- Interoperabilidade – Capacidade de comunicação e interação entre as pessoas, os equipamentos e as fábricas inteligentes;
- Virtualização – Cópia virtual de objetos físicos;
- Descentralização – Capacidade de os equipamentos tomarem decisões sozinhas;
- Gestão de dados em tempo real – Capacidade de recolher e analisar dados em tempo real;
- Orientação de Serviço – Os serviços das empresas, os sistemas ciber-físicos e as pessoas estão interligadas pela *Internet of Things* (IoT);
- Modularização – Adaptação flexível das fábricas inteligentes, através da substituição ou expansão de módulos de produção.

A UNIDO (Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial) (2018), afirmou que a implementação dos princípios de conceção ajudará as empresas e as pessoas a adaptarem-se à Indústria 4.0 e que esta indústria se centra em quatro características:

- Integração Horizontal – refere-se à integração de informações entre todos os processos e agentes da cadeia de valor;
- Integração Vertical – permite que todos os níveis hierárquicos da empresa estejam ligados entre si;
- Integração digital da engenharia em toda a cadeia de valor – refere-se à ligação entre o ciclo de vida de um produto e a cadeia de valor e aos *softwares* industriais que permitem evitar defeitos no produto;
- Integração Humana – desenvolvimento de novas competências para permitir a adaptação do ser humano ao ambiente e às condições de trabalho em mudança (Interação Homem-Máquina).

De acordo com Thames and Schaefer (2016) os objetivos da Indústria 4.0 são atingir um nível mais elevado de eficiência operacional e de produtividade, bem como um nível mais elevado de tomadas de decisão. Roblek (2016) e Posada et al. (2015), destacam seis os aspetos chave da Indústria 4.0:

1. As tecnologias de informação permitem a personalização de produtos em massa, adaptando-se a produções de lotes pequenos;
2. Adaptação automática e flexível da produção às novas exigências;

3. Consciencialização e monitorização de produtos e peças e a sua comunicação com as máquinas e outros produtos;
4. Melhorar a interação Homem-Máquina, incluindo a coexistência de robots ou novas formas de interagir e operar nas fábricas;
5. Otimização da produção via *Internet of Things* (IoT) em fábricas inteligentes;
6. Mudança das Interações na cadeia de valor através de novos modelos radicais de negócio e serviços.

3.3. Tecnologias

A Indústria 4.0 é sustentada por tecnologias disruptivas que têm vindo a aumentar exponencialmente, levando a mudanças repentinas no mercado, mas com um crescimento não linear (Deloitte, 2018). As tecnologias disruptivas caracterizam-se pela sua inovação e pelo potencial que têm em causar uma transformação social mais vasta, ou seja, transformar os setores económicos existentes, a produção e o consumo (Bongomin et al., 2020). De acordo com Mashelkar (2018), esta tecnologia, faz com que as empresas procurem cada vez mais mão-de-obra com mais conhecimento, competências e experiência. Nos subcapítulos seguintes são apresentadas as tecnologias chave que estão na base do crescimento da Indústria 4.0.

3.3.1. Cyber Phisycal Systems (CPS)

Segundo Bongomin (2020) e Pagliosa (2019), os *Cyber Physical Systems*, ou em português, Sistemas Ciber-Físicos, são sistemas em rede, nos quais a parte computacional (Ciber), através da utilização de tecnologias avançadas como sistemas informáticos, de comunicação e controlo está fortemente interligada com sistemas físicos (Objetos, Humanos e Máquinas). Ustundag (2018), refere que um Sistema Ciber-Físico possui duas condições fundamentais para estes sistemas funcionem, que são:

- O nível avançado de ligação em rede;
- O processamento inteligente de dados.

O primeiro requisito possibilita um melhor fornecimento de processamentos de dados dos sistemas físicos, como dos *feedbacks* de informação da estrutura digital. O último requisito é essencial para que os sistemas físicos recebam as tomadas de decisão por parte da estrutura digital. Para que estas condições sejam satisfeitas, as tecnologias como *Real Time Locating System* (RTLS)), *Radio Frequency Identification* (RFID), sensores, atuadores e controladores, são integradas nos sistemas Ciber-Físicos para recolherem dados e informações dos sistemas físicos para os sistemas computacionais, e serem transformados e posteriormente transferidos.

Ao integrar os Sistemas Ciber-Físicos na produção, logística e em serviços, nas práticas industriais atuais, as empresas transformar-se-ão em fábricas inteligentes, com um potencial económico significativo (Lee et al., 2015). Ghobakhloo (2018), afirma que numa fábrica inteligente, as linhas de produção são consideradas sistemas ciber-físicos em que as máquinas, operadores e materiais podem comunicar entre si e monitorizar a informação do processo ou enviar essa mesma informação para serem efetuados cálculos, análises e tomadas de decisão que serão fornecidas de novo às máquinas e operadores.

3.3.2. Internet of Things (IoT)

A comunicação e o trabalho em rede entre as máquinas, os operadores e objetos nos Sistemas Ciber-Físicos, descritos no subcapítulo anterior, podem ser descritos como uma ligação entre sistemas físicos e distribuídos que são definidos individualmente. Utilizando ferramentas e dispositivos de comunicação, as máquinas podem interagir para atingir determinados objetivos, concentrando-se na incorporação de sensores inteligentes em ambientes e processos do mundo real. A rede que interliga estes sistemas é denominada *Internet of Things* (Ustundag and Cevikcan, 2018).

A *Internet of Things* (IoT) pode ser definida como a combinação de máquinas inteligentes e autónomas, análises preditivas avançadas e a cooperação Homem-Máquina para melhorar a produtividade. O Interreg da Região do Mar do Norte (2018), salienta que a IoT não é apenas a comunicação máquina para máquina, mas uma rede inteligente e invisível que pode ser detetada, controlada e programada através da qual os sistemas físicos se tornam inteligentes e comunicam de forma independente, *online*. De acordo com Pagliosa (2019), a IoT, permite a interatividade entre os sistemas físicos para troca de dados e de informação. Esta tecnologia baseia-se na filosofia de que as máquinas inteligentes superam os seres humanos na recolha e comunicação de dados de forma precisa e consistente (Ghobakhloo, 2018). As 'coisas' podem ser sensores actuadores, outros dispositivos digitais, ou quaisquer outros objetos (por exemplo, pessoas e edifícios) (Dadios et al., 2018).

Esta tecnologia tem a capacidade de detetar/atuar e capacidade de fornecer rapidamente dados e informações, em tempo real, proporcionando melhores conhecimentos para detetar a causa raiz dos problemas na produção, descobrir os defeitos, monitorizar o desempenho das máquinas e reduzir a falha e o tempo de paragem das mesmas. Como resultado da integração da inteligência na produção, as empresas podem ser capazes de

melhorar a qualidade e aumentar a produção (Kamble et al., 2018; Ustundag and Cevikcan, 2018). Assim, a IoT é considerada não só como uma tecnologia da Indústria 4.0, mas também como uma tecnologia que contém muitas características das outras Tecnologias da Indústria 4.0 (Vermesan et al., 2014).

3.3.3. Big Data

A vasta utilização de sensores e sistemas de controlo na indústria resulta na geração de uma enorme quantidade de dados, para as empresas e para quem lida diariamente com esses sistemas (Pagliosa et al., 2019). Os *Big Data* são um grande volume de dados, que uma nova geração de tecnologias permite às organizações extrair valor desses dados através da sua recolha e análise. Essa análise permite às organizações retirar valor a partir das enormes quantidades de informação que já possuem, e identificar as tendências e as ações que devem ser tomadas para alcançar melhores resultados (Ghobakhloo, 2018).

Segundo Dadios et. al. e Gilchrist (2018; 2016), embora não haja um consenso universal sobre o significado de *Big Data*, alguns autores referem-se a esta tecnologia como conjuntos de dados digitais que possuem seis características principais:

- Volume – Quanto maior volume de dados mais confiança se tem nas previsões;
- Variedade – Diz respeito à quantidade de fontes de onde proveem os dados;
- Velocidade - Refere-se à rapidez com que os dados entram no sistema e à rapidez da análise;
- Veracidade – Refere-se aos dados que são recolhidos e que poderão ser transformados em informações falsas;
- Valor – Saber selecionar os dados que acrescentar valor para o negócio, porque é fundamental saber o que se procura;
- Complexidade – Refere-se à facilidade de compreensão dos dados pelo ser humano.

3.3.4. Simulação

A simulação é um método comum para analisar o comportamento de sistemas complexos. A simulação é uma tecnologia clássica da antiguidade que remonta à era dos computadores analógicos (Klee and Allen, 2018). No entanto, a sua aplicação tem proliferado em diferentes campos devido à sua capacidade demonstrada de melhorar os sistemas de produção com os testes e otimizações de produtos e desenvolvimento e otimização de processos de produção (Bongomin et al., 2020). Antes da aplicação de um novo padrão, o sistema deve ser testado e os resultados devem ser cuidadosamente

analisados. Assim, as simulações podem ser realizadas para melhorar o planeamento do produto ou do processo (Ustundag and Cevikcan, 2018).

As simulações permitirão utilizar dados em tempo real para espelhar o mundo físico num mundo virtual, que pode incluir máquinas, produtos, e seres humanos. Isto permitirá que as empresas e os seus operadores testem e otimizem as configurações de uma máquina para um novo produto, no mundo virtual antes de passarem para o mundo real, podendo assim levar a tempos de configuração da máquina mais baixos e aumentar a qualidade (Bahrin et al., 2016).

A simulação não só permite às empresas evitarem erros numa fase inicial, que de outra forma poderiam resultar em falhas e conseqüentemente custos avultados, mas também ser utilizada para otimizar uma unidade de produção durante o trabalho diário (Ghobakhloo, 2018).

3.3.5. Manufatura aditiva/Impressão 3D

As técnicas de maquinação tais como corte, perfuração, retificação e polimento utilizado nos processos de fabrico tradicionais são definidas como manufatura subtrativa, em que a produção de peças e componentes assenta na remoção de material. Estas peças e componentes são depois montadas originando os produtos finais. A manufatura aditiva ou impressão 3D depende da produção aditiva, que irá constituir os produtos finais através da construção de camadas sucessivas de materiais, evitando assim a necessidade do processo de montagem de componentes para obter o produto final (Kamble et al., 2018).

Em detalhe, a Impressão 3D é iniciada através da criação do desenho assistido por computador (CAD), que irá organizar um conjunto de características digitais do produto e submeter as descrições dos produtos, às máquinas industriais de impressão. As impressoras executam as descrições transmitidas como projetos para formar o produto, adicionando por camadas os materiais. As camadas, medidas em micron, são adicionadas por inúmeras vezes até surgir um objeto tridimensional (Gaub, 2016). Os materiais mais utilizados pelas impressoras 3D são os polímeros, os materiais plásticos e os materiais metálicos. Atualmente, a impressão 3D tem sido aplicada para produzir quase tudo, desde edifícios a órgãos humanos (Bongomin et al., 2020).

A Impressão 3D ou manufatura aditiva terá uma contribuição significativa para a Indústria 4.0, uma vez que ajudará as organizações a desenvolver e a criar produtos, que

poderão ser produzidos em pequenos lotes de produtos, personalizáveis, oferecendo vantagens na produção de produtos complexos e leves. Além disso, podem ser produzidos em instalações descentralizadas, à distância em que o transporte deixará de ser um problema. Outra vantagem é que o mecanismo de impressão reduz o desperdício de material ao utilizar apenas os materiais necessários. No entanto, a impressão 3D enfrenta desafios técnicos devido à baixa precisão e à baixa produtividade (Chen and Lin, 2016; Di Nardo et al., 2020; Kamble et al., 2018; Ustundag and Cevikcan, 2018).

3.3.6. Cloud Computing

A *Cloud Computing* é um modelo no qual os serviços de computação estão disponíveis remotamente e permitem aos utilizadores aceder, através de uma rede partilhada, a recursos informáticos configuráveis tais como servidores, armazenamento, aplicações e serviços. A *Cloud Computing* tem sido utilizada em sectores, tais como os cuidados de saúde, a manufatura, os transportes e a energia (Bongomin et al., 2020; Thames and Schaefer, 2017). Os sistemas Ciber-Físicos geram um grande volume de dados e esta tecnologia, servirá para as empresas armazenarem esses dados que poderão ser acedidos a partir de qualquer lugar (Pagliosa et al., 2019). As tecnologias da *Cloud* podem ser amplamente utilizadas na Indústria 4.0 para aumentar a partilha de dados para lá da empresa, melhorar o desempenho dos sistemas, e reduzir os custos através da utilização de sistemas *online* (Kamble et al., 2018).

3.3.7. Robots Autónomos

Os Robots Autónomos são caracterizados como sistemas que oferecem autonomia, flexibilidade e cooperação. Prevê-se que os robôs irão começar a interagir uns com os outros e a trabalhar em segurança com os humanos e até aprender com eles (Bongomin et al., 2020). De acordo com Ustundag and Cevikcan (2018) as características gerais dos robots autónomos são:

- Ligação em rede via *Ethernet* ou *Wi-Fi* para transmissão de dados de alta velocidade;
- Fácil integração em sistemas de comunicação de máquinas existentes;
- Processamento ótico e de imagem do posicionamento das peças;
- Controlador de robot integrado;
- Mecanismo de aprendizagem baseado na memória ou em caso reais.

Para assegurar o funcionamento em segurança do robot e monitorizar o ambiente, é implementado um conceito de segurança ocular. Se alguma perturbação, tal como alguma pessoa ou equipamento, entrar no espaço virtual (olho de segurança), o sistema

interrompe o movimento do robot e emite um sinal sonoro (Bongomin et al., 2020). A principal consequência da introdução dos robots será a reestruturação do local de trabalho, uma vez que os robots irão oferecer melhorias ergonómicas. Haverá menos esforço físico para o trabalhador, porque todos os trabalhos monótonos e mais repetitivos serão realizados por máquinas. O planeamento será deixado a cargo do ser humano que controlará a produção (Di Nardo et al., 2020).

A automação e a robótica industrial estão claramente a aumentar, na indústria e cada vez mais no quotidiano. A robótica industrial e a automação garantem algumas vantagens, tais como a redução do tempo de produção, redução do tempo de espera entre operações, menor número de defeitos, maior qualidade e fiabilidade, menor desperdício e melhor utilização do espaço no chão de fábrica (Ghobakhloo, 2018).

3.3.8. Realidade Aumentada e Virtual

A realidade virtual (VR) e a realidade aumentada (AR) são tecnologias complementares da Indústria 4.0. Na realidade virtual, os utilizadores são transportados, geralmente através de estimulação visual e auditiva, para um mundo virtual, enquanto que na realidade aumentada, as aplicações apresentam uma ilusão de camadas de representação gráfica sobre superfícies do mundo real, no campo de visão do utilizador (Gattullo et al., 2019).

Na Indústria 4.0, graças ao crescente avanço da criação e desenvolvimento de *softwares* e *hardwares*, o trabalhador terá ajuda desta tecnologia para visualizar informações, a localização exata de um produto na empresa, digitalizar automaticamente um código de barras, diagnosticar falhas e repará-las, planear e monitorizar os processos em tempo real e na formação dos trabalhadores (Di Nardo et al., 2020; Ghobakhloo, 2018).

É importante compreender como a AR transformará o trabalho no chão de fábrica. Exemplificando, os trabalhadores receberão instruções de reparação sobre como substituir uma determinada peça, esta informação será exibida através de um dispositivo como os óculos de realidade aumentada, dispositivos portáteis, visores montados na cabeça ou lentes inteligentes, em que o trabalhador pode interferir diretamente com as representações visuais e interagir com estas (Di Nardo et al., 2020; Ustundag and Cevikcan, 2018). Quanto à VR, tem sido essencialmente utilizada para formação dos operadores, em ambiente de simulação para por exemplo testar novas tecnologias antes de aplicá-las no chão-de-fábrica (Bongomin et al., 2020).

3.3.9. Inteligência Artificial

A inteligência artificial (IA) é um campo da informática que visa imitar os processos de pensamento humano, a sua capacidade de raciocínio e de memória (Krittanawong et al., 2017). As aplicações resultantes da inteligência artificial que estão atualmente a moldar a Indústria 4.0 são a condução de carros por piloto automático, reconhecimento da fala e do rosto humano, interpretação de dados complexos e a integração em robots. O grande desafio é a integração desta tecnologia com outras tecnologias da Indústria 4.0, tais como *Big Data* e a *Cloud Computing* (Bongomin et al., 2020).

3.3.10. Sensores Inteligentes

Os sensores inteligentes têm vindo a ser desenvolvidos para suprir a necessidade da Indústria 4.0, com o objetivo de fornecer informação acerca dos equipamentos e dos produtos. Estes sensores são concebidos no fabrico de dispositivos ou objetos inteligentes, tais como, câmaras inteligentes e *smartphones*, e têm sido utilizados para fins de monitorização, como por exemplo, para monitorizar níveis de água e inundações, gás, sistemas de diagnóstico de falhas e defeitos em equipamentos e produtos respetivamente. Na Indústria 4.0, existem sensores inteligentes, tais como, os sensores de temperatura, os sensores de pressão, os sensores óticos, entre outros, que são integrados com o sistema IoT e transmitem informação (Bongomin et al., 2020; Chaudhari and Dharavath, 2014). As vantagens que os sensores inteligentes trazem para a Indústria 4.0 são (Bitkom e. V. et al., 2016):

- Monitorização em tempo real de todo o processo de produção;
- Recolha de dados e documentação contínua para realizar análises, novas aprendizagens e retirar conhecimento.

3.4. Integração do Lean com a Indústria 4.0

A integração das ferramentas da Filosofia Lean com as tecnologias da Indústria 4.0 é um tema importante para a investigação, que tem vindo a ser explorado e é denominado pelos investigadores, de *Lean Automation* (Sanders et al., 2016). Segundo afirma Kolberg Knobloch e Zuhkle (2017), a Filosofia Lean pode ser considerada como um complemento à tecnologia da Indústria 4.0, em que a sua integração permite obter estruturas descentralizadas e simples em vez de sistemas grandes e complexos.

Na Tabela 2, é apresentado um resumo de um estudo realizado por Pagliosa, Tortorella and Ferreira (2019), que consistiu em encontrar a relação entre as tecnologias da Indústria 4.0 e as práticas da *Lean Manufacturing*. Foram analisados trabalhos desenvolvidos sobre a *Lean Manufacturing* e a Indústria 4.0 a fim de estabelecer

relações e analisar a sinergia entre estas duas temáticas. Foram relacionadas nove tecnologias da Indústria 4.0 e 14 ferramentas da *Lean Manufacturing*, num total de 126 associações, baseados em três critérios apresentados a seguir:

- Frequência das citações das tecnologias da Indústria 4.0 e *Lean Manufacturing*;
- Aplicação das tecnologias da Indústria 4.0 e das ferramentas da *Lean Manufacturing* em diferentes níveis da cadeia de valor;
- Relevância das provas encontradas na literatura.

Através de um método idêntico ao FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*), com os trabalhos selecionados e com os critérios definidos, conseguiram construir uma matriz em que obtiveram diferentes valores nas associações das tecnologias da Indústria 4.0 e das ferramentas da *Lean Manufacturing*. Foi definido um intervalo de valores classificados como baixo grau de sinergia (B), Médio Grau de sinergia (M) e Alto grau de Sinergia (A), consoante o resultado da soma dos critérios definidos (Pagliosa et al., 2019). Na tabela 2 apenas são apresentadas as tecnologias abordadas no presente capítulo e as ferramentas abordadas no capítulo anterior.

Tabela 2 - Interação entre as Tecnologias da Indústria 4.0 e as Ferramentas da *Lean Manufacturing*
(adaptado de Pagliosa et al., 2019)

Tecnologias I4.0 Ferramentas LM	<i>Internet of Things</i>	<i>Cyber Physical Systems</i>	<i>Cloud Computing</i>	<i>Big Data</i>	Robots	Realidade Aumentada	Simulação	Impressão 3D
<i>Kanban</i>	A	A	A	A	B	M	M	M
<i>Value Stream Mapping</i>	A	A	A	A	M	M	A	M
<i>Poka-Yoke</i>	A	A	A	M	M	M	M	M
<i>Kaizen</i>	A	A	A	A	M	M	M	M
Produção <i>Pull</i>	A	A	M	M	B	M	M	M
<i>Andon</i>	M	M	A	M	B	B	B	B
<i>Jidoka</i>	M	M	M	M	M	M	B	B

Pela análise da tabela 2 a integração dos IoT, dos sistemas ciber-físicos, da *Cloud* e dos *Big Data* com as ferramentas da *Lean Manufacturing* como o *Kanban*, o *Value Stream Mapping* e o *Kaizen* revelam ter uma relação vantajosa entre a *Lean Manufacturing* e a Indústria 4.0. Como exemplo, a grande quantidade de informação que ferramentas como o *Value Stream Mapping* e o *Kanban* necessitam é uma mais-valia a integração da IoT para se conseguir transmitir a informação da *Cloud* através de sistemas ciber-físicos, que facilitariam nas tomadas de decisão. Os resultados de média e baixa sinergia entre as

tecnologias e as ferramentas, serão casos em que terá que se fazer algumas adaptações para que as integrações sejam vantajosas. Essas adaptações sofreriam de uma profunda análise das características tanto das ferramentas como das tecnologias (Pagliosa et al., 2019).

4. Learning Factories

Neste capítulo será abordado, primeiramente, o surgimento das *Learning Factories* e os seus conceitos fundamentais, incluindo as suas possíveis configurações e as vantagens da sua implementação. Por fim é apresentada a sua morfologia segundo o modelo de descrição multidimensional e a descrição geral de algumas *Learning Factories* espalhadas pelo mundo nas vertentes de educação, investigação e formação.

4.1. Contexto Histórico

A primeira forma de *Learning Factories* surgiu na Idade Média, com a produção de artesanato em oficinas, em que os artesões ensinavam aos alunos que queriam aprender esta arte (Neacsu et al., 2021). Durante a Primeira Guerra Mundial, em 1916, em Inglaterra, mais propriamente no Instituto de Loughborough, foi criada uma fábrica de instrução para formar trabalhadores não-qualificados, para produzirem materiais de guerra, sendo caracterizada pela organização e disciplina de uma fábrica real, em que o objetivo principal era a formação de trabalhadores (Gento et al., 2020). Nos primórdios dos anos 70, a Alemanha estabeleceu a aprendizagem em pequenos grupos de trabalho denominados por “Lernstatt”, palavra formada pelos termos *Learnen*, que significa aprender e por *Werkstatt* que significa fábrica (Neacsu et al., 2021).

Ainda na Alemanha, em Estugarda, mas nos finais de 1980, foi fundado no Instituto Fraunhofer de Engenharia Industrial, uma fábrica com uma abordagem virada para a indústria designada por *Lernfabrik*, que traduzido para inglês significa *Learning Factory*. Esta fábrica destinava-se a qualificar os trabalhadores industriais, relativamente à Produção Assistida por Computador, na qual eram abordados métodos de aprendizagem orientados para a aplicação em situações de trabalho complexas e específicas (Abele et al., 2019, 2017; Neacsu et al., 2021).

Nos Estados Unidos da América, em 1994, uma bolsa do programa de Reinvestimento Tecnológico em Educação em Engenharia da Produção, foi atribuída pela Fundação Nacional da Ciência (NSF) a uma Parceria de Educação em Engenharia da Produção (MEEP), constituída por 3 universidades (Universidade de Penn State, Universidade de Porto Rico-Mayaguez e Universidade de Washington), por 1 laboratório de engenharia (Sandia National Labs) e por 24 empresas industriais. Esta bolsa, liderada pela Universidade de Penn State, foi concedida para desenvolver uma *Learning Factory*, que envolveu 43 docentes que participaram na gestão do programa, na conceção de formações, no desenvolvimento da *Learning Factory* e na coordenação do Conselho

Industrial. Esta pareceria tinha como objetivos específicos a implementação de (Abele et al., 2019, 2015; Gento et al., 2020; Veza et al., 2015):

- Um currículo de engenharia baseado na prática – fazendo um equilíbrio entre a parte teórica com a realidade industrial, desenvolvendo competências profissionais;
- Learning Factories em todas as universidades parceiras – para experiências práticas para os alunos integrarem no currículo;
- Forte colaboração com a Indústria – através de projetos patrocinados pelas empresas;
- Disseminação – para outras instituições acadêmicas, governo e indústria.

A primeira fábrica a ser construída, através desta parceria, foi a Learning Factory Bernard M. Gordon, da Universidade de Penn State, em 1995. Esta fábrica possuía uma instalação de 2000 metros quadrados equipada por máquinas, materiais e ferramentas que era utilizada para apoiar projetos patrocinados pela indústria. A partir desta altura, o termo *Learning Factory* ficou marcado e tornou-se conhecido. Todas as *Learning Factories* que foram implementadas com o financiamento desta bolsa, baseavam-se em três princípios (Abele et al., 2019, 2015; Gento et al., 2020; Veza et al., 2015):

- Apenas ensinar não é suficiente;
- Os estudantes beneficiam de experiências práticas e interativas;
- A aprendizagem experimental baseada em equipas e envolvendo estudantes, professores e empresas, enriquece o processo educativo e proporciona vantagens a todos.

Nos anos 2000, o conceito de *Learning Factory* era aplicado na disciplina de ciências médicas e, especificamente, no paradigma de hospitais de ensino, onde as faculdades de medicina funcionavam em paralelo com os hospitais (Mavrikios et al., 2013).

Na Europa a partir desta altura, foram surgindo cada vez mais *Learning Factories*, com o objetivo de melhorar a experiência de aprendizagem em várias áreas de aplicação e de indústrias (Abele et al., 2019, 2017). Uma das primeiras neste continente, desta nova vaga, foi criada no Instituto de Gestão da Produção, Tecnologia e Máquinas-Ferramentas, na Universidade Técnica de Darmstadt, em 2007, denominada por Centro Aprendizagem de Processos para a Produtividade Industrial. Nesta fábrica são fabricados dois produtos reais, numa cadeia de valor completa desde a matéria-prima até aos produtos finais acabados serem enviados para os clientes. Os processos de

produção envolviam maquinação, montagem manual e semiautomática, assim como funções de logística e de garantia da qualidade (Abele et al., 2015).

Em 2011, na cidade de Darmstadt, na Alemanha, foi realizada a “1ª Conferência sobre Learning Factories”, onde foi criado, por um grupo de operadores das *Learning Factories* acadêmicas europeias, a Iniciativa sobre *Learning Factories* Europeias (IELF). Esta Iniciativa, ajudou a espalhar o conceito por todo o mundo e com que se iniciassem projetos de investigação conjuntos. Em 2014, foi iniciado um Grupo de Trabalho Colaborativo sobre *Learning Factories*, pelo Colégio Internacional de Investigação em Produtividade (CIRP) a fim de (Abele et al., 2019):

- Organizar a investigação relacionada sobre *Learning Factories* a nível mundial;
- Estabelecer uma compreensão conjunta dos termos relevantes em relação às *Learning Factories*;
- Reunir conhecimentos acerca da tecnologia de ponta a nível mundial nas *Learning Factories*;
- Reforçar a ligação entre a indústria e o mundo académico, acerca deste tema;
- Criar um documento em que constassem todos os fundamentos, estado da arte, assim como os desafios futuros e as questões de investigação sobre as *Learning Factories*.

Desde há alguns anos, na Alemanha as Universidades optaram por implementar *Learning Factories* como um elemento que combina a teoria e a prática, para o desenvolvimento das competências dos alunos, contando com mais de 50 *Learning Factories* no sistema educativo alemão. Para além desta ação do governo alemão, várias empresas por toda a Europa, estão a adotar este conceito para formar os seus trabalhadores ao longo dos níveis hierárquicos da empresa (Gento et al., 2020).

Na Figura 9 apresenta-se a cronologia da evolução histórica das *Learning Factories* e os marcos referidos neste subcapítulo, salientando-se a 7ª Conferência sobre *Learning Factories*, onde participaram 150 pessoas de 18 países diferentes em dois dias de conferência. Desde 2015 que estas conferências são patrocinadas pelo CIRP, o que lhes confere uma indicação da crescente importância das *Learning Factories* na investigação para a indústria (Abele et al., 2019).

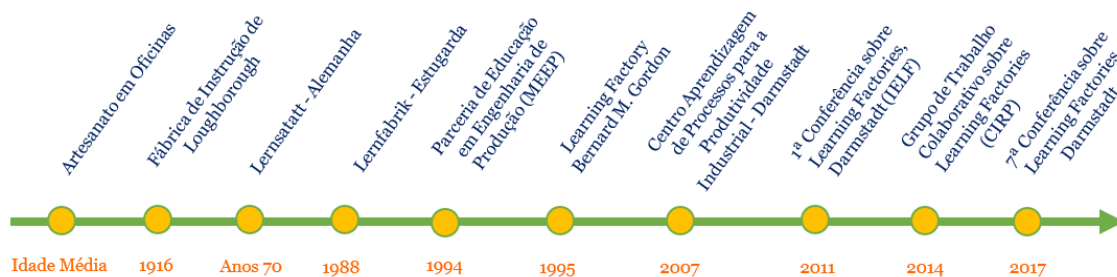


Figura 9 - Marcos importantes na evolução das Learning Factories.

4.2. Conceito de *Learning Factory*

Com as rápidas mudanças dos produtos e dos sistemas de produção, os estudantes necessitam de um ensino mais direcionado para a parte prática, que os familiarize com os métodos de produção existentes e futuros da indústria e os prepare para os problemas reais no mundo do trabalho. A velocidade da inovação tecnológica exige que exista um aumento da produtividade, da aprendizagem e do ensino que os alunos recebem (Abele et al., 2017; Matt et al., 2014). Nos últimos anos, as universidades têm tido a preocupação em conseguirem um equilíbrio entre a ciência e prática da engenharia (Lamancusa et al., 2008). Esta mudança, levou a que surgissem ou reaparecessem novas abordagens de ensino, direcionadas para uma aprendizagem mais ativa e experimental. Uma dessas novas abordagens podem ser conseguidas através da implementação de *Learning Factories*, onde uma verdadeira fábrica é levada até à sala de aula (Gento et al., 2020; Matt et al., 2014). Com o surgimento das primeiras *Learning Factories*, foram enunciadas várias definições implícitas e explícitas deste conceito, ainda que na maior parte estas definições se baseiem nas descrições de casos da criação de *Learning Factories* (Abele et al., 2017).

A primeira definição conhecida de uma *Learning Factory* foi introduzida por Jorgensen et. al. (1995), que a descreveu como uma instalação que apoia a produção de produtos e que pode ser utilizada para o ensino prático em engenharia. Barton and Delbridge (2001), definiram uma *Learning Factory* como sendo uma fábrica que consegue agregar o conhecimento interno e externo, a resolução de problemas, a experimentação e a inovação na rotina diária de trabalho, incluindo o trabalho em equipa e o envolvimento entre todos os trabalhadores e a formação. Abele et al. (2010), baseando a sua definição nos mesmos pressupostos de Jorgensen, salientaram a necessidade de uma proximidade à realidade numa simulação. Para Tisch et. al. (2013), as *Learning Factories* seguem uma abordagem direcionada para a ação, em que os envolventes adquirem competências através de processos estruturados num ambiente de produção-aprendizagem, virados para os problemas reais da indústria.

Em 2013, os membros da Iniciativa sobre Fábricas de Aprendizagem Europeias (IELF) chegaram a acordo sobre a definição de *Learning Factories* caracterizando-a como sendo uma instalação onde se vive um ambiente didático e experimental, na qual os processos e tecnologias se baseiam em problemas reais da indústria, com o comprometimento interativo dos participantes (melhoria contínua) (Abele et al., 2019).

Gento et. al. (2020), resume a definição de *Learning Factories* como ambientes de fábrica simulados que são utilizadas para fins educativos, de formação e ou/investigação, com a possibilidade de representar um sistema realista de uma fábrica com os seus processos, recursos necessários para a produção de um produto num ambiente de aprendizagem voltado para a experimentação, participação e digitalização.

Em 2014, o Grupo de Trabalho Colaborativo sobre Learning Factories, do CIRP, depois da análise de algumas definições, referidas acima, formularam uma definição mais abrangente e que acabou por ser publicada na Enciclopédia do CIRP, dividindo-a em dois sentidos, como ilustrado na Figura 10 (Abele et al., 2019; Enke et al., 2016; Gento et al., 2020):

- Sentido Restrito;
- Sentido Amplo.

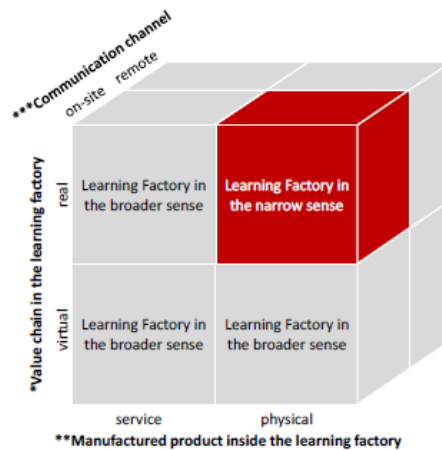


Figura 10 - Learning Factory no sentido restrito e no sentido amplo. (adaptado de Abele et al., 2015)

No sentido restrito, caracteriza-se por ser um ambiente de aprendizagem especificado por processos reais, em que incluem múltiplas estações (que compreendem aspetos técnicos e organizacionais), por um cenário instável que se assemelha a uma verdadeira cadeia de valor, por um produto físico que é produzido e por um conceito didático que

abarca a aprendizagem formal e informal presencial. Neste sentido o objetivo da *Learning Factory* pode ser direcionado para o ensino, formação e/ou investigação. Quanto ao sentido amplo, a definição deste conceito, é idêntica ao sentido restrito, mas com a diferença de que o cenário se assemelha com uma cadeia de valor virtual em vez de real e/ou em vez de um produto físico estar direcionado para um serviço e/ou o conceito didático baseado na aprendizagem à distância em vez de presencial (Abele et al., 2019).

Atualmente as *Learning Factories* têm sido utilizadas para fins educativos, de investigação e de formação em áreas como a produção (Universidade Técnica de Darmstadt), a eficiência energética (Green Factory Bavaria), operações de serviços (McKinsey Capability Center Atlanta), entre outras (Baena et al., 2017). Os principais objetivos das Learning Factories estão ilustrados na Figura 11.

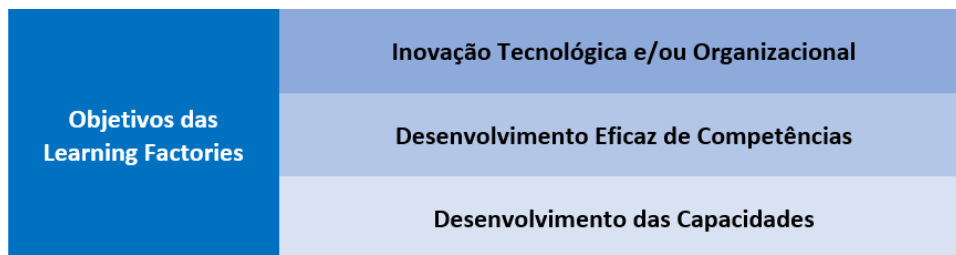


Figura 11 -Objetivos das Learning Factories.
(adaptado de Abele et al., 2015; Devika et al., 2020)

Os objetivos das *Learning Factories* são a Inovação Tecnológica e/ou Organizacional quando a fábrica é utilizada para fins de investigação, o desenvolvimento eficaz de competências quando a fábrica for utilizada para fins educativos e/ou de formação e por último o desenvolvimento de capacidades em que a fábrica está direcionada para os participantes e inclui aspetos motivacionais e emocionais, para conseguirem dominar situações complexas e desconhecidas da realidade na indústria e para impulsionar a comunicação entre pessoas, máquinas e recursos (Devika et al., 2020).

Por outras palavras, o objetivo é o de transmitir uma visão complexa dos processos na indústria, dos métodos, conceitos e ferramentas utilizados, permitindo encontrar potenciais soluções de melhoria e a implementação de processos mais eficientes num ambiente de produção simulada (Gento et al., 2020).

Segundo Abele et. al. (2017), as *Learning Factories* são consideradas sistemas complexos que abrangem diversos conceitos relacionados. De modo a se estabelecer uma visão geral

sobre este tema, foram definidos três níveis conceituais, relativos à configuração das *Learning Factories* (Abele et al., 2017; Enke et al., 2016; Kreß and Metternich, 2020):

- Nível Macro – abrange o ambiente de aprendizagem, o programa de *Learning Factory* e abordagem didática;
- Nível Meso – contém os módulos individuais de aprendizagem e cursos;
- Nível Micro – detalha e inclui os problemas específicos dentro dos módulos de aprendizagem.

Dependendo do nível de conceção abordado e segundo Tisch et. al e Kémeny et. al. (2016; 2015), as *Learning Factories* podem ser caracterizadas através de duas perspetivas ou de ambas:

- Perspetiva Didática - Ambientes de aprendizagem altamente complexos que permitem um desenvolvimento de competências de alta qualidade nas áreas de planeamento da produção, logística e processos de gestão;
- Perspetiva Operacional - Réplicas de cadeias de valor de qualquer indústria em que a aprendizagem pode ter lugar e possam ser produzidos produtos em pequena escala;
- Perspetiva Didática e Operacional – Combinação das duas perspetivas.

As *Learning Factories* devem ser criadas com base nas competências que se pretendem atingir com a sua implementação. Na Figura 12 é ilustrado o esquema da configuração de uma *Learning Factory*.

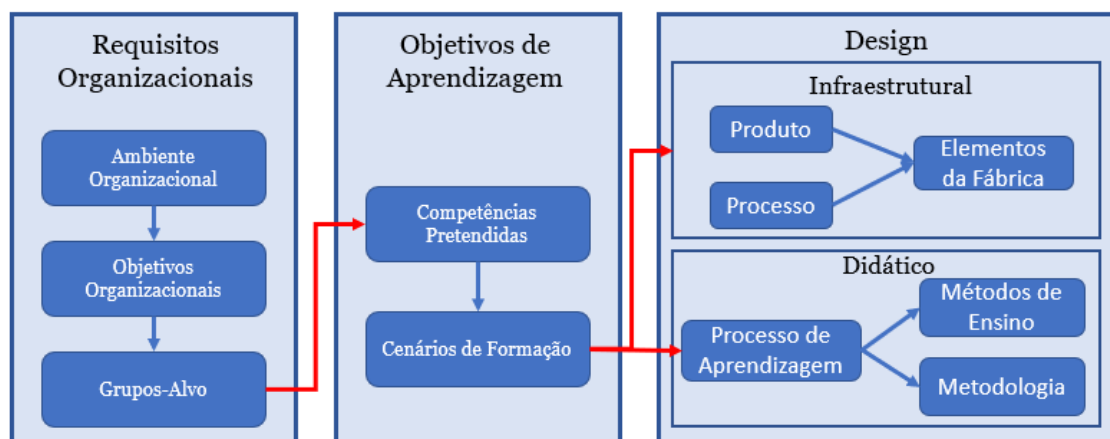


Figura 12 -Conceção de uma Learning Factory.
(adaptado de Kreß and Metternich, 2020)

Primeiramente na conceção destas fábricas é considerado o ambiente organizacional dos fundadores da *Learning Factory* (poderão ser universidades, empresas industriais ou de consultoria). Seguidamente são analisados e estabelecidos os objetivos organizacionais

no que à fábrica diz respeito. Por fim, são definidos os grupos-alvo, em que para as universidades, os grupo-alvo são derivados da investigação, formação e ensino. No que concerne aos objetivos de aprendizagem, depois de definidos os grupos-alvo, definem-se as competências pretendidas para a fábrica e os cenários de formação, que devem ser detalhados com base nas competências pretendidas para uma melhor percepção e simplificação dos passos seguintes. No que diz respeito ao Design da Infraestrutura, antes de se selecionar os elementos que irão formar a *Learning Factory* (máquinas, estações de trabalho, linhas de montagem, ferramentas, *softwares*, matéria-prima, entre outros), terá de se ter em consideração o produto a escolher e o processo de produção que irá ser necessário para fabricar o produto, tendo sempre em conta os requisitos organizacionais. Quanto ao Design Didático da fábrica é preciso definir os processos de aprendizagem através da escolha dos métodos de ensino, bem como os meios e os processos de criação de valor dentro da *Learning Factory*, ou seja, a metodologia. Contudo, existem algumas limitações que precisam de ser consideradas, tais como o orçamento disponível ou a área a utilizar para implementar a *Learning Factory* (Abele et al., 2017; Kreß and Metternich, 2020; Tisch et al., 2016, 2013).

De acordo com Neacsu et. al. (2021), na literatura são encontrados diversos efeitos positivos da criação e utilização destas fábricas como ilustrado na Figura 13. As Learning Factories do presente e do amanhã estão a desenvolver um aumento das capacidades dos participantes destas fábricas a todos os níveis hierárquicos (Abele et al., 2015). Estas também têm atuado como ferramentas educativas eficazes, que beneficiam os alunos a aplicar os conhecimentos teóricos durante a formação em engenharia para resolver problemas com fortes ligações e interações com a indústria, no desenvolvimento de equipas multidisciplinares e de competências de liderança, ajudando a formar alunos que poderão ser prontamente úteis à indústria (Devika et al., 2020).

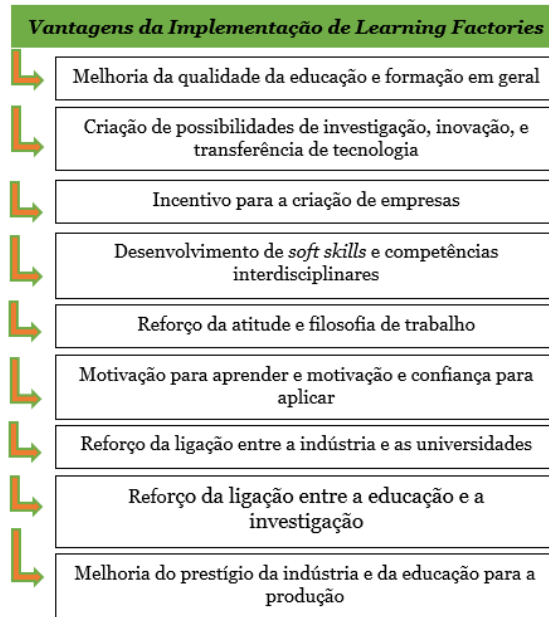


Figura 13 -Vantagens da Implementação de *Learning Factories* (adaptado de Neacsu et al., 2021)

A missão da *Learning Factory* é integrar o design, a produção e as realidades das empresas no plano curricular das Engenharias. Esta missão é muitas vezes conseguida através do equilíbrio entre a ciência da engenharia e a prática da engenharia. No entanto, existe um elo de ligação, em falta, no modelo de tripla-hélice, ilustrado na Figura 14.

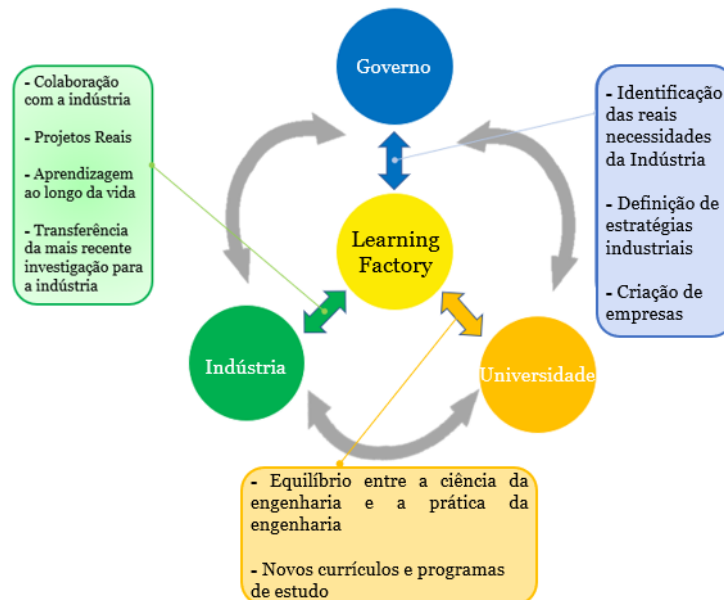


Figura 14 -Modelo da Tripla-Hélice das *Learning Factories* (adaptado de Veza et al., 2015)

A ligação em falta é a ligação que uma universidade ou empresa pode estabelecer com o governo, para facilitar a relação Governo-Indústria-Universidade. Com a implementação de *Learning Factories* a ligação Universidade-Indústria é criada, utilizando o currículo de engenharia focado num ensino prático com projetos reais fornecidos pela indústria. A sinergia Universidade-Governo é mais difícil de estabelecer uma vez que os líderes governamentais dependem de um mandato limitado e funcionam dentro de sistemas burocráticos, com o principal e fundamental interesse de maximização de lucro, ao contrário da comunidade académica que está mais preocupada com as ideias, as inovações e as metodologias mais recentes. Ao disseminar os resultados de projetos desenvolvidos nas *Learning Factories*, resultantes da simbiose entre a Universidade e a Indústria, pode ser criada uma ligação com o Governo a fim de se identificar as necessidades reais das empresas e definir uma estratégia industrial. As *Learning Factories* passariam a ser um local onde a Universidade, a Indústria e o Governo se reunissem para partilhar necessidades e expectativas, e trabalhar em projetos (Veza et al., 2015; Wagner et al., 2015).

4.3. Morfologia de uma *Learning Factory*

Nos últimos anos, vários modelos que classificam e descrevem detalhadamente a morfologia das *Learning Factories*, foram publicados por diversos autores. Esses modelos baseiam-se numa abordagem heurística da análise morfológica das *Learning Factories*, devido a estas serem sistemas complexos, o que permite a integração de um grande número de características, sem comprometer a sua utilização. Os modelos apoiam-se principalmente em aspetos técnicos, mas quanto a uma dimensão didática e pedagógica têm uma abrangência diminuta (Abele et al., 2017). Na Tabela 3 são apresentadas as perspetivas de vários autores, em relação ao foco da morfologia, as dimensões, assim como o número de características de cada modelo que foi desenvolvido.

Tabela 3 - Morfologias existentes de *Learning Factories*.
(adaptado de Abele et al., 2017)

Autor	Foco da Morfologia	Número de Dimensões	Número de Características
(Wagner et al., 2012)	Esquema de classificação para a variabilidade de diferentes <i>Learning Factories</i>	5	-
(Tisch et al., 2013) (IELF, 2013)	Descrição morfológica das características chaves das <i>Learning Factories</i>	1	11
(Steffen et al., 2013a)	Modelo de descrição detalhada sobre <i>Learning Factories</i>	3	25
(Steffen et al., 2013b)	Morfologia centrada nos aspectos didáticos dentro da <i>Learning Factories</i>	6	40
(Tisch et al., 2015) (CIRP)	Modelo de descrição abrangente para <i>Learning Factories</i> baseado nas dimensões da definição do CIRP	7	59

Em 2012, um modelo da morfologia das *Learning Factories* foi publicado por Wagner et al. (2012), em que os autores desenvolveram uma ferramenta de classificação para com base numa tabela de decisão da qual se retira informação apenas relativa à capacidade de mudança das *Learning Factories*. Em 2013, foi realizado um inquérito em dez universidades membros da IELF, por Tisch et al. (2015) onde os autores apresentaram os parâmetros típicos de uma *Learning Factories* no modelo publicado (Abele et al., 2017). Ainda em 2013, Steffen et al. (2013a) apresentaram um modelo baseado na morfologia que abrange três dimensões, o modelo de operação, o grupo-alvo e o equipamento. Adicionalmente, Steffen et al. (2013b), publicaram um modelo que se centra na descrição dos aspetos didáticos das *Learning Factories*, sistematizando os objetivos e os conteúdos de aprendizagem, assim como a estrutura organizacional (Tisch et al., 2015).

As *Learning Factories* têm vindo a desenvolver-se continuamente devido a novos resultados de investigação e das novas tecnologias emergentes, por esse motivo os modelos de descrição das *Learning Factories* precisam de ser adaptados e alargados constantemente. Resultante desta constatação, o Grupo de trabalho Colaborativo do CIRP sobre *Learning Factories* através de um projeto da Rede de *Learning Factories* Inovadoras (NIL), financiado pelo Ministério Alemão da Educação e Investigação através da bolsa do Serviço Alemão de Intercambio Académico (DAAD), desenvolveram um modelo de descrição multidimensional (Abele et al., 2015; Tisch et al., 2015). Por ter sido desenvolvido pelo CIRP, representa uma validação no mundo académico (Abele et al., 2019). Este modelo pode ser utilizado como orientador na conceção de uma nova

Learning Factory, como uma ferramenta de classificação de *Learning Factories* existentes e para a padronização do conceito de Learning Factory (Abele et al., 2017, 2015). É um modelo constituído por 59 características e agrupado em sete dimensões, como ilustrado na Figura 15 que serão descritas detalhadamente nas secções seguintes (Tisch et al., 2015).

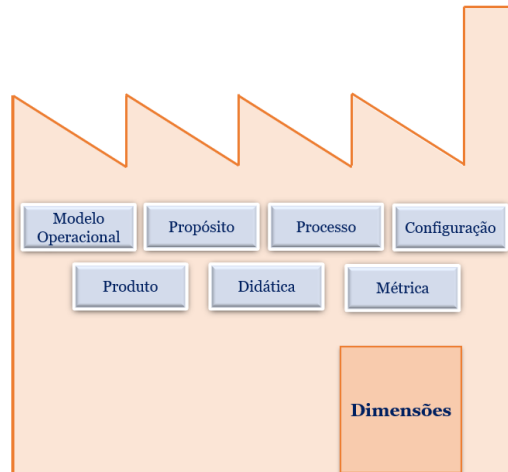


Figura 15 - Dimensões da Morfologia do Modelo de Descrição Multidimensional do CIRP. (adaptado de Tisch et al., 2015)

4.3.1. Modelo Operacional

O modelo operacional de uma *Learning Factory* descreve como as organizações conseguem assegurar o seu funcionamento sustentável e, assim, alcançar continuamente o desenvolvimento de competências em todos os níveis hierárquicos e a inovação em áreas tecnológicas e organizacionais. O modelo operacional diz respeito ao tipo de operador, de formador, de desenvolvimento, de fundos iniciais e de desenvolvimento, de prazo de financiamento e de modelo de negócio para formação de uma *Learning Factory*, detalhados na Tabela 4.

Tabela 4 - Primeira Dimensão - Modelo Operacional.
(adaptado de Tisch et al., 2015)

1.1	Operador	Instituição Acadêmica			Instituição					Empresa		
		Universidade	Faculdade	Bacharelato	Ensino Secundário/ Escola Vocacional	Câmara	União	Associação de empregados	Rede Industrial	Consultoria	Empresa de Produção	
1.2	Formador	Professor		Investigador		Estudante Assistente		Técnico Especialista		Consultor		Formador
1.3	Desenvolvimento	Desenvolvimento Próprio			Desenvolvimento Assistido Externamente					Desenvolvimento Externo		
1.4	Fundos Iniciais	Fundos Internos			Fundos Públicos					Fundos de Empresas		
1.5	Fundos Desenvolvimento	Fundos Internos			Fundos Públicos					Fundos de Empresas		
1.6	Prazo de Financiamento	Curto Prazo			Médio Longo Prazo (< 3 anos)					Longo Prazo (> 3 anos)		
1.7	Modelo de Negócio para Formação	Modelo Aberto					Modelo Fechado					
		Modelo Clube			Propinas do Curso		Programa de Formação só para uma empresa					

O tipo de operador de uma *Learning Factory* poderá ser uma instituição académica, uma empresa de consultoria, uma empresa industrial ou escola profissional. O formador poderá ser um professor, um investigador, um técnico ou engenheiro e/ou um consultor, dependendo do tipo de operador escolhido para a fábrica. Quanto ao desenvolvimento, este pode ser caracterizado por ser da instituição, da instituição juntamente com parceiros ou apenas externo à instituição. O financiamento divide em fundos iniciais e de desenvolvimento e provêm internamente da instituição, de fundos públicos ou de empresas, tendo um prazo associado de curto, médio ou longo prazo. Por fim, o modelo de negócio a adotar para a formação poderá ser num estilo de clube ou integrado no curso ou num programa de formação apenas de uma empresa (Abele et al., 2019; Tisch et al., 2015).

4.3.2. Propósito

O propósito deste modelo é utilizado para classificar a *Learning Factory* relativamente aos conceitos de aprendizagem, como detalhado na Tabela 5.

Tabela 5 - Segunda Dimensão - Propósito.
(adaptado de Tisch et al., 2015)

2.1	Propósito Principal	Educação			Treino Vocacional			Investigação					
2.2	Propósito Secundário	Ambiente de Teste / Ambiente Piloto		Propaganda para Produção		Inovação		Produção Industrial					
2.3	Grupos-Alvo para Ensino e Treino	Pupilos	Estudantes			Empregados							
			Bacharelato	Mestrado	Doutoramento	Aprendizes	Experientes	Alguma Experiência	Sem Experiência	Gestores			Empreendedores
								Baixo	Médio	Topo			
2.4	Constituição	Homogéneo				Heterogéneo (Conhecimento, Hierárquica, Estudantes + Empregados, etc.)							
2.5	Indústrias Alvo	Mecânica	Automóvel		Logística		Transportes		Química		Eletrónica		
		Construção	Têxtil		Banca/Seguros		Aeroespacial		FMCG		...		
2.6	Conteúdos Relevantes de Aprendizagem	Gestão da Produção e Organização	Eficiência de Recursos	CPPS	HMI	Automação	Design	Gestão Lean	Design de Sistemas de Trabalho	Design Intralogístico e Gestão			
2.7	Papel da L. F. para Investigação	Objeto de Investigação					Possibilitador de Investigação						
2.8	Tópicos de Investigação	Gestão da Produção e Organização	Eficiência de Recursos	Gestão Lean	CPPS	HMI	Automação	Mudança	Didática				

Nesta dimensão é caracterizado o propósito principal e secundário, os grupo-alvo, a constituição desses grupos-alvo, as indústrias-alvo, os conteúdos relevantes de aprendizagem, o papel e o tópico de investigação. O propósito principal pode ser educacional, de treino vocacional ou de investigação, em ambiente de teste ou piloto, em produção industrial, inovação ou disseminação para a produção, como propósitos secundários. Os grupos-alvo de uma *Learning Factory* podem ser estudantes, trabalhadores de empresas, desempregados ou aberto ao público, podendo estes grupos dentro da *Learning Factory* serem constituídos homogeneamente ou heterogeneamente. Também os diversos ramos da indústria poderão estar envolvidos, associados aos conteúdos lecionados ou secções da empresa, dependendo do tipo de operador. As *Learning Factories* poderão ser objeto de investigação ou facilitador da investigação em diversas áreas de investigação (Abele et al., 2019; Tisch et al., 2015).

4.3.3. Processo

Como terceira dimensão é detalhado o processo, dividido pelo ciclo de vida do produto, da fábrica, do pedido e da tecnologia, assim como a função indireta, o fluxo de material, o tipo de processo, a organização do produto, o grau de automação, o método de produção e as tecnologias associadas a produção caracterizado na Tabela 6 (Abele et al., 2019; Tisch et al., 2015).

Tabela 6 - Terceira Dimensão - Processo.
(adaptado de Tisch et al., 2015)

3.1	Ciclo de Vida do Produto	Planeamento do Produto	Desenvolvimento do Produto	Design do Produto	Prototipagem Rápida	Serviço	Reciclagem	Produção	Assemblagem	Logística
3.2	Ciclo de Vida da Fábrica	Planeamento e Investimento	Concepção da Fábrica	Planeamento e Processo	Arranque	Manutenção	Reciclagem			
3.3	Ciclo de Vida do Pedido	Configuração do Pedido	Sequência do Pedido	Planeamento da Produção e Agendamento	Recolha e Embalamento	Expedição				
3.4	Ciclo de Vida da Tecnologia	Planeamento	Desenvolvimento	Testes Virtuais	Manutenção	Modernização				
3.5	Função Indireta	Gestão de Cadeia de Abastecimentos		Gestão da Qualidade		Recursos Humanos	Financeiro	Compras	Vendas	
3.6	Fluxo de Material	Produção Contínua				Produção Discreta				
3.7	Tipo de Processo	Produção em Massa		Produção em Série		Pequenas Séries de Produção		Produção Pontual		
3.8	Organização da Produção	Produção em Sítio Fixo		Produção em Banca		Oficina de Produção		Produção em Fluxo		
3.9	Grau de Automação	Totalmente Automatizada			Parcialmente Automatizada			Manual		
3.10	Métodos de Produção	Corte	Modelagem Tradicional	Produção Aditiva	Conformação	Capecamento	Junção	Mudança de Propriedades		
3.11	Tecnologias de Produção	Química			Biológica			Física		

4.3.4. Configuração

O ambiente da *Learning Factory* poderá ser físico ou virtual, a uma escala reduzida ou em formato real como numa empresa, um nível de sistema de trabalho, com possibilidade de mudança das diversas estações em relação à sua dimensão. Por último, a integração de apoio informático poderá ser utilizada antes do início da produção (CAD e CAM), depois do início da produção (PPS - Planeamento e Controlo da Produção, ERP-Planeamento de Recursos Empresariais e MES – Sistemas de Execução da Produção), assim como depois da produção (Abele et al., 2019; Tisch et al., 2015). A dimensão da configuração descreve o ambiente de aprendizagem e as suas características encontram-se detalhadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Quarta Dimensão - Configuração.
(adaptado de Tisch et al., 2015)

4.1	Ambiente de Ensino	Puramente Físico	L.F. Física com suporte da Fábrica Digital	Fluxo Físico da L. F. Estendido Digitalmente	Puramente Virtual	
4.2	Escala	Reduzido à Escala			Formato Real	
4.3	Níveis de Sistema de Trabalho	Local de Trabalho	Sistema de Trabalho	Fábrica	Rede	
4.4	Possibilitadores de Mudança	Mobilidade	Modularidade	Escala	Universal	Compatibilidade
4.5	Dimensões de Mudança	Lay out e Logística	Características do Produto	Design do Produto	Tecnologia	Quantidade do Produto
4.6	Integração IT	IT Antes do Início da Produção (CAD, CAM, Simulação)		IT Depois do Início da Produção (PPS, ERP, MES)	IT Depois da Produção (CRM, PLM)	

4.3.5. Produto

Na quinta dimensão deste modelo, surge o produto e é nesta dimensão que se define se se trata de um produto ou serviço, da forma do produto, se é desenvolvido pelo operador, pelos participantes ou externamente, assim como o mercado onde o produto está inserido. Nesta dimensão também se define o número de produtos, assim como o número de variantes e número de componentes a fabricar ou comprar dependendo se se trata da montagem ou da matéria-prima. Por último, também se define o uso futuro do mesmo. Na Tabela 8 encontra-se apresentada esta dimensão e todas as suas características (Abele et al., 2019; Tisch et al., 2015).

Tabela 8 - Quinta Dimensão - Produto.
(adaptado de Tisch et al., 2015)

5.1	Materialidade	Material (Produto Físico)			Imaterial (Serviço)			
5.2	Forma do Produto	Carga Geral			Granel			
5.3	Origem do Produto	Desenvolvimento Próprio		Desenvolvido pelos Participantes		Desenvolvimento Externo		
5.4	Mercado do Produto	Disponível no Mercado		Disponível no Mercado mas em Versão Didática		Funcional e poderá estar disponível no Mercado	Sem Função / Demonstração	
5.5	Nº de Produtos Diferentes	1	2	3 a 4	Mais de 4	Fléxivel, Desenvolvido pelos Participantes	Aceitação de Pedidos Reais	
5.6	Nº de Variantes	1	2 a 4	5 a 20	...	Fléxivel, Dependendo dos Participantes	Determinado pelos Pedidos Reais	
5.7	Nº de Componentes	1	2 a 5	6 a 20	21 a 50	51 a 100	Mais de 100	
5.8	Uso Futuro	Reutilizáveis		Exibição		Doar	Venda	Sem Fim

4.3.6. Didática

A Didática é parte integrante dos conceitos da *Learning Factory*, que abordam um dos objetivos primários da educação e da formação. Nesta dimensão são descritas e selecionadas as classes de competências a abordar, as dimensões dos objetivos de ensino,

que cenário estratégico se vai aplicar assim como o tipo de ambiente, e consequentemente a aprendizagem é presencial ou remota. O grau de autonomia dos participantes e o papel do orientador são tópicos importantes para a caracterização da *Learning Factory* assim como a avaliação do sucesso de aprendizagem, que irá apurar se o conhecimento e o desenvolvimento de capacidades foram adquiridos por parte do participante. A Tabela 9 demonstra todos os tópicos essenciais a selecionar para caracterizar ao pormenor a dimensão didática de uma *Learning Factory*.

Tabela 9 - Sexta Dimensão - Didática.
(adaptado de Tisch et al., 2015)

6.1	Classes de Competência	Técnica e Metodológica	Social e Comunicativa	Competências Pessoais		Atividade e Implementação Orientada de Competências	
6.2	Dimensões dos Objetivos de Ensino	Cognitiva		Afetiva		Psicomotora	
6.3	Cenário Estratégico de Ensino	Instrutivo	Demonstrativo	Cenário Fechado	Cenário Aberto		
6.4	Ambiente de Ensino	Greenfield (Criação do Ambiente da Fábrica)			Brownfield (Melhoria do Ambiente Existente na Fábrica)		
6.5	Canais de Comunicação	Aprendizagem no Local			Conexão Remota		
6.6	Grau de Autonomia	Instruído	Autoguiado/Autorregulado		Autodeterminado/Auto-organizado		
6.7	Papel do Orientador	Apresentador	Moderador	Formador	Instrutor		
6.8	Tipo de Treino	Tutorial	Práticas Laboratoriais	Seminários	Workshop	Projeto	
6.9	Estandarização do Ensino	Ensino Estandarizado			Ensino Customizado		
6.10	Fundamentos Teóricos	Pré-Requisito	Em avanço	Alternado com as Práticas	Conforme a Procura	Depois	
6.11	Níveis de Avaliação	Feedback dos participantes	Aprendizagem dos Participantes	Transferência para a Fábrica Real	Impacto Económico do Ensino	Retorno do Ensino	
6.12	Avaliação do Sucesso de Aprendizagem	Testes Escritos	Testes Oraís	Relatórios Escritos	Apresentação Oral	Exame Prático	Nenhum

4.3.7. Métrica

A dimensão métrica, apresentada na Tabela 10, descreve as características quantitativas, tais como o número de participantes por sessão, o número de sessões padronizadas, assim como a duração de cada sessão, o número de participantes por ano, a capacidade de ocupação e a sua dimensão e o número de investigadores a tempo inteiro afetos à *Learning Factory* (Abele et al., 2019; Tisch et al., 2015).

Tabela 10 - Sétima Dimensão - Métrica.
(adaptado de Tisch et al., 2015)

7.1	Nº de Participantes por Sessão	1 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 30	Mais de 30	
7.2	Nº de Sessões Estandarizadas	1	2 a 4	5 a 10	Mais de 10		
7.3	Duração Média de Cada Sessão	Menos de 1 Dia	1 a 2 Dias	3 a 5 Dias	5 a 10 Dias	10 a 20 Dias	Mais de 20 Dias
7.4	Nº de Participantes por Ano	Menos de 50	50 a 200	201 a 500	501 a 1000	Mais de 1000	
7.5	Capacidade ocupada	Menos de 10%	10% a 20%	20% a 50%	50% a 75%	75% a 100%	
7.6	Dimensão da L.F.	Menos de 100 m ²	100 m ² a 300 m ²	300 m ² a 500 m ²	500 m ² a 1000 m ²	Mais de 1000 m ²	
7.7	Full Time Equivalente na L.F.	Menos de 1	2 a 4	5 a 9	10 a 15	Mais de 15	

4.4. Learning Factories Existentes

Conforme mencionado nos subcapítulos anteriores, o conceito e a implementação das *Learning Factories* tem-se disseminado para as mais variadas regiões do mundo, mas com maior ênfase na Europa. As *Learning Factories* não são todas iguais, variam no tamanho, no objetivo, na sofisticação e no tipo de atividade, promovendo uma melhor experiência de aprendizagem. Os seus principais propósitos e consequentemente os cenários de aplicação mais comuns são a educação, a formação e a investigação, tal como referido no subcapítulo anterior (Tabela 5) (Abele et al., 2019).

Nas *Learning Factories* que têm como propósito principal a educação, podem ser encontrados dois modelos diferentes, os projetos académicos abertos e os cursos orientados e fechados, que são aplicados no ensino da engenharia. Os projetos académicos são realizados pelos estudantes e focam-se na procura ou conceção de soluções técnicas ou organizacionais para problemas ligados a questões de investigação atuais, estando alguns projetos associados a empresas da indústria. Estes projetos não dependem diretamente de formações específicas, mas sim do trabalho que os estudantes se propõem a realizar, e normalmente duram algumas semanas ou até meses. Quanto aos cursos orientados, estes têm uma duração de algumas horas ou no máximo de alguns dias, e estão muitas vezes incorporados em seminários ou parte de unidades curriculares. Nestes cursos os estudantes são colocados em ambientes pré-definidos que se adequam aos fundamentos teóricos lecionados anteriormente e procuram soluções e melhoria para esses problemas (Abele et al., 2019).

As *Learning Factories* com a formação como propósito principal, caracterizam-se por ter três tipos de aplicação diferentes. A primeira aplicação, utilizada mais vezes, tem como objetivo o desenvolvimento das competências do participante, onde são aplicados conceitos semelhantes aos aplicados nas *Learning Factories* de educação, com a diferença de que o tempo é mais limitado na formação. A segunda aplicação é utilizada como parte do processo de gestão de mudança numa empresa, além de que a *Learning Factory* se torna a principal solução para ultrapassar as barreiras internas dos participantes à mudança. Na terceira aplicação, as *Learning Factories* atuam como demonstradoras da aplicação de novas tecnologias e inovações, numa perspectiva de casos de utilização elaborados para a Indústria 4.0 (Abele et al., 2019).

As *Learning Factories* como objetos de investigação tratam de questões sobre tópicos do tema em estudo, com o objetivo de evoluir e expandir as suas capacidades e potencial. Quanto ao seu papel de impulsionadoras da investigação, as *Learning Factories* ajudam a identificar problemas de investigação num ambiente quase realista, a testar soluções com o modelo físico da fábrica a uma complexidade e custos reduzidos, em comparação com os testes e soluções em contexto real (Abele et al., 2019). Na Tabela 11 é apresentado uma visão geral de algumas *Learning Factories* espalhadas pelo mundo, com um ou com a combinação dos diversos tipos de propósitos.

Tabela 11 - Exemplos de *Learning Factories* pelo mundo e os tipos de propósitos

Localização	Nome da <i>Learning Factory</i>	Tipo de Atividade	Artigo(s)
Universidade Tecnológica de Graz, Áustria (IELF)	LEAD Factory	Investigação, Educação e Formação	(Karre et al., 2017) (Auberger et al., 2019)
Universidade Estatal da Pensilvânia, EUA	Bernard M. Gordon Learning Factory	Educação	(Lamancusa and Simpson, 2004) (Penn State University, 2021)
Universidade de Split, Croácia (IELF)	Lean Learning Factory	Educação	(Gjeldum et al., 2016) (Veza et al., 2015)
Universidade de Tecnologia de Viena, Áustria	Learning and Innovation Factory	Educação	(Kemény et al., 2016) (Abele et al., 2019)

Universidade de Aachen, Alemanha	Textile Learning Factory 4.0	Investigação e Formação	(Küsters et al., 2017)
Universidade de Porto Rico-Mayaguez, Porto Rico	Model Factory	Educação	(University Puerto Rico-Mayagüez, 2021)
Universidade de Alberta, Canadá	AllFactory	Educação e Investigação	(Ahmad et al., 2018)
Universidade McMaster, Canadá	SEPT Learning Factory	Investigação, Educação e Formação	(Elbestawi et al., 2018)
Universidade de Bremen, Alemanha	BERTHA	Investigação, Educação e Formação	(Schreiber et al., 2016)
Universidade Técnica de Darmstadt, Alemanha	Process Learning Factory	Investigação, Educação e Formação	(Abele et al., 2019)

Desde 2014, a Universidade Tecnológica de Graz, na Áustria, tem vindo a gerir uma *Learning Factory*, denominada LEAD Factory em que LEAD significa Lean, Eficiência Energética, Ágil e Digital. O objetivo da fábrica é melhorar as formações académicas e empresariais bem como apoiar a investigação prática nas áreas da produção *Lean*. O produto que é montado nesta fábrica é uma trotinete totalmente funcional e disponível no mercado, constituída por 60 peças. A abordagem didática e metódica é baseada em dois estados da produção, o estado inicial e o estado otimizado (Filosofia *Lean*). No estado inicial é montada uma trotinete em 14 etapas por oito alunos, num *Lead Time* de 12 minutos e 50 segundos. Quando terminam o estado atual os alunos apresentam soluções de melhoria e são discutidas essas soluções. No estado otimizado, após a implementação de metodologias *Lean*, apenas 4 participantes e um *Lead Time* de 3 minutos e 30 segundos é preciso para montarem na totalidade a trotinete. No final deste estado é realizada uma comparação de indicadores chave de desempenho tais como, o tempo de produção, número de defeitos e o consumo de energia. Esta fábrica inclui aspetos de engenharia industrial tais como, a organização do local de trabalho, a gestão logística, o planeamento da produção, bem como metodologias *Lean* ou de eficiência energética (Auberger et al., 2019; Karre et al., 2017).

A Bernard M. Gordon *Learning Factory* na Universidade Estatal da Pensilvânia, nos Estados Unidos da América é uma parceria universidade-indústria estabelecida para integrar a concepção, a produção e as realidades empresariais no currículo de engenharia. Esta *Learning Factory* iniciou-se em 1994, mas continuou a evoluir. Esta fábrica é um laboratório de aprendizagem de acesso aberto, onde estudantes, professores e a indústria podem praticar engenharia real e experienciar o processo de produção do produto na sua totalidade, desde a definição das necessidades do cliente e o conceito de design até ao produto acabado. Fornece formação prática e instalações modernas para a concepção, a prototipagem, a produção e testes. Como características, a *Learning Factory* é altamente acessível, multifuncional, reconfigurável, e não é propriedade de um único departamento. Os estudantes podem aplicar os seus conhecimentos teóricos para resolver problemas reais, desenvolver o espírito crítico, aprender a trabalhar com pessoas de todos os níveis motivacionais e educacionais, aprender com os seus erros e descobrir que tudo demora mais tempo e custa mais do que o planeado (Lamancusa and Simpson, 2004; Penn State University, 2021).

Desde 2009 a *Lean Learning Factory* na Universidade de Split, na Croácia, tem vindo a estabelecer-se no Laboratório de Engenharia Industrial da Faculdade de Engenharia Eletrotécnica, Engenharia Mecânica e Arquitetura Naval (FESB). A Fábrica baseia-se num conceito didático que enfatiza a aprendizagem experimental baseada em problemas, utilizando ferramentas e métodos da gestão *Lean*. A missão da *Lean Learning Factory* é ajudar a trazer o mundo real para a sala de aula, fornecendo experiência prática aos estudantes de engenharia, ajudar a transferir a investigação científica mais recente para a indústria através de projetos de colaboração, e ajudar o governo a identificar as necessidades das empresas industriais. A *Lean Learning Factory* foi integrada na educação de estudantes e trabalhadores a todos os níveis, através de palestras. As palestras são complementadas com exercícios que são realizados no laboratório onde se encontra a *Learning Factory*. Os alunos podem experimentar os efeitos práticos da implementação de várias ferramentas e métodos *Lean* num ambiente de fábrica que é simulado e simplificado. O laboratório, além de computadores com *software* de Gestão do Ciclo de Vida do Produto, inclui ainda jogos didáticos, especialmente desenvolvidos para a simulação de sistemas de produção e logística. A fábrica possui também mesas e ferramentas reais para a montagem de produtos complexos reais, que dão oportunidade aos estudantes de desenvolverem linhas de montagem equilibradas (Gjeldum et al., 2016; Veza et al., 2015).

A *Learning and Innovation Factory* foi fundada em 2011 por um consórcio de três institutos da Faculdade de Engenharia Mecânica e Industrial da Universidade de Tecnologia de Viena, Áustria. Nas suas instalações é possível replicar o processo de produção de um SlotCar, carro em miniatura motorizado que é guiado por uma ranhura na pista em que se movimenta. São recriadas todas as fases do processo, desde a conceção do produto 3D, passando pela elaboração de protótipos, fabrico, montagem e testes. Na fase de conceção do produto 3D, os estudantes necessitam de rever os custos, a qualidade e o desempenho do produto para otimizá-lo, utilizando ferramentas CAD 3D para desenvolver melhores designs do chassis e do seu processo de produção. O chassis, incluindo um motor elétrico, possui aproximadamente 30 peças individuais. As peças e componentes redesenhados são subsequentemente fabricados em máquinas de torneamento e perfuração educacionais. Outras peças, juntas, e acessórios, são fabricadas numa impressora industrial 3D. Os postos de trabalho manuais permitem a montagem final. No final, os estudantes podem testar os seus desenhos e competir uns contra os outros numa pista de corridas de SlotCars. Nesta fábrica as áreas de conhecimento que são abordadas incluem a análise e cálculo de custos de produtos, engenharia e conceção, prototipagem, programação de máquinas, produção, planeamento de montagem, e estudos dos tempos de produção (Abele et al., 2019; Kemény et al., 2016).

A *Textile Learning Factory 4.0* funciona como um centro de aprendizagem, de demonstração e de investigação a nível mundial, das conseqüentes transformações da tecnologia, em colaboração com a Universidade de Aachen, na Alemanha e com parceiros da indústria e de empresas fornecedoras de tecnologia. Nesta *Learning Factory* é ainda possível testar projetos-piloto para aplicação na vida real. Esta fábrica tem como objetivo informar acerca da Indústria 4.0 e dos seus benefícios numa empresa, experimentar aplicações e tecnologias de ponta, fornecer a aprendizagem de ferramentas, métodos e tecnologias necessárias para iniciar o processo de digitalização e dar início a essa transformação, ao mesmo tempo que é gerido o impacto a longo prazo com o apoio de consultores experientes. Para que estes objetivos sejam cumpridos, os autores, através de *workshops*, focaram-se em três mudanças necessárias para a transformação digital: o sistema técnico, o sistema de gestão e o sistema de recursos humanos. De modo a capacitar e demonstrar os benefícios desta nova era digital, criaram uma linha de produção em que o produto final é uma pulseira inteligente e personalizável. As fases do processo incluem o pedido de encomenda, o desenvolvimento e a conceção do produto, a encomenda de matérias-primas, a produção e a entrega ao cliente. A *Textile Learning Factory 4.0* pretende promover a capacidade experimental prática e por esse motivo é

divida em dois níveis, para que dentro da mesma cadeia exista a mudança de nível. O primeiro nível diz respeito às operações e à filosofia *Lean* no qual são aplicadas algumas ferramentas. O segundo nível refere-se às operações relacionadas com as tecnologias da Indústria 4.0 (Küsters et al., 2017).

A Universidade de Porto Rico – Mayaguez implementou uma *Learning Factory* denominada ModelFactory, que inclui uma linha de produção de circuitos impressos. O seu principal cliente é uma empresa local de dispositivos médicos, que os contratou para produzirem um dispositivo que acelera a recuperação dos ossos. Nas suas instalações são produzidos o carregador, o mostrador e o condutor para a montagem deste dispositivo. É uma fábrica que compete com empresas no fornecimento desta tecnologia oferecendo uma montagem de elevada qualidade a um preço mais baixo. Isto é possível, porque os operadores são estudantes licenciados e estudantes de mestrado de diversas áreas da Engenharia, tais como: Mecânica, Engenharia Industrial, Elétrica e Informática. Os estudantes para além da sua formação técnica têm formações de modo a assegurar um elevado desempenho durante a montagem do dispositivo (University Puerto Rico-Mayagüez, 2021).

Na *Learning Factory* da Universidade de Alberta, no Canadá, denominada AllFactory foi desenvolvido um sistema de montagem reconfigurável de baixo custo baseado nos Legos. A AllFactory foca-se na educação baseada em projetos na área de produção avançada, produção *Lean*, *Enterprise Resource Planning* (ERP) e Indústria 4.0. O objetivo da AllFactory é apoiar o desenvolvimento de novos cursos para estudantes de engenharia com base em técnicas de aprendizagem experimental. Com base nas necessidades industriais, esta fábrica centra-se na investigação de ponta em tecnologias *Lean* e apoia a educação baseada em projetos para estudantes graduados e licenciados. O principal objectivo da AllFactory é recriar o ambiente de produção e formar os estudantes nas ferramentas *Lean* nas suas instalações (Ahmad et al., 2018).

A SEPT *Learning Factory*, na Universidade McMaster, no Canadá, é uma instalação de classe mundial que fornece processos modernos de conceção, prototipagem, fabrico e teste que incorporam tecnologias da Indústria 4.0. A abordagem orientada para a Indústria 4.0 implementada na SEPT *Learning Factory* é a digitalização de uma linha de produção. Ao produzir um determinado produto, uma série de sensores recolhe informação dos módulos da linha de produção, transmite a informação a servidores baseados na *Cloud*, e utiliza controladores e atuadores para controlar automaticamente outros módulos da linha de produção. Os estudantes e trabalhadores da indústria que

receberão formação utilizarão os componentes da fábrica de aprendizagem que sejam relevantes para a sua componente educacional, formação ou investigação aplicada. As componentes de ensino concentram-se em estudos de graduação, a componente de formação centra-se na demonstração dos conceitos da Indústria 4.0 e a componente de investigação é abordada através de estudos de pós-graduação e estágios de investigação de verão. A *SEPT Learning Factory* inclui várias estações de sistemas ciberfísicos, robots colaborativos e inteligentes, e máquinas-ferramentas modernas equipadas com sensores e atuadores que incluem os aspetos de digitalização da Indústria 4.0. A Fábrica também inclui estações auxiliares tal como, uma estação *Kanban*, uma estação de peças, e uma estação de conceção e gestão de sistemas de produção (Elbestawi et al., 2018).

A Universidade de Bremen, na Alemanha desenvolveu uma *Learning Factory* denominada BERTHA, em que o acrónimo significa "Bio-inspired Experimental Research Testbed for Human Arrangements in Assembly Systems". A BERTHA é composta por três estações de montagem que estão dispostas em linha reta e cada estação está igualmente equipada com ferramentas, materiais e um computador, e limitada no que diz respeito ao número de trabalhadores máximo, três trabalhadores por estação. As ferramentas e consumíveis são armazenados em contentores que seguem os produtos ao longo da linha. São utilizados produtos parcialmente montados que passarão pelas três estações e posteriormente passarão pela área de controlo da qualidade para verificação de montagem, e de seguida para a área de desmontagem, voltando as peças aos compartimentos e iniciando um novo ciclo. Neste ciclo são utilizados 12 alunos. Este ciclo permite aos alunos encontrarem soluções individuais para cada etapa do processo de montagem. Isto proporciona uma complexidade suficiente para permitir estratégias múltiplas para cada tarefa, permitindo aos professores ajustar o grau de dificuldade de forma flexível, permitindo a adaptação a vários cenários em função das necessidades atuais de investigação ou ensino. A BERTHA pode ser utilizada para investigação e desenvolvimento, educação e formação. Permitindo a adaptação a vários cenários em função das necessidades atuais de investigação ou ensino (Schreiber et al., 2016).

A *Process Learning Factory* nasce da parceria da Bosch e de outras empresas parceiras com a Universidade Técnica de Darmstadt, na Alemanha. A *Process Learning Factory* é um centro inovador de formação e investigação que permite uma comparação de diferentes sistemas e organizações da produção e a avaliação de abordagens recentemente desenvolvidas. O ambiente desta fábrica é um ambiente de produção simulada, mas verdadeiro, que conta com uma cadeia de valor completa da produção de um cilindro pneumático, abrangendo as fases de encomenda e entrega de matéria-prima,

maquinação, controlo da qualidade, montagem, embalamento e envio. O produto é composto por um cilindro, a base e o topo do cilindro, o pistão, a haste do pistão e elementos de montagem. Cada peça que constitui o cilindro é fabricada por diversas variantes e algumas são compradas. Nesta fábrica, os alunos podem compreender conceitos apoiados em experiências próprias, resolver problemas e aplicar métodos da produção *Lean*. Vários projetos de investigação, nela desenvolvidos, ajudaram a construir uma cadeia de valor digital na Fábrica, permitindo também uma vertente de demonstração de tecnologias no campo da Indústria 4.0. O objetivo das actividades de ensino e formação, é o desenvolvimento sustentável de competências decisivas nos domínios da gestão *Lean* e da Indústria 4.0. A fábrica possui ainda vários módulos de formação de gestão *Lean* para as empresas parceiras onde são abordadas as noções básicas do *Lean*, os fluxos de materiais, a qualidade, a cultura e a liderança (Abele et al., 2019).

5. Implementação da *Learning Factory*

5.1. Localização

A *Learning Factory* proposta pretende-se que seja implementada na Universidade da Beira Interior, situada na cidade da Covilhã, no distrito de Castelo Branco, em Portugal. É uma Universidade composta por cinco Faculdades, entre elas a Faculdade de Engenharia, do qual fazem parte o departamento de Informática, o departamento de Ciência e Tecnologias Têxteis, o departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, o departamento de Ciências Aeroespaciais e o departamento de Engenharia Eletromecânica. Este último departamento é onde se pretende construir a *Learning Factory*, para que os estudantes e professores dos cursos de 1º, 2º e 3º ciclos de Engenharia e Gestão Industrial possam adquirir conhecimentos e lecionar as unidades curriculares numa vertente mais prática, respetivamente. A Figura 16 indica a localização geográfica e o edifício da Faculdade das Engenharias.



Figura 16 - Localização da *Learning Factory*.

Na Faculdade de Engenharias existem diversas salas de Investigação, sendo que o curso de Engenharia e Gestão Industrial também possui uma, e onde se idealiza implementar a *Learning Factory*. Atualmente a sala está equipada com diversos computadores e é destinada aos alunos de mestrado e doutoramento, como demonstrado na Figura 17. Como se pode observar a sala necessita de uma arrumação e reorganização do espaço para se poder implementar as várias secções da *Learning Factory*, que irão ser abordadas e detalhadas nos subcapítulos seguintes.



Figura 17 - Sala destinada para a implementação da Learning Factory.

5.2. Motivação

O que desencadeou esta proposta para a futura implementação de uma *Learning Factory* na Universidade da Beira Interior, foi o facto de a Universidade ser beneficiária num projeto cofinanciado pelo COMPETE 2020, PORTUGAL 2020 e pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional, denominado INDTECH 4.0 – Novas Tecnologias para Fabricação Inteligente. Este projeto tem como objetivo geral a conceção e desenvolvimento de tecnologias inovadoras no contexto da Indústria 4.0/*Factories of the Future*. Este projeto inclui parcerias com empresas, centros de investigação e universidades, na qual a Universidade da Beira Interior faz parte (PSA, 2020). O projeto INDTECH 4.0 tornou-se assim o maior impulsionador da implementação da *Learning Factory* na Universidade. A implementação desta fábrica de aprendizagem, irá beneficiar os alunos com um tipo de aprendizagem baseado na prática, transportando-os para um chão-de-fábrica semelhante à de uma empresa real, enriquecendo o seu currículo nas diversas investigações que se pretendem iniciar posteriormente à implementação desta fábrica.

Com o intuito de distinguir e mais tarde disseminar a *Learning Factory* da Universidade da Beira Interior, criou-se uma sigla constituída pelas palavras Conhecimento, Aprendizagem e Investigação (CIA) e pelo próprio nome da Universidade e intitulou-se a fábrica de aprendizagem como CIA-UBI Learning Factory e foi criado o seu logotipo, para fazer parte dos documentos e servir de identificação da mesma, como ilustrado na Figura 18. Os ícones correspondem às palavras que constituem a sigla da *Learning Factory*, automatização e Indústria 4.0.



Figura 18 - Logótipo da Learning Factory.

5.3. Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP da Learning Factory

Conforme mencionado no capítulo anterior, o grupo de trabalho colaborativo da *Learning Factories* do CIRP desenvolveu um modelo descritivo multidimensional que permite ser utilizado como orientador na conceção de uma nova *Learning Factory*, como é o caso da CIA-UBI Learning Factory. As sete dimensões deste modelo irão ser utilizadas para detalhar e caracterizar a *Learning Factory* que se pretende implementar. Nas tabelas de cada dimensão os retângulos a azul referem-se às características da CIA-UBI.

5.3.1. Modelo Operacional

Nesta dimensão são avaliados alguns dos requisitos organizacionais ilustrados no capítulo anterior (Figura 12). A CIA-UBI Learning Factory ficará localizada numa Universidade, tendo assim como operador a instituição académica, mais propriamente a Faculdade de Engenharias, onde o curso de Engenharia e Gestão Industrial é lecionado. Os responsáveis ou formadores, como o modelo sugere, são os professores deste curso, alunos de doutoramento e/ou técnicos pertencentes ao departamento, uma vez que a *Learning Factory* estará direcionada para a área da Engenharia. Quanto ao desenvolvimento da CIA-UBI Learning Factory, será apenas da responsabilidade dos professores e da própria instituição, como irá ser demonstrado detalhadamente nos subcapítulos seguintes. O investimento para a implementação da *Learning Factory*, provém de fundos públicos enquanto se espera, no futuro, que os fundos para o desenvolvimento da mesma venham a ser da universidade e de fundos privados, em simultâneo, com prazos de financiamento de curto prazo e médio longo prazo. Por fim, o modelo de negócio a aplicar nesta *Learning Factory*, será um modelo aberto, que irá ser incorporado em algumas unidades curriculares dos ciclos de estudos de Engenharia e Gestão Industrial. Na presente tabela, pode constatar-se um resumo das características referentes ao modelo operacional, que irá fazer parte dos documentos a arquivar na sala destinada à CIA-UBI *Learning Factory*.

Tabela 12 - Modelo Operacional CIA-UBI *Learning Factory*.

1.1	Operador	Instituição Académica			Instituição					Empresa	
		Universidade	Faculdade	Bacharelato	Ensino Secundário/ Escola Vocacional	Câmara	União	Associação de empregados	Rede Industrial	Consultadoria	Empresa de Produção
1.2	Formador	Professor		Investigador		Estudante Assistente		Técnico Especialista	Consultor		Formador
1.3	Desenvolvimento	Desenvolvimento Próprio			Desenvolvimento Assistido Externamente				Desenvolvimento Externo		
1.4	Fundos Iniciais	Fundos Internos			Fundos Públicos				Fundos de Empresas		
1.5	Fundos Desenvolvimento	Fundos Internos			Fundos Públicos				Fundos de Empresas		
1.6	Prazo de Financiamento	Curto Prazo			Médio Longo Prazo (< 3 anos)				Longo Prazo (> 3 anos)		
1.7	Modelo de Negócio para Formação	Modelo Aberto					Modelo Fechado				
		Modelo Clube			Propinas do Curso		Programa de Formação só para uma empresa				

5.3.2. Propósito

Uma das sete dimensões que irá caracterizar e distinguir a *Learning Factory* da Universidade da Beira Interior, de outras espalhadas pelo mundo, é o propósito, fazendo parte alguns pontos (2.1 a 2.4 da Tabela 13), ainda dos Requisitos Organizacionais, sendo que os restantes pontos (2.5 a 2.8 da Tabela 13) pertencem aos Objetivos de Aprendizagem (Figura 12). Como propósito principal a CIA-UBI *Learning Factory* irá ter inicialmente uma vertente educacional, virada para a aprendizagem e para a aquisição de competências por parte dos alunos do curso em questão. Mais tarde pretende-se implementar uma vertente de Investigação, para colocar a Universidade em patamares de topo, fazendo com que exista uma maior proximidade e uma ligação com a indústria, que permita o desenvolvimento de projetos e de soluções, para vários setores. Como propósito secundário, a CIA-UBI, caracterizar-se-á por possuir um ambiente de teste, onde os alunos poderão vivenciar um ambiente de uma fábrica e mais tarde com a investigação apresentar ambientes piloto e soluções para aplicação na indústria. Os grupo-alvo da *Learning Factory* serão principalmente os estudantes da instituição, mais propriamente os do referido curso, com o objetivo de que os alunos ganhem competências e experiência, na área de Engenharia e Gestão Industrial, para quando começarem a exercer no mundo do trabalho. Pretende-se que os alunos troquem conhecimentos e aprendam com quem já tem um conhecimento na área, e por esse motivo, criar-se-ão grupos heterógenos, constituídos por alunos, professores e pessoas ligadas à indústria, de diversas áreas, como mecânica, automóvel, logística, têxtil, entre outras. Os conteúdos que se pretendem lecionar e aplicar numa vertente prática são os referentes à Gestão da Produção e Organização, eficiência de recursos, automação (virada para a Indústria 4.0), gestão *Lean*, design de sistemas de trabalho e Intra logístico e de Gestão. Na investigação pretende-se que os mesmos temas sejam

abordados, sendo que a CIA-UBI Learning Factory servirá como possibilitadora de Investigação. A Tabela 13 evidencia as características da CIA-UBI referentes à dimensão do propósito, segundo o modelo descritivo multidimensional.

Tabela 13 - Propósito CIA-UBI *Learning Factory*.

2.1	Propósito Principal	Educativo			Treino Vocacional			Investigação								
2.2	Propósito Secundário	Ambiente de Teste / Ambiente Piloto		Propaganda para Produção		Inovação		Produção Industrial								
2.3	Grupos-Alvo para Ensino e Treino	Pupilos	Estudantes			Empregados										
			Licenciatura	Mestrado	Doutoramento	Aprendizes	Experientes	Alguma Experiência	Sem Experiência	Gestores			Empreendedores	Empregados por conta própria	Desempregados	Aberto ao público
										Baixo	Médio	Topo				
2.4	Constituição	Homogêneo				Heterogêneo (Conhecimento, Hierárquica, Estudantes + Empregados, etc.)										
2.5	Indústrias Alvo	Mecânica	Automóvel		Logística		Transportes		Química		Eletrônica					
		Construção	Têxtil		Banca/Seguros		Aeroespacial		FMCG		...					
2.6	Conteúdos Relevantes de Aprendizagem	Gestão da Produção e Organização	Eficiência de Recursos	CPPS	HMI	Automação	Design	Gestão Lean	Design de Sistemas de Trabalho	Design Intralogístico e Gestão						
2.7	Papel da L. F. para Investigação	Objeto de Investigação					Possibilitador de Investigação									
2.8	Tópicos de Investigação	Gestão da Produção e Organização	Eficiência de Recursos	Gestão Lean	CPPS	HMI	Automação	Mudança	Didática							

5.3.3. Processo

Na Tabela 14 podem-se observar as características que dizem respeito à dimensão do processo que está inserida no Design Infraestrutural, segundo a Conceção de uma *Learning Factory*, mencionado no capítulo anterior na Figura 12. O processo incorpora quatro pontos referentes ao ciclo de vida do produto, da fábrica, do pedido e da tecnologia. Quanto ao ciclo de vida do produto pretende-se que na CIA-UBI Learning Factory se faça o planeamento, o desenvolvimento e o design do produto e que sejam fabricados os componentes através da produção aditiva ou impressão 3D, recorrendo à reciclagem do mesmo sempre que seja possível. Quanto ao ciclo de vida da fábrica pretende-se que seja revisto o seu planeamento e investimento, a sua conceção, o planeamento do processo, assim como a manutenção da mesma, para que no futuro a CIA-UBI seja uma *Learning Factory* preparada para as mudanças da indústria e para a introdução de novas tecnologias, caracterizando-a como uma fábrica de aprendizagem inovadora e em constante evolução. No ciclo de vida do pedido pretende-se implementar uma cadeia de valor, que terá o seu início no pedido do cliente e terminará no embalamento, passando pelas fases de configuração e sequenciamento do pedido, assim como pelas fases de planeamento da produção. A cadeia de valor irá ser detalhada nos subcapítulos seguintes. O último ciclo de vida abordado nesta dimensão é o ciclo de vida da tecnologia, que está englobado no ciclo de vida da fábrica uma vez que se pretende

inovar conforme a evolução do mercado e das tendências futuras, preservando a tecnologia existente. A CIA-UBI tem como função indireta a gestão da qualidade, como irá ser descrito na cadeia de valor, com a criação de uma linha de produção apenas para verificar a qualidade do produto. A *Learning Factory* caracterizar-se-á pela produção discreta de pequenas séries de produção em fluxo, ou seja, produz um produto específico que visualmente, pode ser contado e fabricado em quantidades diminutas e numa série de etapas sequenciais. Quanto ao grau de automação da fábrica a implementar, esta caracterizar-se-á por estar parcialmente automatizada, como vai ser descrito nos subcapítulos seguintes, sendo que o método de produção dos componentes do produto será produzido por impressão 3D (produção aditiva) e a montagem do produto através da junção dos diversos componentes.

Tabela 14 - Processo CIA-UBI *Learning Factory*.

3.1	Ciclo de Vida do Produto	Planeamento do Produto	Desenvolvimento do Produto	Design do Produto	Prototipagem Rápida	Serviço	Reciclagem	Produção	Assemblagem	Logística
3.2	Ciclo de Vida da Fábrica	Planeamento e Investimento	Concepção da Fábrica	Planeamento e Processo	Arranque	Manutenção	Reciclagem			
3.3	Ciclo de Vida do Pedido	Configuração do Pedido	Sequência do Pedido	Planeamento da Produção e Agendamento	Recolha e Embalamento	Expedição				
3.4	Ciclo de Vida da Tecnologia	Planeamento	Desenvolvimento	Testes Virtuais	Manutenção	Modernização				
3.5	Função Indireta	Gestão de Cadeia de Abastecimentos		Gestão da Qualidade		Recursos Humanos	Financeiro	Compras	Vendas	
3.6	Fluxo de Material	Produção Contínua				Produção Discreta				
3.7	Tipo de Processo	Produção em Massa		Produção em Série		Pequenas Séries de Produção		Produção Pontual		
3.8	Organização da Produção	Produção em Sítio Fixo		Produção em Banca		Oficina de Produção		Produção em Fluxo		
3.9	Grau de Automação	Totalmente Automatizada			Parcialmente Automatizada			Manual		
3.10	Métodos de Produção	Corte	Modelagem Tradicional	Produção Aditiva	Conformação	Capamento	Junção	Mudança de Propriedades		
3.11	Tecnologias de Produção	Química			Biológica			Física		

5.3.4. Configuração

Na dimensão da configuração a CIA-UBI *Learning Factory* irá dar-se ênfase a um ambiente de ensino direcionado para um fluxo físico e estendido digitalmente através da Realidade Aumentada, que será abordado mais para a frente, numa escala reduzida, mas com intuito de representar um chão de fábrica, como nível de sistema de trabalho, através de diversas células de produção. Para que a CIA-UBI *Learning Factory* possa acolher diversos casos de estudo e ambientes de teste diferentes, irá tentar-se que exista a possibilidade de proceder a alterações nas células de produção, adaptando-as ao necessário a testar, Pretende-se que seja possível a mudança do *layout* da sala, as

características do produto e até mesmo a criação de um novo produto, através de um novo design e a mudança da tecnologia que se irá implementar, pensando no referido anteriormente, relativo ao crescimento da tecnologia e das transformações da indústria. As tecnologias de informação que se pretendem utilizar na produção serão do tipo CAD, CAM e de simulação, antes do início da produção, podendo mais tarde vir a optar-se pela instalação de *softwares* depois do início da produção e para depois da produção. A Tabela 15 apresenta o resumo desta dimensão que segundo a Figura 12, é referente aos objetivos de aprendizagem, relativo aos cenários de formação.

Tabela 15 - Configuração CIA-UBI *Learning Factory*.

4.1	Ambiente de Ensino	Puramente Físico	L.F. Física com suporte da Fábrica Digital	Fluxo Físico da L. F. Estendido Digitalmente	Puramente Virtual	
4.2	Escala	Reduzido à Escala		Formato Real		
4.3	Níveis de Sistema de Trabalho	Local de Trabalho	Sistema de Trabalho	Fábrica	Rede	
4.4	Possibilitadores de Mudança	Mobilidade	Modularidade	Escala	Universal	Compatibilidade
4.5	Dimensões de Mudança	Layout e Logística	Características do Produto	Design do Produto	Tecnologia	Quantidade do Produto
4.6	Integração IT	IT Antes do Início da Produção (CAD, CAM, Simulação)		IT Depois do Início da Produção (PPS, ERP, MES)	IT Depois da Produção (CRM, PLM)	

5.3.5. Produto

O produto que irá ser produzido na CIA-UBI *Learning Factory* é um material físico e não um serviço como em algumas *Learning Factories* acontece. Na CIA-UBI irá produzir-se um carrinho, desenvolvido externamente por um engenheiro austríaco, chamado Wolfgang Vogel, que desenha em CAD, vários modelos de temas diversificados, para impressão 3D. O desenho em questão, criado por este engenheiro, é um protótipo de um carro da marca de automóveis elétricos Tesla. O modelo do automóvel é conhecido pelo seu design diferente do habitual, com linhas retas, e foi denominado por Tesla Cybertruck. Na Figura 19 encontra-se ilustrado o automóvel na versão real (esquerda) e em escala reduzida (direita), desenvolvido pelo referido engenheiro. Este protótipo é o produto que irá ser fabricado na CIA-UBI *Learning Factory*, como o primeiro produto da fábrica de aprendizagem, pretendendo-se utilizar num futuro próximo produtos desenvolvidos pelos alunos, de forma a possibilitar tornar mais real a cadeia de valor, desde o desenho ao fabrico do produto real.






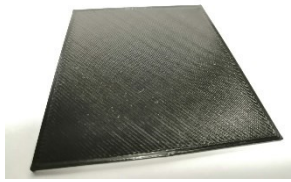

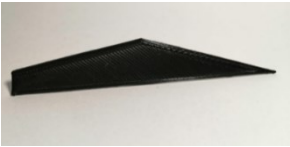


Figura 19 - Produto da CIA-UBI Learning Factory.

O protótipo é constituído por vários componentes, impressos numa impressora 3D, e são utilizados polímeros e plásticos como materiais, para imprimir os seus componentes. O Tesla Cybertruck em escala reduzida é composto por 24 componentes, conforme apresentado na Tabela 16, que posteriormente serão montados para constituir um único protótipo. Pretende-se que o protótipo e os seus componentes venham a ter cores diferentes, dependendo do pedido do cliente (etapa da cadeia de valor que será abordado no subcapítulo seguinte), com o objetivo de simular um ambiente idêntico a um chão-de-fábrica e assim poder ser aplicada a filosofia *Lean* na montagem do protótipo.

Tabela 16 - Componentes do produto.

Código	Descrição	Quantidade	Tipo de Material	Imagem
PCH001	Chassi Frontal	1	Poliácido Lático (PLA)	
PCH002	Chassi Traseiro	1		
PBW003	Carroçaria Frontal	1		
PBW004	Carroçaria Traseira	1		

PTU005	Pneus	4	Poliuretano Termoplástico (TPU)	
PTS006	Pneus sobressalentes	4	Poliuretano Termoplástico (TPU)	
PRIo07	Jante Interior	4	Poliácido Lático (PLA)	
PRIo08	Jante Exterior	4		
PTKo09	Porta da Mala	1		
PWS010	Para-brisas	1		
PSW011	Janela Lateral Direita	1		
PSW012	Janela Lateral Esquerda	1		

Para a montagem do protótipo são necessários ainda alguns componentes que não poderão ser impressos, como é o caso dos parafusos para unir os chassis e as carroçarias (M3x6), os *brass inserts* (M3 Ruthex) para poder aparafusar as rodas ao chassi, assim como as anilhas para as folgas e a cola para colocar o para-brisas e as janelas laterais, conforme listado na Tabela 17.

Tabela 17 - Outros Componentes do Produto.

Código	Descrição	Quantidade	Imagem
PSC013	Parafuso M3x6	4	
PSC014	Parafuso M3x14	4	
PBI015	<i>Brass Insert</i> M3 Ruthex	8	
PRG016	Anilhas	4	
PGL017	Supercola	-	Indiferenciado

Como uso futuro do produto da CIA-UBI Learning Factory pretende-se reutilizá-lo ao fim de completar a cadeia de valor, para iniciar de novo a cadeia e assim se poupar nos custos de impressão de componentes, mas também a doação de alguns produtos para palestrantes que visitem a Faculdade de Engenharia da Universidade em sessões ministradas ao curso de Engenharia e Gestão Industrial. Na Tabela 18, apresenta-se um resumo das características referentes à dimensão produto no modelo descritivo multidimensional.

Tabela 18 - Produto CIA-UBI *Learning Factory*.

5.1	Materialidade	Material (Produto Físico)			Imaterial (Serviço)		
5.2	Forma do Produto	Carga Geral			Granel		
5.3	Origem do Produto	Desenvolvimento Próprio	Desenvolvido pelos Participantes		Desenvolvimento Externo		
5.4	Mercado do Produto	Disponível no Mercado	Disponível no Mercado mas em Versão Didática	Funcional e poderá estar disponível no Mercado		Sem Função / Demonstração	
5.5	Nº de Produtos Diferentes	1	2	3 a 4	Mais de 4	Fléxivel, Desenvolvido pelos Participantes	Aceitação de Pedidos Reais
5.6	Nº de Variantes	1	2 a 4	5 a 20	...	Fléxivel, Dependendo dos Participantes	Determinado pelos Pedidos Reais
5.7	Nº de Componentes	1	2 a 5	6 a 20	21 a 50	51 a 100	Mais de 100
5.8	Uso Futuro	Reutilizáveis	Exibição		Doar	Venda	Sem Fim

5.3.6. Didática

Na Tabela 19, são apresentados os doze pontos relativos à dimensão da didática, a qual é uma das dimensões que irá caracterizar a CIA-UBI *Learning Factory* em termos da formação que os participantes vivenciarão. A fábrica de aprendizagem trará para os alunos competências técnicas e metodológicas através da aplicação das várias ferramentas *Lean* que irão aplicar na montagem, e de todas as tecnologias da Indústria 4.0 que irão observar e experienciar. A CIA-UBI irá fomentar as competências sociais e comunicativas dos participantes, a fim de os tornar capazes de comunicarem e lidarem com diferentes pessoas de vários níveis hierárquicos, convergindo para o desenvolvimento das suas competências pessoais. A vivência num ambiente dinâmico e simulado de um chão de fábrica irá permitir aos participantes desenvolver as suas capacidades cognitivas e psicomotoras, através da informação partilhada e conteúdos lecionados, assim como das diversas tarefas de montagem e verificação da qualidade do produto, respetivamente. Como cenário estratégico de ensino a CIA-UBI irá apresentar um ambiente instrutivo, onde os participantes irão montar o produto através de ordens de trabalho e num ambiente de demonstração/participação das diferentes tecnologias da Indústria 4.0, através da aprendizagem no local, características do tipo de ambiente de ensino denominado *Greenfield* (criação do ambiente de uma fábrica). Os participantes antes de iniciarem a cadeia de valor assistirão a uma palestra inicial, dirigida pelo formador, durante a qual lhes será explicado todo o funcionamento da linha de produção, as tarefas que terão de realizar e na qual também aprenderão alguns fundamentos teóricos. Relativamente à avaliação, após a experimentação da CIA-UBI *Learning Factory* pretende-se que os participantes sejam avaliados, tanto para se receber o *feedback* da experiência dos participantes, como para introduzir melhorias e

compreender o que foi adquirido em termos de aprendizagem pelos participantes, concluindo se a presença e vivência na *Learning Factory* foi bem-sucedida. Os métodos que irão ser aplicados passam por frequências escritas sobre os fundamentos teóricos lecionados nas palestras iniciais de cada sessão da *Learning Factory*, por relatórios escritos quando a vertente da investigação estiver ativa e pela apresentação de trabalhos realizados sobre as temáticas da Engenharia e Gestão Industrial, que possam ser trabalhadas na CIA-UBI. Deve-se salientar, que dependendo do ciclo de estudos a avaliação que decorrer da *Learning Factory* contará para a avaliação da unidade curricular em questão, em alguns casos, e noutros apenas para disseminar e avaliar o sucesso da CIA-UBI Learning Factory.

Tabela 19 - Didática CIA-UBI Learning Factory.

6.1	Classes de Competência	Técnica e Metodológica	Social e Comunicativa	Competências Pessoais	Atividade e Implementação Orientada de Competências		
6.2	Dimensões dos Objetivos de Ensino	Cognitiva		Afetiva	Psicomotora		
6.3	Cenário Estratégico de Ensino	Instrutivo	Demonstrativo	Cenário Fechado	Cenário Aberto		
6.4	Ambiente de Ensino	Greenfield (Criação do Ambiente da Fábrica)			Brownfield (Melhoria do Ambiente Existente na Fábrica)		
6.5	Canais de Comunicação	Aprendizagem no Local			Conexão Remota		
6.6	Grau de Autonomia	Instruído	Autoguiado/Autorregulado		Autodeterminado/Auto-organizado		
6.7	Papel do Orientador	Apresentador	Moderador	Formador	Instrutor		
6.8	Tipo de Treino	Tutorial	Práticas Laboratoriais	Seminários	Workshop	Projeto	
6.9	Estandarização do Ensino	Ensino Estandarizado			Ensino Personalizado		
6.10	Fundamentos Teóricos	Pré-Requisito	Em avanço	Alternado com as Práticas	Conforme a Procura	Depois	
6.11	Níveis de Avaliação	Feedback dos participantes	Aprendizagem dos Participantes	Tranferência para a Fábrica Real	Impacto Económico do Ensino	Retorno do Ensino	
6.12	Avaliação do Sucesso de Aprendizagem	Testes Escritos	Testes Orais	Relatórios Escritos	Apresentação Oral	Exame Prático	Nenhum

5.3.7. Métrica

Como última dimensão, na Tabela 20 são apresentados os sete pontos relativos à métrica, ou seja, os números que caracterizam a fábrica de aprendizagem. Na CIA-UBI Learning Factory irão participar ao longo de toda a cadeia de valor 12 alunos por sessão, com o número máximo de 2 a 4 sessões, consoante o número de alunos da turma. Estima-se que a duração de cada sessão seja de cerca de uma hora, no entanto só se saberá a duração exata, após a *Learning Factory* estar configurada. Espera-se que centenas de alunos possam usufruir da CIA-UBI ao longo de um ano de atividade. A sala onde irá ficar instalada a *Learning Factory* terá uma capacidade de ocupação na ordem dos 50 a 75%, uma vez o espaço restante da sala será destinado a alunos de doutoramento do curso em

questão. A CIA-UBI terá uma área máxima compreendida entre 50m² e 90 m² e terá cerca de 2 a 4 alunos associados a projetos de investigação, quando a vertente de investigação da CIA-UBI for implementada.

Tabela 20 - Métrica CIA-UBI *Learning Factory*.

7.1	Nº de Participantes por Sessão	1 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 30	Mais de 30	
7.2	Nº de Sessões Estandarizadas	1	2 a 4	5 a 10	Mais de 10		
7.3	Duração Média de Cada Sessão	Menos de 1 Dia	1 a 2 Dias	3 a 5 Dias	5 a 10 Dias	10 a 20 Dias	Mais de 20 Dias
7.4	Nº de Participantes por Ano	Menos de 50	50 a 200	201 a 500	501 a 1000	Mais de 1000	
7.5	Capacidade ocupada	Menos de 10%	10% a 20%	20% a 50%	50% a 75%	75% a 100%	
7.6	Dimensão da L. F.	Menos de 100 m ²	100 m ² a 300 m ²	300 m ² a 500 m ²	500 m ² a 1000 m ²	Mais de 1000 m ²	
7.7	Full Time Equivalent na L.F.	Menos de 1	2 a 4	5 a 9	10 a 15	Mais de 15	

5.4. Descrição detalhada da *Learning Factory*

Neste subcapítulo será apresentada em pormenor a CIA-UBI *Learning Factory*. A cadeia de valor será especificada passo a passo, assim como todas as secções que constituem a *Learning Factory*. Ainda são abordadas, em separado, as tecnologias e ferramentas *Lean* que são utilizadas na CIA-UBI. Por último as unidades curriculares que poderão ser lecionadas na CIA-UBI, assim como os custos de implementação são analisadas.

5.4.1. Cadeia de Valor

A cadeia de valor da CIA-UBI *Learning Factory* será dividida em cinco etapas, nomeadamente o Pedido do Cliente, o Desenvolvimento do Produto, a Ordem de Produção, a Produção e por fim o Controlo da Qualidade, como ilustrado na Figura 20. Dentro da cadeia de valor, esta poderá ainda ser abordada em função de dois níveis. O nível 1 referente à Filosofia *Lean*, que irá ser abordada na etapa da produção, e o nível 2 alusivo às tecnologias da Indústria 4.0, na etapa final de controlo da qualidade. As restantes etapas dizem respeito à gestão de operações e da produção consoante o pedido do cliente. Em cada sessão, os alunos serão distribuídos pelas cinco etapas da cadeia de valor da CIA-UBI, onde previamente serão instruídos sobre cada função a realizar na célula de produção, que lhes for atribuída.



Figura 20 - Cadeia de Valor da CIA-UBI Learning Factory.

O início da cadeia de valor será na etapa denominada Pedido do Cliente, onde um aluno/participante afeto à primeira célula de produção, receberá notas de encomenda por parte do Formador da CIA-UBI, que irão gerar um fluxo de informação através de toda a cadeia de valor, e onde estará especificada a quantidade de produtos a fabricar, as especificações do produto, os prazos de entrega da encomenda de vários Clientes Fictícios, assim como os custos de não cumprimento dos prazos de entrega. Nesta etapa, os alunos irão analisar todas as notas de encomenda, e os respetivos prazos de entrega, de forma a definir quais as primeiras encomendas a fabricar para não comprometer os prazos de entrega. E por fim, as notas de encomenda são enviadas para a etapa de desenvolvimento do produto, ou seja, o planeamento da produção.

A etapa de Desenvolvimento do Produto será uma etapa a implementar posteriormente, uma vez que as impressões dos componentes poderão demorar dias, mas o objetivo desta etapa será o de os alunos desenvolverem o produto num *software* CAD/CAM, consoante as especificações do cliente e poderem redesenhar e definir os produtos a fabricar, consoante as notas de encomenda da etapa anterior. Ainda se pretende nesta etapa, que os alunos sejam capazes de definir e de quantificar o material necessário a encomendar e a matéria-prima necessária para a impressão dos componentes do produto. A etapa que se segue é a etapa da Ordem de Produção, em que os alunos atribuídos a esta etapa, deverão conseguir criar uma ordem de produção completa para que os alunos das etapas seguintes consigam saber o que devem produzir, em que quantidades e de acordo com as especificações pedidas pelo cliente. É nesta etapa que os alunos colocam na própria ordem de produção, as informações sobre as peças necessárias e em que quantidades, os materiais necessários, assim como as ferramentas que vão ser utilizadas.

A Produção é a etapa mais importante da CIA-UBI, uma vez que irá abordar algumas ferramentas *Lean* para a montagem do produto. Esta etapa é a que possui um maior número de alunos e que está dividida por 10 células de produção com funções contínuas entre elas. Nesta etapa, e com as ordens de produção anteriormente criadas, será possível

os alunos efetuarem a montagem do produto através de instruções dispostas em cada bancada de trabalho. Estas células de produção irão ser mais detalhadas no subcapítulo a seguir, quando se abordar o *layout* da CIA-UBI Learning Factory, assim como as características de cada bancada de trabalho. A produção irá ser cronometrada desde o início da produção até o produto acabado e poder passar à etapa final de inspeção.

As contagens do tempo de montagem do produto serão necessárias para posterior análise, pelos alunos, na medida em que irão ser avaliados, com a realização de um trabalho em que apresentarão sugestões de melhoria para a CIA-UBI, assim como na elaboração de um *Value Stream Mapping* para apresentação. Quando o produto estiver completo, este será colocado numa bancada e passará por uma linha de controlo da qualidade para garantir que o produto está conforme as especificações do cliente. É nesta fase que a Indústria 4.0 é aplicada e onde serão demonstradas várias tecnologias que hoje em dia são aplicadas em várias empresas. Esta linha de controlo, terá 5 postos onde serão verificadas as características do produto, o seu peso, o tamanho e as especificações que o cliente pediu e onde será colocado o logotipo da Universidade e da CIA-UBI, demonstrando a conformidade do produto com a nota de encomenda do cliente. Esta linha será acompanhada por um aluno que irá através de uma lista de verificação anotar todas as ações efetuadas nesta linha. Os detalhes desta etapa também serão detalhados no subcapítulo seguinte. Terminando todas as etapas os alunos responderão a um inquérito, o qual irá servir de *feedback* para os responsáveis da CIA-UBI, e serão avaliados por um relatório onde apresentarão as melhorias e sugestões a implementar, assim como a construção de um VSM, conforme mencionado acima na etapa da produção.

5.4.2. Células de Produção

Conforme ilustrado anteriormente na Figura 17, a sala destinada à CIA-UBI Learning Factory necessita de uma transformação e arrumação para poder ser implementada a linha de montagem e a linha de controlo da qualidade pretendidas. Com esse objetivo redesenhou-se o layout da sala para posterior aplicação com espaços dedicados para a montagem do produto, a verificação da qualidade do produto, uma zona destinada à realização das palestras antes do início da simulação, outra para reuniões e duas áreas de trabalho destinadas a alunos de doutoramento e mestrado, que possam a vir desenvolver projetos com a abertura da investigação na CIA-UBI. Na Figura 21, encontra-se ilustrado o layout que se pretende aplicar na CIA-UBI, que está dividido em cinco zonas e ainda na Figura 22 a visão 3D de todas as secções.

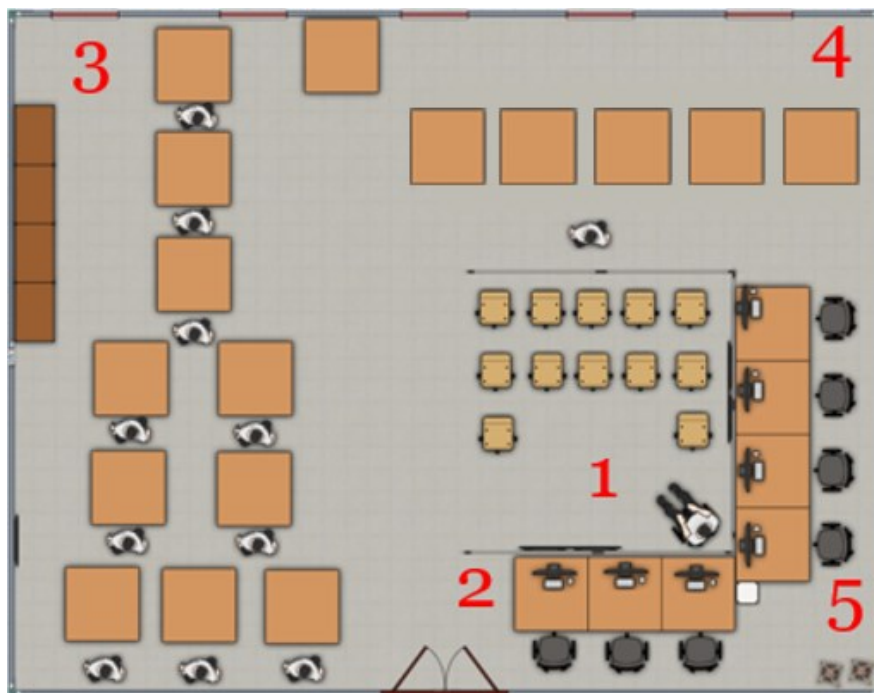


Figura 21 - Layout proposto para a CIA-UBI.

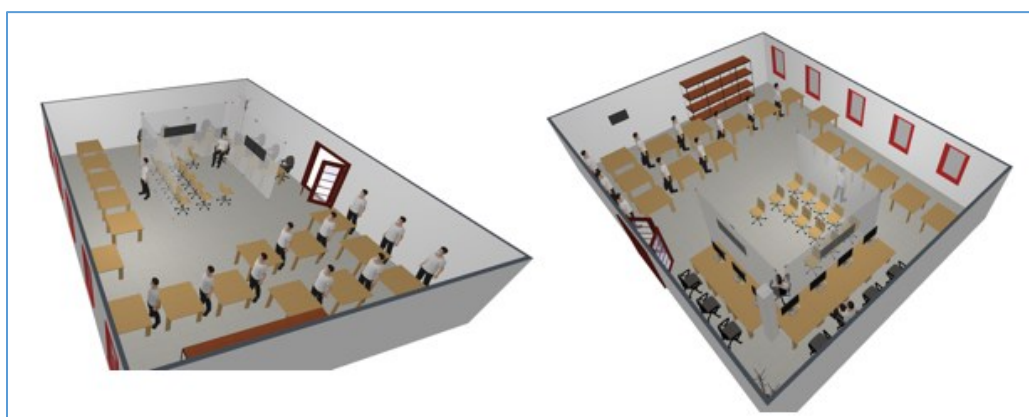


Figura 22 - Visão 3D da CIA-UBI.

A secção 1 corresponde à sala criada onde se irá dar início à simulação de um ambiente de chão de fábrica. Os alunos irão ter uma pequena apresentação do que irá ser realizado nesta atividade, em que serão explicadas todas as funções de todos os postos de trabalho, a atribuição de cada aluno a cada posto de trabalho das secções 2, 3 e 4 da sala e por fim, serão mostrados alguns projetos que estejam a decorrer na CIA-UBI, nos quais poderão solicitar, se possível, a integração nesses mesmos projetos. Esta sessão será dirigida pelo professor que acompanhará os alunos ou pelos professores ou técnicos disponíveis no momento. Na Figura 23, pode-se verificar que a sala será dotada de ecrãs, que irão acompanhar todo o processo e transmitirão em alguns postos de trabalho o que o operador está a ver, como irá ser explicado na secção 4.



Figura 23 - Secção 1 do Layout da CIA-UBI.

Na secção 2, representada pela Figura 24, é onde tem início a cadeia de valor, com a entrega aos alunos das notas de encomenda para produção, onde serão analisadas as encomendas pelos alunos de forma a cumprirem os prazos de entrega e não serem prejudicados com os custos de não cumprimento do prazo de entrega. É nesta secção que os alunos irão fazer o planeamento da produção. Como referido no subcapítulo anterior, a etapa que se segue na cadeia de valor é o desenvolvimento do produto, que pertence também à secção 2. Esta etapa da cadeia de valor será suprimida no início da CIA-UBI, uma vez que é necessário testar inicialmente todos os postos com um produto criado externamente. Com o desenvolvimento e funcionamento da CIA-UBI, pretende-se que nesta etapa os alunos desenvolvam os produtos especificados pelos clientes fictícios nas notas de encomenda, e que de seguida criem ordens de produção para a impressão dos diversos componentes do produto, assim como as ordens de produção para a montagem desses componentes. Esta última ordem de produção, será criada já no início da CIA-UBI, uma vez que irá ser a ligação entre a secção 2 e a secção 3.



Figura 24 - Secção 2 do Layout da CIA-UBI.

Com a ordem de produção impressa, dá-se o início à montagem do produto, que é parte da secção 3, ilustrada pela Figura 25. Esta secção é composta por 10 postos de trabalho e em cada posto estará um aluno que irá desempenhar funções conforme o posto que lhe foi atribuído. Os postos de trabalho desta secção estão codificados com o número da secção (3) e com a letra do posto (de A a J), para uma melhor identificação dos processos a realizar em cada um dos postos de trabalho.

Cada posto estará munido das ferramentas, materiais e componentes que serão necessários para a montagem do produto. A prateleira situada nesta secção, e visível pela Figura 25, irá possuir também todos esses materiais, ferramentas e componentes necessários à montagem do produto. Nesta secção pretende-se ainda, no futuro, que os alunos através da ordem de produção impressa, consigam verificar todas as ferramentas, materiais e componentes necessárias para o seu posto de trabalho e que se desloquem à prateleira para recolha.

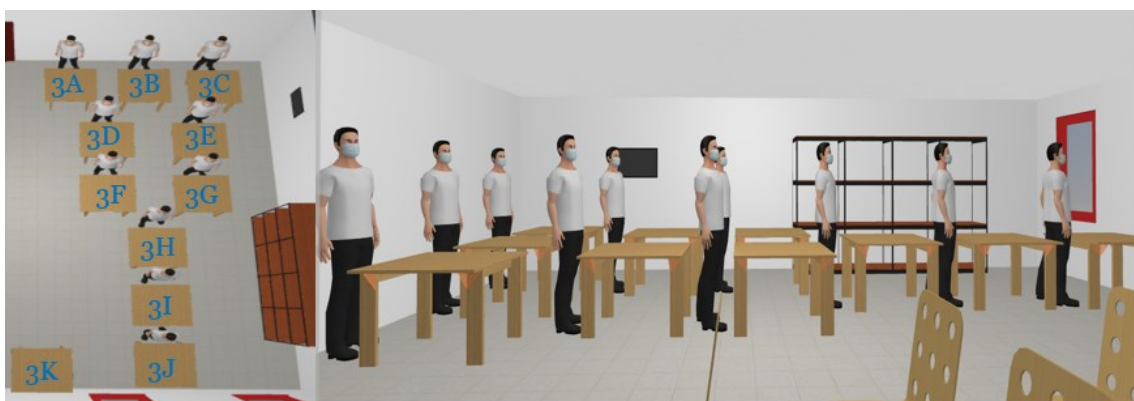


Figura 25 - Secção 3 do Layout da CIA-UBI.

Os postos de trabalho assinalados a azul na Figura 25, de A a J, possuem diferentes funções e representam a linha de montagem do produto. Esta linha terá uma capacidade de 10 alunos. O posto K servirá de local para os produtos acabados, e fará a ponte de ligação entre esta linha, secção 3, para a linha de controlo da qualidade, na secção 4. De seguida, é apresentada a caracterização dos postos de trabalho da secção 3 em detalhe, incluindo as funções a realizar, os componentes a montar, e outros componentes são necessários, assim como as ferramentas indispensáveis para a montagem do produto.

Posto de Trabalho 3A

Neste Posto de Trabalho o aluno deverá, consoante as ordens de produção, que contêm as especificações do cliente, proceder à inserção dos *inserts* nos furos assinalados a vermelho na Tabela 21, ou seja, dois *inserts* nos furos onde os pneus irão ser aparafusados e dois *inserts* onde o chassi frontal e traseiro se irão unir. Neste posto de trabalho, estará sempre presente uma chave de fenda reta fina, para facilitar a inserção do *insert*, e uma caixa com *inserts*. O componente que é trabalhado neste posto é o Chassi Traseiro, que deverá estar colocado dentro de uma caixa perto do posto de trabalho, e onde também estará uma caixa para componentes com defeito.

Tabela 21 - Instruções do Posto de Trabalho 3A.

Posto de Trabalho	Função	Componentes	Outros Componentes	Ferramentas
3A	Inserir os <i>inserts</i> no Chassi Traseiro	1x PCH002	4x PBI015	Chave de fenda reta fina
				

Posto de Trabalho 3B

Conforme ilustrado na Figura 25, este posto de trabalho, trabalha em paralelo com o posto de trabalho 3A e 3C, uma vez que, é possível montar vários componentes do produto sem tarefas que as antecedam. Concretamente neste posto, o aluno tem a função de executar a inserção de dois *insert* nos furos destinados ao aparafusamento dos pneus no Chassi Frontal. Na bancada afeta a este posto de trabalho, será possível encontrar uma ferramenta igual à do posto de trabalho 3A, uma caixa de *inserts*, uma caixa

destinada ao componente que é trabalhado neste posto, o Chassi Frontal, e uma caixa de componentes com defeito.

Tabela 22 - Instruções do Posto de Trabalho 3B.

Posto de Trabalho	Função	Componentes	Outros Componentes	Ferramentas
3B	Inserir os <i>inserts</i> no Chassi Frontal	1x PCH001	2x PBI015	Chave de fenda reta fina
				

Posto de Trabalho 3C

Relativamente ao Posto de Trabalho 3C, este também funciona em paralelo com os postos de trabalhos anteriores, onde a função também é idêntica, mas o componente é diferente. Na Tabela 23 encontram-se ilustrados os furos onde deverão ser inseridos os *inserts*, com a ajuda da chave de fenda reta fina, material e componentes que estarão na bancada deste posto, juntamente com a caixa de *inserts* como nos postos anteriores. O componente neste caso é a Carroçaria Traseira, que posteriormente será unida à Carroçaria Frontal. Caso o aluno verifique a existência de algum defeito, que impeça a montagem, este deverá colocá-lo na caixa própria para componentes com defeito.

Tabela 23 - Instruções do Posto de Trabalho 3C.


Posto de Trabalho	Função	Componentes	Outros Componentes	Ferramentas
3C	Inserir os <i>inserts</i> na Carroçaria Traseira	1x PBW004	2x PBI015	Chave de fenda reta fina
				

Posto de Trabalho 3D

O posto de trabalho 3D trabalha em paralelo com o posto de trabalho 3E, e só é possível estar a funcionar assim até que pelo menos uma tarefa dos postos de trabalho 3A e 3B

esteja completa, isto é, a função deste posto só começa a ser realizada assim que as funções 3A e 3B estejam terminadas. A função deste posto de trabalho é a junção do Chassi Frontal com o Chassi Traseiro, através dos parafusos indicados, com a ajuda de uma chave de punho de estrela. Na Tabela 24, é possível observar onde os dois chassis se vão unir, e onde os dois parafusos serão aparafusados. Tal como nos postos de trabalho anteriores, esta bancada irá possuir uma caixa com os parafusos correspondentes, a ferramenta referida e uma caixa para os componentes com defeito.


Tabela 24 - Instruções do Posto de Trabalho 3D.

Posto de Trabalho	Função	Componentes	Outros Componentes	Ferramentas
3D	Junção do Chassi Frontal com o Chassi Traseiro	1x PCH002 1x PCH001	2x PSC013	Chave de punho Estrela
				

Posto de Trabalho 3E

Conforme ilustrado na Figura 25, este posto trabalha em paralelo com o posto de trabalho anterior. A função que o aluno afeto a este posto, será o da junção da Carroçaria Frontal com a Carroçaria Traseira, através dos parafusos indicados e nos furos assinalados a vermelho na Tabela 25. A bancada deste posto possuirá uma chave de punho estrela, que permitirá aparafusar as duas carroçarias, uma caixa de parafusos e uma caixa para componentes com defeito.


Tabela 25 - Instruções do Posto de Trabalho 3E.

Posto de Trabalho	Função	Componentes	Outros Componentes	Ferramentas
3E	Junção da Carroçaria Frontal com a Carroçaria Traseira	1x PBW003 1x PBW004	2x PSC013	Chave de Punho Estrela
				

Posto de Trabalho 3F

O posto de trabalho 3F, apesar de ser posterior aos postos 3D e 3E, pode ser iniciado sem aguardar que as funções anteriores sejam terminadas, uma vez que a função deste posto é independente das componentes anteriores. Na bancada deste posto o aluno terá que encaixar as jantes interiores e exteriores nos quatro pneus. Pela Tabela 16 e pela Tabela 26 é possível observar que a jante exterior é diferente da jante interior. O aluno terá de ter em conta esta informação uma vez que o pneu foi impresso com rugosidades diferentes para o encaixe de cada jante. Neste posto de trabalho o aluno, terá à sua disposição uma caixa com os pneus, uma caixa com as jantes exteriores e uma caixa com as jantes interiores, e ainda uma lixa que poderá servir para lixar as rugosidades, caso o encaixe não seja perfeito.

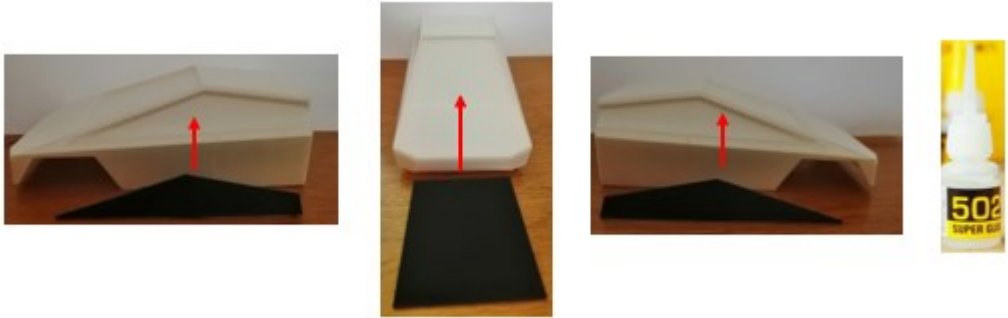
Tabela 26 - Instruções do Posto de Trabalho 3F.

Posto de Trabalho	Função	Componentes	Outros Componentes	Ferramentas
3F	Colocar as Jantes Interiores e exteriores nos Pneus	4xPTU005 4x PRI007 4x PRI008	-	-
				

Posto de Trabalho 3G

Neste posto de trabalho, em paralelo com o posto de trabalho 3F, é realizada a operação de colocar o para-brisas e as janelas direita e esquerda, nos componentes que provêm do posto de trabalho 3E. Na Tabela 27 encontra-se ilustrado onde os alunos terão de colocar e colar com ajuda da supercola, os componentes referidos. De salientar, que conforme ilustrado na Tabela 16 que estes componentes têm minúsculas saliências que indicam a parte que tem que ficar virada para o exterior. Em cima desta bancada será possível encontrar os componentes referidos divididos pelas suas caixas correspondentes e as bisnagas de cola necessárias para fixar as janelas e o para-brisas. Ocorrendo algum defeito que impeça a montagem, os componentes serão colocados numa caixa destinada a componentes com defeito.


Tabela 27 - Instruções do Posto de Trabalho 3G.

Posto de Trabalho	Função	Componentes	Outros Componentes	Ferramentas
3G	Colocar o Para-brisas e a Janela Lateral Esquerda e Direita	1x PWS010 1x PSW011 1x PSW012	PGL017	-
				

Posto de Trabalho 3H

O posto de trabalho 3H funciona em série com os postos anteriores e posteriores, dependendo dos postos de trabalho 3F e 3G para iniciar a sua função. A função que o aluno terá que exercer neste posto é a de aparafusar as rodas do produto, já completas na função do posto 3F, ao conjunto de componentes que saiu do posto de trabalho 3D. Na Tabela 28 é possível observar as instruções que o aluno deverá seguir para aparafusar as rodas. A jante interior é a jante que irá estar em contacto com o chassi (agora já unido), e entre eles será colocada uma anilha, só no final será introduzido o parafuso e aparafusado a roda, ficando a jante exterior, voltada para fora. Neste posto serão aparafusadas as quatro rodas ao chassi, com a ajuda de uma chave de punho estrela, que fará parte das ferramentas deste posto, uma vez que os componentes provêm de outros postos de trabalho. As caixas de anilhas e de parafusos também farão parte deste posto.

Tabela 28 - Instruções do Posto de Trabalho 3H.

Posto de Trabalho	Função	Componentes	Outros Componentes	Ferramentas
3H	Aparafusar as rodas ao Chassi	4x PTU005 1x PCH001 1x PCH002	4x PSC014 4x PRG016	Chave de Punho Estrela
				

Posto de Trabalho 3I

No posto 3I o produto começa a ganhar forma, e depende das funções desempenhadas pelos alunos nos postos de trabalho 3H e 3G. A função deste posto é o de unir a carroçaria ao chassi, através do conjunto de componentes que provêm dos postos 3H e 3G. De salientar, que a ranhura no fim do chassi, visível na Tabela 29, ajuda a perceber onde a parte de trás da carroçaria irá encaixar. A bancada deste posto irá possuir a supercola necessária para a colagem da carroçaria e do chassi.

Tabela 29 - Instruções do Posto de Trabalho 3I.

Posto de Trabalho	Função	Componentes	Outros Componentes	Ferramentas
3I	Unir a Carroçaria com o Chassi	-	PGL017	-

Posto de Trabalho 3J

No último posto de trabalho, o aluno deverá colocar a porta da mala, os pneus sobressalentes e ainda uma etiqueta RFID. Este posto de trabalho é iniciado com o conjunto de componentes que provêm do posto de trabalho 3I. Como pode ser constatado pelas instruções deste posto, na Tabela 30, os pneus sobressalentes serão colocados na parte da frente da mala, e a porta da mala será encaixada nas ranhuras indicadas pela seta a vermelho. A etiqueta RFID, será colocada por baixo do produto, ou seja, por baixo do chassi. Esta etiqueta irá conter toda a informação sobre o produto e todas as especificações que faziam parte da ordem de produção criada na secção 2 da CIA-UBI. O aluno no fim de realizar as funções pretendidas para este posto irá colocar o produto final no posto 3K.

Tabela 30 - Instruções do Posto de Trabalho 3J.

Posto de Trabalho	Função	Componentes	Outros Componentes	Ferramentas
3J	Colocar a Porta da Mala, os Pneus sobressalentes e uma etiqueta RFID	1x PTK009 4xPTS006		

Posto 3K

O posto 3K corresponderá ao local de produtos acabados e é onde todos os produtos montados na linha de montagem da secção 3 irão ser colocados. Neste posto não será necessário a presença de nenhum aluno uma vez que os produtos serão lá colocados pelo aluno do posto de trabalho 3J. Este posto dá como terminado o processo de montagem (secção 3) e faz a ligação com a secção 4, que irá ser detalhada a seguir.

Tabela 31 - Função do Posto 3K.

Posto de Trabalho	Função	Componentes	Outros Componentes	Ferramentas
3K	Local de Produtos Acabados	-	-	-

A secção 4 encontra-se representada na Figura 26, e é onde está implementada a linha de controlo da qualidade, virada para a Indústria 4.0. A secção é composta por sete postos, nomeados com o número da secção (4) e com letras de L a R. Na Figura 26 encontra-se ainda ilustrado um posto da secção anterior, que irá iniciar esta linha de controlo. Nesta secção apenas um aluno estará presente, a acompanhar e a desempenhar funções ao longo da linha. A linha de controlo da qualidade irá possuir diversas tecnologias da Indústria 4.0, com o objetivo de demonstrar aos alunos o que é utilizado, como estas funcionam e as utilidades que podem ter na indústria. É nesta secção que o produto, que

foi montado na secção anterior, vai ser verificado quanto às suas características, e se está ou não conforme o que foi especificado na nota de encomenda do cliente fictício. A secção 4 é a mais complexa, uma vez que todos os postos irão estar interligados através de um sistema ciber-físico, e este irá receber informação e dados de todos os postos de trabalho desta secção.




Figura 26 - Secção 4 do Layout da CIA-UBI.

Os postos desta secção serão automatizados ao máximo, sendo que o aluno que ficar afeto a esta secção terá apenas de acompanhar o processo e desempenhar funções simples de supervisão. Os postos de 4L a 4P são fixos, enquanto o posto 4Q e 4R são móveis. O posto 4Q irá mover-se ao longo de uma calha, conforme ilustrado na Figura 26, desde o posto 3K até ao posto 4P, enquanto o posto 4R irá andar pelas estações fixas. De seguida, será detalhado cada posto desta secção para assim se perceber o que a CIA-UBI terá para demonstrar aos alunos dos diversos anos de Engenharia e Gestão Industrial.

Posto de Trabalho 4L

O processo desta secção inicia-se com o robot do posto 4Q a transportar o produto que acabou de ser montado na secção 3, até ao posto 4L. O aluno no posto 4L terá que utilizar a pistola de leitura de etiquetas RFID e fazer a leitura da etiqueta, que se encontra por baixo do produto. Através da leitura dessa etiqueta, irá surgir num ecrã, junto a esse posto, todas as especificações do produto que acabou de ser montado. A partir dessa leitura o robô do posto 4Q, irá transportar o produto para o posto 4M. Se o aluno detetar algum defeito no produto irá colocá-lo na caixa de recolha para produto não conforme, que se encontrará junto do posto. Na Tabela 32 encontram-se identificadas a função e os componentes que fazem parte deste posto.

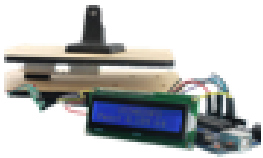
Tabela 32 – Função do Posto de Trabalho 4L.

Posto de Trabalho	Função	Componentes
4L	Leitura da Etiqueta RFID	Bancada
		Pistola de Leitura
		Ecrã
		Caixa de Recolha para Produto Não Conforme
		

Posto de Trabalho 4M

Após o carrinho ser largado pelo robot, proveniente do posto 4L, o aluno terá que colocar o produto na posição correta num sensor de pressão, o qual irá proceder à medição do seu peso e enviar os dados recolhidos para uma base de dados, verificando com os dados obtidos através da leitura da etiqueta RFID, se o peso do produto está conforme as especificações do cliente. Se através desta comparação e partilha de dados, o peso do produto não coincidir com o produto pretendido pelo cliente, este automaticamente vai ser empurrado com ajuda de um braço pneumático para a caixa de recolha para produto não conforme, indicando que o peso do produto não conforme. Este posto terá implementada a tecnologia *Andon* e sempre que houver uma interrupção do processo, o aluno saberá onde deve intervir, uma vez que a linha é automatizada. Caso o peso esteja de acordo com o peso indicado na informação da etiqueta, o produto avançará para o posto seguinte, com a ajuda do robot. Na Tabela 33 encontram-se indicadas as funções do posto, bem como a ilustração do sensor.


Tabela 33 – Função do Posto de Trabalho 4M.

Posto de Trabalho	Função	Componentes
4M	Controlo do Peso do Produto	Bancada
		Sensor de pressão
		Braço Pneumático
		Tecnologia <i>Andon</i>
		Caixa de Recolha para Produto Não Conforme
		

Posto de Trabalho 4N

O posto 4N terá a função de controlar a dimensão do produto, através de lasers (ilustrados na Tabela 34) que irão efetuar o controlo dimensional do produto e enviar esses valores para o sistema, que irá verificar se esses valores estão de acordo ou não com as especificações que foram lidas na etiqueta RFID no posto 4L. Caso os valores satisfaçam as especificações do cliente, o produto está apto para passar ao posto seguinte, caso contrário, o braço pneumático irá empurrá-lo para a caixa de recolha de produto não conforme. Neste posto a tecnologia *Andon* também será implementada, pelas mesmas razões apresentadas para o posto anterior.

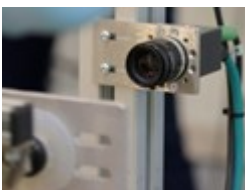
Tabela 34 – Função do Posto de Trabalho 4N.

Posto de Trabalho	Função	Componentes
4N	Controlo Dimensional do Produto	Bancada
		Laser
		Braço Pneumático
		Tecnologia <i>Andon</i>
		Caixa de Recolha para Produto Não Conforme
		

Posto de Trabalho 4O

Neste posto será realizado o controlo das cores do produto através de câmaras, as quais irão verificar se as cores que a etiqueta de RFID leu no primeiro posto coincidem com as cores que o carrinho possui. Neste posto um ecrã irá transmitir essa verificação para que seja visto como se realiza esta verificação. O aluno terá que colocar o produto na posição correta de verificação. Se os dados recolhidos através destas câmaras forem iguais ao pretendido pelo cliente fictício, o produto estará conforme para poder seguir na linha de controlo da qualidade. Caso as cores não sejam as solicitadas, o produto será empurrado para uma caixa de recolha para produto não conforme, de forma análoga à dos postos anteriores. Na Tabela 35 encontra-se a caracterização do posto de trabalho 4O e a ilustração de uma das câmaras que irá verificar as cores do produto.


Tabela 35 – Função do Posto de Trabalho 4O.

Posto de Trabalho	Função	Componentes
4O	Controlo das Cores do Produto	Bancada
		Câmaras
		Ecrã de Controlo
		Braço Pneumático
		Tecnologia <i>Andon</i>
		Caixa de Recolha para Produto Não Conforme
		

Posto de Trabalho 4P

Por fim o posto 4P, será o posto no qual se aplicará o logotipo da Universidade, que indicará que o produto cumpre todas as especificações, que foram lidas pela etiqueta no início do processo. A aplicação deste logotipo será colocada pelo robô do posto 4Q, que será detalhado a seguir. Neste posto o aluno irá selecionar o logotipo a aplicar, enquanto o braço pneumático presente, se encarregará de empurrar o produto para uma caixa de recolha para produto não conforme, que neste caso servirá de local para colocar o produto conforme. Na Tabela 36 são apresentados os logotipos que o aluno poderá escolher através do que o cliente solicitou, assim como a função e os componentes que constituem este posto.


Tabela 36 – Função do Posto de Trabalho 4P.

Posto de Trabalho	Função	Componentes
4P	Aplicação de um Logotipo	Bancada
		Tinta
		Braço Pneumático
		Tecnologia <i>Andon</i>
		Caixa de Recolha para Produto Não Conforme
		

Posto de trabalho 4Q

O posto 4Q irá ter como principal função o transporte do produto desde o posto 3K (secção anterior) até ao posto 4P, onde se irá aplicar um logotipo. O transporte irá ser feito por um braço robot, que irá percorrer uma calha à medida que o aluno der autorização para o passo seguinte, como será detalhado no posto a seguir. A ilustração do robot que se pretende implementar poderá ser observado juntamente com a função e os componentes do posto de trabalho na Tabela 37. Este posto de trabalho será munido também da tecnologia *Andon*, para sinalizar sempre que exista alguma avaria ou congestionamento na área de atuação do robot.

Tabela 37 – Função do Posto de Trabalho 4Q.

Posto de Trabalho	Função	Componentes
4Q	Transporte do Produto entre Postos da Secção 4	Calha
		Tecnologia <i>Andon</i>
		Robot
		

Posto de Trabalho 4R

Este posto é o único ao qual só ficará afeto um aluno. Este irá utilizar uns óculos de Realidade Aumentada que servirão de assistente cognitivo ao longo da linha de controlo da qualidade. Tudo o que o aluno visualizar através dos óculos, será transmitido nos ecrãs da secção 1. Ao longo da linha, o aluno receberá diversas instruções transmitidas através dos óculos de Realidade Aumentada.

No posto 4L, será dada indicação ao aluno para pegar na pistola de leitura RFID e ler a etiqueta do produto e após a leitura, dar autorização para o passo seguinte. Nos postos 4M, 4N e 4O, após o robot deixar o produto, o aluno receberá a instrução para colocar o produto na posição correta, indicada por um desenho que será visualizada através dos óculos, e depois de tudo ser verificado pelos sensores ou câmaras, o aluno dará autorização para prosseguir. Por fim, no posto 4P o aluno escolherá o logotipo que o cliente fictício pediu na nota de encomenda e que lhe foi indicado através da leitura da etiqueta RFID. Na Tabela 38 é possível observar os óculos de realidade aumentada e a função deste posto de trabalho.

Tabela 38 – Função do Posto de Trabalho 4R.

Posto de Trabalho	Função	Componentes
4R	Assistente Cognitivo	Óculos de RA
		Ecrã de Controlo
		

A última secção é a secção 5 (ilustrada na Figura 21), e é uma área destinada a alunos de doutoramento e mestrado que pretendam desenvolver soluções e estratégias para empresas reais. O intuito desta secção é o de as empresas apresentarem problemas que as afetam e em parceria com a CIA-UBI tentarem encontrar soluções e estratégias para esses mesmos problemas. Nesta secção seriam utilizados *softwares* de simulação, através dos quais os alunos poderiam testar as suas ideias, e posteriormente implementá-las na CIA-UBI para demonstração às empresas dessas soluções e vivenciá-las num ambiente-piloto. Estes projetos desenvolvidos seriam disseminados para que a CIA-UBI, e a própria Universidade, tivessem ainda mais visibilidade e se ficasse a conhecer as vantagens que uma parceria universidade-indústria teria. Esta secção será

implementada após a implementação das outras seções. A Figura 27 ilustra o que se pretende implementar na secção 5.



Figura 27 – Secção 5 do Layout da CIA-UBI.

5.4.3. Ferramentas *Lean* e Tecnologia da Indústria 4.0

A implementação da CIA-UBI servirá para os alunos de Engenharia e Gestão Industrial da Universidade da Beira Interior, adquirirem um conhecimento centrado na prática e desenvolverem capacidades para que mais tarde, na indústria, já tenham uma noção da realidade, a qual é diferente da que é lecionada apenas teoricamente, sem experimentos práticos. Com esse fim, a CIA-UBI abordará diversas ferramentas *Lean* ao longo da linha de montagem e de controlo da qualidade, para que os alunos consigam entendê-las melhor e aplicá-las mais tarde no seu trabalho. Não só as ferramentas *Lean* irão ser abordadas, mas também várias tecnologias da Indústria 4.0 serão demonstradas para que os alunos consigam perceber como a tecnologia pode facilitar as tarefas diárias de uma empresa, evitando erros e aumentando a produção, que por sua vez, levará aos lucros.

A vivência dos alunos com estas ferramentas e tecnologias, permitir-lhes-á perceber como as usar mais tarde, para que servem e como podem resolver muitos problemas. Além disso, os alunos irão desenvolver várias *soft skills* que futuramente serão vantajosas no mundo do trabalho, aumentando assim a sua experiência em relação a alunos que apenas tenham adquirido conhecimentos teóricos.

Serão abordadas quatro ferramentas *Lean*, sendo que uma delas será desenvolvida pelos alunos para avaliação. O *Kanban*, o *Poka-Yoke* e o *Andon* serão as ferramentas com que

os alunos irão trabalhar, enquanto o *Value Stream Mapping* será a ferramenta que os alunos irão desenvolver após a sua passagem pela *Learning Factory*.

O *Kanban* começará a ser utilizado na secção 1 e prolongar-se-á até à secção 4, ou seja, desde o planeamento da produção até à linha de controlo da qualidade. Os alunos na secção 1, como explicado no subcapítulo anterior, terão que priorizar as notas de encomenda, convertendo-as em ordens de produção. Através destas ordens os alunos poderão utilizar um quadro *Kanban* em ficheiro Excel, criado no decorrer desta dissertação, conforme apresentado na Figura 28, para lançarem as ordens para a linha de montagem.

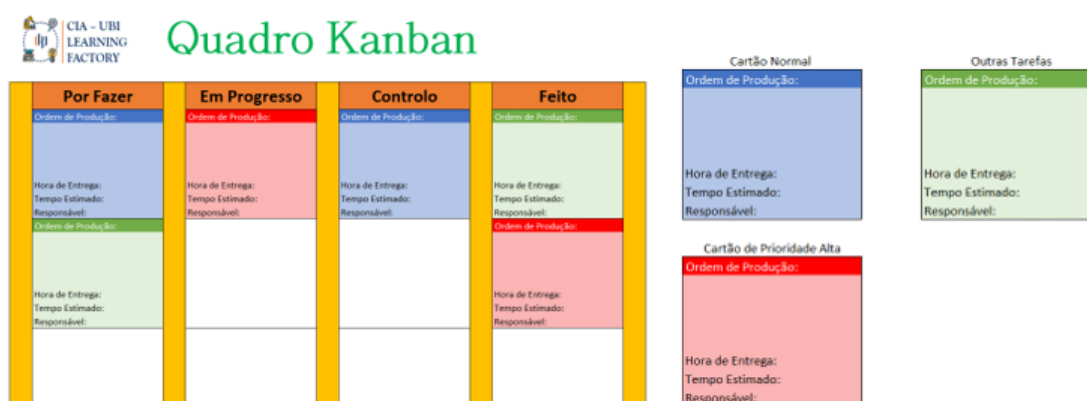


Figura 28 - Quadro *Kanban* desenvolvido para a CIA-UBI.

Os alunos ao priorizarem as encomendas, deverão preencher os cartões respetivos, ilustrados no lado direito da Figura 28, e colocá-los na coluna com a designação “Por Fazer”. É nesta coluna que surgirão todas as ordens de produção que terão que ser realizadas no decorrer da participação dos alunos na sessão da CIA-UBI. Os cartões ilustrados terão que ser preenchidos com o número da ordem de produção, com a hora de entrega da encomenda, com a tempo estimado de montagem e com o nome do responsável da linha.

Quando o processo de montagem for iniciado, o cartão dessa ordem de produção será colocado pelos alunos na coluna com o nome “Em Progresso”. Nesta coluna serão colocados todos os cartões que corresponderem ao que está a ser montado na linha de montagem. Assim, que um produto seja montado e passe para a linha de controlo da qualidade, o cartão correspondente será colocado na coluna denominada por “Controlo”, onde serão colocados todos os cartões que digam respeito aos produtos que estiverem na linha de controlo da qualidade. Assim, que o produto passe pela linha de controlo da

qualidade, o cartão respetivo passará para a coluna designada por “Feito”, indicando que o produto se encontra pronto para entrega ao cliente.

No mesmo ficheiro Excel, os alunos deverão cronometrar a montagem do produto na secção 3, para esse efeito um cronómetro registará a hora a que se iniciou a montagem de um produto e a hora de término da montagem. Assim como, a duração dessa mesma montagem, como representado na Figura 29. Os alunos apenas terão que preencher o número da ordem de produção e clicar nos botões “Start” e “Reset”.

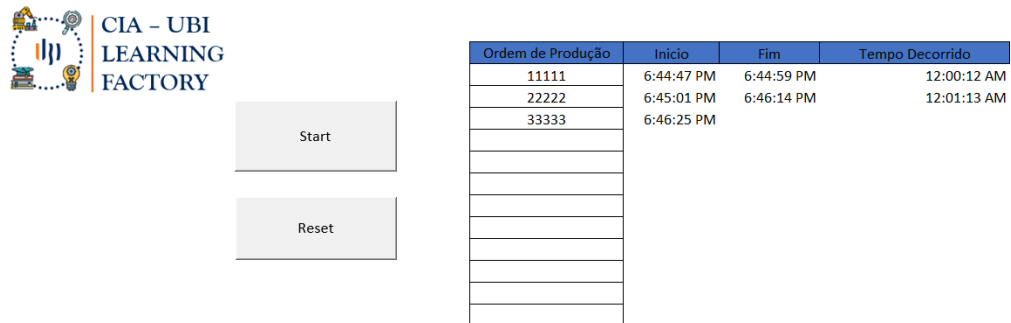


Figura 29 - Cronómetro para contabilizar a duração da montagem.

A ferramenta *Andon* será utilizada na secção 4, na linha de controlo da qualidade em cinco dos sete postos de trabalho, o sistema que se incorporará nos postos de trabalho será idêntico ao ilustrado na Figura 30. Este sistema é composto por três luzes de cores diferentes, verde que corresponderá a que a linha está a funcionar corretamente, amarelo ou laranja que corresponderá à existência de uma anomalia na linha. Neste caso, o amarelo indicará que um produto não está conforme e foi rejeitado através do braço pneumático e o vermelho que a linha parou por alguma avaria ou interrupção provocada pelo aluno.



Figura 30 - Suposto sistema *Andon* a implementar na CIA-UBI.

Quanto à ferramenta *Poka-Yoke*, esta pode ser visualizada e experimentada também na linha de controlo da qualidade. O que se pretende implementar para fazer uso desta ferramenta, através do assistente cognitivo do posto de trabalho 4R, é a colocação de uma

imagem em Realidade Aumentada da posição em que deve ser colocado o carrinho para ser pesado, para verificação das cores pretendidas pelo cliente, e do seu tamanho, uma vez que terá que ter uma posição diferente em cada um dos postos, permitindo a ocorrência de erros e a demora na verificação da qualidade.

Quanto ao *Value Stream Mapping*, os alunos após a sessão na *Learning Factory*, irão, em grupos, aplicar esta ferramenta à cadeia de valor da CIA-UBI, construindo o mapa do estado atual, e posteriormente apresentarem o mapa de estado futuro que propõem. Com este trabalho os alunos conseguirão pensar em formas de melhoria a implementar na CIA-UBI, ao mesmo tempo que desenvolvem capacidades, que os prepara para quando iniciarem a vida profissional.

Em relação às tecnologias da Indústria 4.0, a grande atração da CIA-UBI será o robot do posto de trabalho 4Q. Primeiramente, será implementado um sistema ciber-físico que será a base de toda a linha de controlo da qualidade, ou seja, é este sistema que estabelecerá a ligação a uma parte computacional, onde são armazenados todos os dados. A troca de dados e informações dos equipamentos implementados e a sua análise será realizada através da *Internet of Things*. Esta ligação permitirá a recolha de dados mais eficientemente e melhora a rapidez com que se verifica o produto. As outras tecnologias relativas à Indústria 4.0, que serão implementadas na CIA-UBI, como já referido anteriormente, são a Realidade Aumentada, os vários sensores, as câmaras inteligentes, os *lasers* de dimensionamento e um leitor RFID. De salientar que será o aluno através do assistente cognitivo, que irá dar ordem para o robot ir avançando na linha, permitindo uma interação homem-máquina, através de realidade aumentada. Na CIA-UBI pretende-se numa fase mais avançada implementar a impressão 3D, ou seja, pretende-se que os componentes do produto sejam impressos na *Learning Factory* para assim ser possível demonstrar aos alunos mais uma das tecnologias que caracterizam a indústria 4.0. A simulação como já referida no subcapítulo prévio, será implementado na secção 5 da CIA-UBI para o desenvolvimento de projetos em parcerias com empresas locais e nacionais, destinado a alunos de mestrado e doutoramento.

5.4.4. Unidades Curriculares

A criação da CIA-UBI *Learning Factory* tem como objetivo a integração das atividades desenvolvidas nesta, no plano de estudos dos diversos ciclos de estudo de Engenharia e Gestão Industrial da Universidade da Beira Interior. Na Tabela 39 são apresentadas as unidades curriculares separadas pelos três ciclos de estudos deste curso, que poderão incorporar no seu conteúdo programático a visita ou desenvolvimento de projetos na

CIA-UBI. Esta integração permitirá aos alunos, consolidar a componente teórica das unidades curriculares com uma componente prática num cenário “*on-the-job*” simulado.

Tabela 39 - Possíveis Unidades Curriculares de Engenharia e Gestão Industrial na CIA-UBI.

Ciclo de Estudos	Unidade Curricular
1º	Desenho Industrial
	Sistemas de Informação e Base de Dados
	Simulação Industrial
	Automação e Controlo
	Qualidade, Ambiente e Segurança
2º	Gestão das Operações I
	Gestão das Operações II
	Logística e Distribuição
	Tecnologias de Fabricação
	Fiabilidade e Manutibilidade
	Dissertação
3º	Tese

No primeiro ciclo de estudos, encontra-se prevista a possibilidade de cinco unidades curriculares poderem integrar a CIA-UBI para aprendizagem dos conteúdos programáticos. No 1º ano, do 1º ciclo de estudos, a unidade curricular “Desenho Industrial” poderá apresentar aos alunos a realização de um projeto (no final da unidade curricular), que lhes permita desenvolver novos produtos para a montagem e verificação na linha de controlo da qualidade da CIA-UBI, sendo que o mais viável seria testado na linha pelos alunos.

No 2º ano, do mesmo ciclo de estudos, os alunos como parte final da unidade curricular de Sistemas de Informação e Base de Dados, poderão desenvolver uma base de dados que incorporará a CIA-UBI, virada para os dados que serão recolhidos da linha de controlo da qualidade, e assim apresentar uma proposta de novos sistemas e aplicações para a *Learning Factory*. Quanto ao 3º ano do 1º ciclo de estudos, as unidades curriculares “Simulação Industrial” e “Automação e Controlo”, serão as unidades que poderão ser parte integrante da CIA-UBI. Em relação à Simulação Industrial, poderia ser solicitado aos alunos que desenvolvessem na CIA-UBI Learning Factory um *software*, apresentando novas soluções viáveis, com o intuito de inovar ano após ano a CIA-UBI, ou seja, que desenvolvessem a CIA-UBI virtualmente apresentando novas tecnologias a implementar. Quanto à Automação e Controlo, a aprendizagem de alguns conteúdos programáticos poderia ser voltada para a linha de controlo da qualidade, que possui muitos automatismos, como por exemplo o robot. Na unidade curricular “Qualidade,

Ambiente e Segurança”, os alunos poderão realizar um trabalho sobre o controlo estatístico do processo na CIA-UBI, uma vez que este tema é abordado na mesma.

No 2º ciclo de estudos, os alunos do 1º ano, poderiam visitar as instalações desta *Learning Factory* nas unidades curriculares “Gestão de Operações I”, “Gestão de Operações II”, “Logística e Distribuição” e “Tecnologias de Fabricação”. Em “Logística e Distribuição”, os conteúdos programáticos que são lecionados nas aulas teóricas, poderiam ser aplicados na CIA-UBI com a participação das atividades apenas da secção 3 (linha de montagem). Com base nos conhecimentos adquiridos ena unidade curricular “Gestão de Operações I” os alunos ao frequentarem “Gestão de Operações II” seriam capazes de participar na CIA-UBI desde a primeira secção até à última, acabando por realizarem um *Value Stream Mapping* no final, como avaliação. Quanto a “Tecnologias de Fabricação”, os alunos para além de realizarem um trabalho sobre uma técnica de fabricação, poderiam visitar a CIA-UBI e visualizarem a impressão 3D dos componentes do produto, assim que esta estiver implementada na CIA-UBI.

Nas unidades curriculares “Dissertação” do 2º ciclo e na Tese” do 3º ciclo, os alunos poderão utilizar os recursos da secção 5 para desenvolverem trabalhos em parceria com a indústria.

5.4.5. Custos Estimados e Reais de Implementação

A implementação da CIA-UBI *Learning Factory* terá custos de implementação com a aquisição de diverso material para montagem da linha de controlo da qualidade. A seguir é apresentado na Figura 31, 32, 33, 34 e 35 todos os custos separados por cinco categorias, sendo elas denominadas por Quadro, Estações, Sensores, Equipamento e Outros. Nas figuras são apresentadas as colunas referentes à quantidade de material necessário, o custo estimado, o custo real e os custos respetivos totais de cada item. De salientar, que os preços reais foram obtidos através de uma consulta a uma empresa da região.

Os custos de implementação relativos ao Quadro referem-se aos componentes que serão necessários para programar e interligar todas as estações da linha de controlo da qualidade, uma vez que esta linha irá ser automatizada ao máximo. Na Figura 31, é possível verificar que os custos destes componentes é o real, perfazendo um total de 4.493,51 €.

Categoria	Itens	Quantidade	Custo Estimado	Custo Real	Custo Estimado Total	Custo Real Total
Quadro	S7 1200 Segurança	1		935,77 €	0 €	935,77 €
Quadro	Carta RS232 S7 1200	1		147,44 €	0 €	147,44 €
Quadro	16 DIN Safety S7 1200	1		193,67 €	0 €	193,67 €
Quadro	4DOUT Safety S7 1200	1		193,67 €	0 €	193,67 €
Quadro	CPU 1214C AC/DC 14DI/10DQ/2AI	3		367,57 €	0 €	1 102,71 €
Quadro	16DIN/16DOUT SM1223 DC/RLY	4		270,00 €	0 €	1 080,00 €
Total			0,00 €	2 108,12 €	0,00 €	3 653,26 €

Subtotal	0,00 €	3 653,26 €
IVA – 23%	0,00 €	840,25 €
Total	0,00 €	4 493,51 €
Total Estimado+Real	4 493,51 €	

Figura 31 - Custos de Implementação - Quadro.

Cada estação da linha de controlo da qualidade irá possuir uma bancada e alguma tecnologia incorporada. Através da Figura 32, é possível verificar que os custos relativos às estações também são reais e perfazem um total de 10.190,21 €. Importa referir, que a linha de controlo da qualidade tem cinco postos, mas apenas quatro deles serão equipados com as bancadas e respetiva tecnologia.

Categoria	Itens	Quantidade	Custo Estimado	Custo Real	Custo Estimado Total	Custo Real Total
Estações	Quadro para cada posto com eletrificação, alimentação, proteção e switch	3		960,00 €	0 €	2 880,00 €
Estações	Quadro para cada posto com eletrificação com consola, alimentação, proteção e switch	1		1 230,00 €	0 €	1 230,00 €
Estações	Sistema pneumático para cada uma das bancadas	4		195,00 €	0 €	780,00 €
Estações	Torre de sinalização 3 cores c/buzzer	4		103,68 €	0 €	414,72 €
Estações	Botoneira para colocação em bancada com Emergência, start-stop e seletor de manual/automático	4		95,00 €	0 €	380,00 €
Estações	Bancada mecânica c/platine para colocação de equipamentos	4		650,00 €	0 €	2 600,00 €
Total			0,00 €	3 233,68 €	0,00 €	8 284,72 €

Subtotal	0,00 €	8 284,72 €
IVA – 23%	0,00 €	1 905,49 €
Total	0,00 €	10 190,21 €
Total Estimado+Real	10 190,21 €	

Figura 32 - Custos de Implementação - Estações.

A outra categoria definida são os sensores que irão ser divididos pelas estações da linha de controlo da qualidade. Pela Figura 33, é possível verificar que é a categoria com menores custos, perfazendo um total de 1.818,28€. Os preços apresentados nesta categoria, são preços reais.

Categoria	Itens	Quantidade	Custo Estimado	Custo Real	Custo Estimado	Custo Real Total
Sensores	Sensor capacitivo M8	1		128,96 €	0 €	128,96 €
Sensores	Sensor indutivo M8	1		36,72 €	0 €	36,72 €
Sensores	Fotocélula com espelho	1		95,16 €	0 €	95,16 €
Sensores	Fotocélula reflexão objeto	1		82,65 €	0 €	82,65 €
Sensores	Sensor laser de distância 3m	1		404,79 €	0 €	404,79 €
Sensores	Sistema de célula de carga 30kg Profinet	1		730,00 €	0 €	730,00 €
Total			0,00 €	1 478,28 €	0,00 €	1 478,28 €
				Subtotal	0,00 €	1 478,28 €
				IVA – 23%	0,00 €	340,00 €
				Total	0,00 €	1 818,28 €
				Total Estimado+Real	1 818,28 €	

Figura 33 - Custos de Implementação - Sensores.

Quanto aos equipamentos que terão que ser adquiridos, é de frisar que os óculos de Realidade Aumentada e Virtual da *Microsoft* já foram adquiridos à data da presente dissertação, mas também se encontram contabilizados na proposta de implementação da CIA-UBI. Na Figura 34, é verificável que existe um item que apresenta um preço estimado e sendo o item mais caro da CIA-UBI, o robot do posto de trabalho 4Q. O valor é estimado uma vez que não foi possível saber o valor exato, mas estima-se que custará cerca de 10.000,00 € sem impostos e na condição de usado. Os restantes componentes são apresentados com os custos reais e esta categoria possui o custo mais elevado, por serem equipamentos de alta tecnologia. A soma do custo total estimado com o real perfaz os 23.213,81 €.

Categoria	Itens	Quantidade	Custo Estimado	Custo Real	Custo Estimado	Custo Real Total
Equipamento	Microsoft HoloLens 2	1		4 065,03 €	0 €	4 065,03 €
Equipamento	Robot Kuka (Usado)	1	10 000,00 €		10 000 €	0,00 €
Equipamento	Consola Siemens 7"	1		520,88 €	0 €	520,88 €
Equipamento	Leitor RFID Omron Peq. Profinet (sem Tags)	1		1 054,91 €	0 €	1 054,91 €
Equipamento	Câmara FQ2 Omron profibus	1		3 232,20 €	0 €	3 232,20 €
Total			10 000,00 €	8 873,02 €	10 000,00 €	8 873,02 €
				Subtotal	10 000,00 €	8 873,02 €
				IVA – 23%	2 300,00 €	2 040,79 €
				Total	12 300,00 €	10 913,81 €
				Total Estimado+Real	23 213,81 €	

Figura 34 - Custos de Implementação - Equipamento.

Por último, a categoria designada por Outros diz respeito à programação e montagem de todos os equipamentos pela empresa fornecedora dos componentes, assegurando assim que a CIA-UBI fica a funcionar corretamente e sem se correr o risco de perda de garantias dos equipamentos. O custo desta categoria perfaz os 5.166,00 €.

Categoria	Itens	Quantidade	Custo Estimado	Custo Real	Custo Estimado	Custo Real Total
Outros	Programação e Montagem	1		4 200,00 €	0 €	4 200,00 €
Total			0,00 €	4 200,00 €	0,00 €	4 200,00 €
				Subtotal	0,00 €	4 200,00 €
				IVA – 23%	0,00 €	966,00 €
				Total	0,00 €	5 166,00 €
				Total Estimado+Real	5 166,00 €	

Figura 35 - Custos de Implementação - Outros.

Na Tabela 40, são apresentados os custos de cada categoria e o custo total da implementação da CIA-UBI. O valor do custo estimado e real da implementação da *Learning Factory* na Universidade da Beira Interior perfaz um total de 44.881,81 €. Este valor poderá ser o mínimo que custará implementar a CIA-UBI, uma vez que estes valores podem ascender até aos 50.000,00 €, uma vez que o componente com o valor estimado poderá variar e também na aquisição de algum material necessário não constante das figuras, como por exemplo mobiliário e algumas ferramentas para a linha de montagem.

Tabela 40 - Custo Total de Implementação da CIA-UBI Learning Factory.

Categoria	Custo Estimado e Real
Quadro	3 653,26 €
Estações	8 284,72 €
Sensores	1 478,28 €
Equipamentos	18 873,02 €
Outros	4 200,00 €
Subtotal	36 489,28 €
IVA - 23%	8 392,53 €
Custo de Implementação	44 881,81 €

6. Conclusões

Torna-se cada vez mais impreterível a existência de uma mão-de-obra qualificada para integrar a indústria, devido à evolução da tecnologia neste setor. Para que isto aconteça a formação dos alunos no ensino universitário deverá sofrer mudanças. A mudança passará pela introdução de um ensino mais experimental conjugado com o ensino teórico, que é lecionado atualmente. Esta mudança permitirá aos alunos que ingressarem nas universidades vivenciarem um ensino com bases teóricas, mas direcionado para a prática, no qual possam simular situações reais e experimentarem várias ferramentas e tecnologias com que a indústria trabalha diariamente.

Com o aparecimento de novas tecnologias e com o crescimento da economia, as empresas atingem cada vez patamares mais elevados de competitividade. Hoje em dia, têm surgido alguns desafios com que as empresas têm dificuldade em lidar e resolver, uma vez que as tecnologias atuais são equipamentos de alguma complexidade. Uma qualificação mais especializada dos alunos do ensino superior, poderá permitir capacitar as empresas para melhor conseguirem se adaptar e responder aos novos desafios. Esta qualificação obter-se-ia através do contacto com a tecnologia que é utilizada na indústria e com as diversas ferramentas que são lecionadas, como por exemplo as do *Lean Manufacturing*, mas não são experienciadas em termos práticos.

A futura implementação da CIA-UBI Learning Factory na Universidade da Beira Interior, permitirá aos alunos que frequentam, e venham a ingressar, o curso de Engenharia e Gestão Industrial, terem aulas mais dinâmicas e com programas mais apelativos, que ao mesmo tempo lhes permitirá adquirir competências e ganhar experiência na utilização de diversas ferramentas e tecnologias num ambiente de fábrica. A CIA-UBI Learning Factory caracterizar-se-á por ter como propósito a educação e a investigação, abordando conteúdos pertinentes para os dias de hoje na indústria e terá a função de ser um facilitador para o desenvolvimento de investigação em parcerias com empresas. O processo que será implementado permitirá que os alunos experienciem uma cadeia de valor real desde o pedido do cliente até á finalização deste, com uma linha de montagem em que os alunos vão participar e uma linha de controlo da qualidade automatizada. Através deste processo os alunos conseguirão perceber e implementar na prática ou que retiveram da teoria lecionada nas aulas teóricas. O produto escolhido para produção na CIA-UBI é composto por diversos componentes que permitirá aos alunos montarem o produto e utilizarem algumas ferramentas *Lean* e posteriormente verificarem na linha de controlo da qualidade se o produto está conforme o pedido pelo cliente. Relativamente

à didática a CIA-UBI proporcionará aos alunos/participantes um ensino instrutivo e demonstrativo, de modo que estes possam vivenciar e visualizar o ambiente de fábrica. A avaliação do sucesso do processo de aprendizagem selecionado permitirá que os responsáveis pela *Learning Factory* obtenham um *feedback* do que os alunos experienciaram, de modo a auxiliar na introdução de melhorias e de novas valências, mas também permitirá ao aluno desenvolver competências. Quanto à futura conceção da CIA-UBI, esta será dividida em cinco secções diferentes, mas todas interligadas, onde os alunos poderão através de várias unidades curriculares desenvolver trabalhos e projetos em parceria com empresas. A presença de ferramentas *Lean* e tecnologias da Indústria 4.0 na CIA-UBI, nas várias secções, permitirá ao aluno estar em contacto direto com estas, e mais tarde saber aplicá-las no mundo num contexto real de trabalho. As diversas células de produção criadas permitirão ao aluno vivenciar o ambiente de chão de fábrica através da realização das várias tarefas. A implementação desta *Learning Factory*, permitirá beneficiar o ensino de várias unidades curriculares dos três ciclos de estudo de Engenharia e Gestão Industrial, uma vez que os conteúdos programáticos lecionados aos alunos em cada unidade curricular poderão ser conjugados com uma parte prática na CIA-UBI, ou indiretamente com o desenvolvimento de trabalhos. Os custos estimados da implementação da CIA-UBI totalizam cerca de cinquenta mil euros. Apesar de ser uma quantia avultada, parte deste valor será financiado pelo projeto INDTECH 4.0, ficando a restante verba a cargo da Universidade e da captação de fundos privados.

Espera-se que a presente dissertação sirva de apoio e guia para a implementação da CIA-UBI, uma vez que foi caracterizada segundo o modelo descritivo multidimensional, aceite convencionalmente pela comunidade académica, idealizado e detalhado em pormenor, apresentado todas as unidades curriculares que poderão associar-se e tirar partido desta implementação e calculado os custos estimados da implementação. A potencialidade que uma fábrica de aprendizagem poderá trazer para a Universidade da Beira Interior compensará os custos avultados apresentados e contribuirá para melhorar o ensino e investigação desenvolvidos na Universidade. Espera-se que com a disseminação dos resultados obtidos na CIA-UBI, as empresas se queiram associar a esta, para o desenvolvimento e teste de projetos. Por sua vez tornar-se-á uma mais-valia para os estudantes que frequentarem o curso de Engenharia e Gestão Industrial, pelo facto de estarem em contacto com as empresas e com a indústria, ganhado assim experiência e adquirindo *soft skills*, que um dia mais tarde lhes serão úteis profissionalmente.

6.1. Limitações

A presente dissertação sofreu algumas limitações devido à situação pandémica que o país atravessa. Não possível implementar a CIA-UBI, uma vez que os equipamentos necessários ainda não foram entregues, não tendo por isso sido possível testá-la conforme era pretendido. O assistente cognitivo dos postos de trabalho era para ser desenvolvido e explicado na presente dissertação, mas a falta de licenças e as restrições temporais para as adquirir, levaram ao seu não desenvolvimento.

Referências Bibliográficas

- Abele, E., Chryssolouris, G., Sihn, W., Metternich, J., ElMaraghy, H., Seliger, G., Sivard, G., ElMaraghy, W., Hummel, V., Tisch, M., Seifermann, S., 2017. Learning factories for future oriented research and education in manufacturing. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 66, 803–826. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.005>
- Abele, E., Metternich, J., Tisch, M., 2019. Learning Factories Concepts, Guidelines, Best-Practice Examples. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-92261-4>
- Abele, E., Metternich, J., Tisch, M., Chryssolouris, G., Sihn, W., ElMaraghy, H., Hummel, V., Ranz, F., 2015. Learning factories for research, education, and training. *Procedia CIRP* 32, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.187>
- Abele, E., Tenberg, R., Wennemer, J., Cachay, J., 2010. Kompetenzentwicklung in Lernfabriken für die Produktion. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetr.* 105, 909–913. <https://doi.org/10.3139/104.110415>
- Adam, M., Hofbauer, M., Stehling, M., 2020. Effectiveness of a lean simulation training: challenges, measures and recommendations. *Prod. Plan. Control* 0, 1–11. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1742375>
- Ahmad, R., Masse, C., Jituri, S., Doucette, J., Mertiny, P., 2018. Alberta Learning Factory for training reconfigurable assembly process value stream mapping. *Procedia Manuf.* 23, 237–242. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.023>
- Amaro, P., Alves, A.C., Sousa, R.M., 2019. Lean Thinking : A Transversal and Global Management Philosophy to Achieve Sustainability Benefits. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-13515-7>
- Art of Lean, 2000. TOYOTA PRODUCTION SYSTEM BASIC HANDBOOK.
- Astromskis, S., Janes, A., Sillitti, A., Succi, G., 2013. Andon for dentists. *Proc. Int. Conf. Softw. Eng. Knowl. Eng. SEKE 2013-Janua*, 147–152.
- Auberger, E., Karre, H., Ramsauer, C., 2019. Introduction of a new product in an operating assembly process at Graz University of Technologýs LEAD Factory. *Procedia Manuf.* 31, 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.017>
- AulaFacil, 2021. Células de producción [WWW Document]. URL <https://www.aulafacil.com/cursos/estrategia/lean-manufacturing/celulas-de-produccion-l20026> (accessed 2.16.21).
- Baena, F., Guarín, A., Mora, J., Sauza, J., Retat, S., 2017. Learning Factory: The Path to Industry 4.0. *Procedia Manuf.* 9, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.022>

- Bahrin, M.A.K., Othman, M.F., Azli, N.H.N., Talib, M.F., 2016. INDUSTRY 4.0: A REVIEW ON INDUSTRIAL AUTOMATION AND ROBOTIC. *J. Teknol.* 78, 2180–3722.
- Bălan, E., Janlă, L.M., 2019. Solving Quality Problems With the Poka-Yoke Tool Assistance. Case Study. *Ann. Acad. Rom. Sci. Ser. Eng. Sci.* 11, 5.
- Barton, H., Delbridge, R., 2001. Development in the learning factory: Training human capital. *J. Eur. Ind. Train.* 25, 465–472. <https://doi.org/10.1108/03090590110410313>
- Baur, C., Wee, D., 2015. Manufacturing's next act [WWW Document]. McKinsey Co. URL <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/manufacturings-next-act> (accessed 3.4.21).
- Bhattacharjee, A., 2012. Social Science Research: Principles, Methods, and Practices, Collection. ed, Pure and Applied Chemistry. Textbooks. <https://doi.org/10.1351/pac198961091657>
- Bi, Z., Wang, X., 2020. Group Technology and Cellular Manufacturing, in: Computer Aided Design and Manufacturing. John Wiley & Sons Ltd, pp. 281–329.
- Bitkom e. V., V., V. e., ZVEI e. V. associations, 2016. Implementation Strategy Industrie 4.0 - results. <https://doi.org/978-3-00-052211-6>
- Bloem, J., Van Doorn, M., Duivestijn, S., Excoffier, D., Maas, R., Van Ommeren, E., 2014. The Fourth Industrial Revolution-Things to Tighten the Link Between IT and OT 3.
- Bongomin, O., Gilibrays Ocen, G., Oyondi Nganyi, E., Musinguzi, A., Omara, T., 2020. Exponential Disruptive Technologies and the Required Skills of Industry 4.0. *J. Eng. (United Kingdom)* 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/4280156>
- Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., Rosenberg, M., 2014. How virtualization, decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective. *Int. J. Inf. Commun. Eng.* 8, 37–44.
- Canel, C., Al-Mubarak, F., Khumawala, B.M., 2005. A comparison of focused cellular manufacturing to cellular manufacturing and job shop. *Int. J. Prod. Res.* 43, 2169–2194. <https://doi.org/10.1080/00207540412331331407>
- Carvalho, C. V., Lopes, M.P., Ramos, A.G., Avila, P., Bastos, J., Fonseca, L., Martens, I., 2013. Lean learning academy: An innovative framework for lean manufacturing training. *Proc. - 2013 1st Int. Conf. Port. Soc. Eng. Educ. CISPEE 2013.* <https://doi.org/10.1109/CISPEE.2013.6701958>
- Chaudhari, M., Dharavath, S., 2014. Study of Smart Sensors and their Applications. *Int. J. Adv. Res. Comput. Commun. Eng.* 3, 5031–5034.

- Chen, T., Lin, Y.-C., 2016. Feasibility Evaluation and Optimization of a Smart Manufacturing System Based on 3D Printing: A Review. *Int. J. Intell. Syst.* 29, 495–524. <https://doi.org/10.1002/int>
- Consul, J.T., 2015. Aplicação de Poka Yoke em processos de caldeiraria. *Production* 25, 678–690. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.084012>
- Dadios, E.P., Culaba, A.B., Albert, J.R.G., Paqueo, V.B., Orbeta, A.C.J., Serafica, R.B., Bandala, A.A., Bairan, J.C.A.C., 2018. Preparing the Philippines for the Fourth Industrial Revolution: A Scoping Study. *PIDS Discuss. Pap. Ser.* 1–109.
- Danovaro, E., Janes, A., Succi, G., 2008. Jidoka in software development. *Proc. Conf. Object-Oriented Program. Syst. Lang. Appl. OOPSLA* 827–830. <https://doi.org/10.1145/1449814.1449874>
- Dave, P.Y., 2020. The History of Lean Manufacturing by the view of Toyota-Ford.
- Deloitte, 2018. Exponential technologies in manufacturing. *Singul. Univ.* 64.
- Deloitte, 2015. Industry 4.0 - Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies. <https://doi.org/10.1201/9780849338960.ch120>
- Demirci, O., Gunduz, T., 2020. Combined application proposal of value stream mapping (VSM) and methods time measurement universal analyses system (MTM-UAS) methods in textile industry 31, 234–250.
- Deshkar, A., Kamle, S., Giri, J., Korde, V., 2018. Design and evaluation of a Lean Manufacturing framework using Value Stream Mapping (VSM) for a plastic bag manufacturing unit. *Mater. Today Proc.* 5, 7668–7677. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.442>
- Devika, Raj, P., Venugopal, A., Thiede, B., Herrmann, C., Sangwan, K.S., 2020. Development of the transversal competencies in learning factories. *Procedia Manuf.* 45, 349–354. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.031>
- Di Nardo, M.D., Forino, D., Murino, T., 2020. The evolution of man–machine interaction: the role of human in Industry 4.0 paradigm. *Prod. Manuf. Res.* 8, 20–34. <https://doi.org/10.1080/21693277.2020.1737592>
- Dilanthi, M.G., 2015. Conceptual Evolution of Lean Manufacturing a Review of Literature. *Int. J. Econ. Commer. Manag. United Kingdom III*, 574–585.
- Drew, J., McCallum, B., Roggenhofer, S., 2004. The Essence of Lean, in: *Journey to Lean: Making Operational Change Stick*. pp. 15–16.
- El-namrouty, K.A., Abushaaban, M.S., 2013. Seven wastes elimination targeted by lean manufacturing case study “ gaza strip manufacturing firms ” 1, 68–80. <https://doi.org/10.11648/j.ijefm.20130102.12>

- Elbestawi, M., Centea, D., Singh, I., Wanyama, T., 2018. SEPT Learning Factory for Industry 4.0 Education and Applied Research. *Procedia Manuf.* 23, 249–254. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.025>
- Enke, J., Tisch, M., Metternich, J., 2016. Learning Factory Requirements Analysis-Requirements of Learning Factory Stakeholders on Learning Factories. *Procedia CIRP* 55, 224–229. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.026>
- Erkayman, B., 2018. Transition to a JIT production system through ERP implementation: a case from the automotive industry. *Int. J. Prod. Res.* 57, 5467–5477. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1527048>
- Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K., Sihm, W., 2016. Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production. *Procedia CIRP* 54, 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.162>
- Everett, R.J., Sohal, A.S., 1991. Individual Involvement and Intervention in Quality Improvement Programmes: Using The Andon System. *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*
- Gattullo, M., Scurati, G.W., Fiorentino, M., Uva, A.E., Ferrise, F., Bordegoni, M., 2019. Towards augmented reality manuals for industry 4.0: A methodology. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 56, 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.10.001>
- Gaub, H., 2016. Customization of mass-produced parts by combining injection molding and additive manufacturing with Industry 4.0 technologies. *Reinf. Plast.* 60, 401–404. <https://doi.org/10.1016/j.repl.2015.09.004>
- Gento, A.M., Pimentel, C., Pascual, J.A., 2020. Lean school: an example of industry-university collaboration. *Prod. Plan. Control* 0, 1–16. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1742373>
- Ghobakhloo, M., 2020. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *J. Clean. Prod.* 252, 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
- Ghobakhloo, M., 2018. The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. *J. Manuf. Technol. Manag.* 34, 1–5.
- Gilchrist, A., 2016. Industry 4.0 - The industrial internet of things, *IEEE Network*. <https://doi.org/10.1109/MNET.2019.8863716>
- Gjeldum, N., Mladineo, M., Veza, I., 2016. Transfer of Model of Innovative Smart Factory to Croatian Economy Using Lean Learning Factory. *Procedia CIRP* 54, 158–163. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.096>
- Goshime, Y., Kitaw, D., Jilcha, K., 2018. Lean manufacturing as a vehicle for improving productivity and customer satisfaction A literature review on metals and. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-06-2017-0063>
- Gupta, S., Jain, S.K., 2013. A literature review of lean manufacturing. *Int. J. Manag. Sci. Eng. Manag.* 8, 241–249. <https://doi.org/10.1080/17509653.2013.825074>

- Helmold, M., 2020. Lean Management and Kaizen, Management for Professionals.
- Holweg, M., 2007. The genealogy of lean production. *J. Oper. Manag.* 25, 420–437.
<https://doi.org/10.1016/j.jom.2006.04.001>
- Houshyar, A.N., Leman, Z., Moghadam, H.P., Ariffin, M.K.A.M., Ismail, N., Iranmanesh, H., 2014. Literature review on dynamic cellular manufacturing system. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 58. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/58/1/012016>
- Hyde, W.F., 1981. Improving Productivity by Classification, Coding and Data Base Standardization: The Key to Maximizing CAD/CAM and Group Technology. New York.
- Hyer, N.L., Brown, K.A., 1999. Discipline of real cells. *J. Oper. Manag.* 17, 557–574.
[https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(99\)00003-0](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(99)00003-0)
- Imai, M., 1986. Kaizen The Key To Japan´s Competitive Success.
- ITA, 2015. Effects of Industry 4.0 on vocational education and training. *ITA Manusc.* 15, 51.
- Järvenpää, E., Lanz, M., 2019. Lean Manufacturing and Sustainable Development.
- Jorgensen, J.E., Lamancusa, J.S., Zayas-Castro, J.L., Ratner, J., 1995. The learning factory - Curriculum Integration of Design and Manufacturing. *Proc. World Conf. Eng. Educ.*
- Kamble, S.S., Gunasekaran, A., Gawankar, S.A., 2018. Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Saf. Environ. Prot.* 117, 408–425.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>
- Kareem Sakran, H., Majeed Mahbuba, H., Saleh Jafer, A., 2016. A Review of a Basic Concept of Cellular Manufacturing. *Int. J. Des. Manuf. Technol.* 8, 30–37.
- Karre, H., Hammer, M., Kleindienst, M., Ramsauer, C., 2017. Transition towards an Industry 4.0 State of the LeanLab at Graz University of Technology. *Procedia Manuf.* 9, 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.006>
- Kemény, Z., Nacsá, J., Erdos, G., Glawar, R., Sihm, W., Monostori, L., Ilie-Zudor, E., 2016. Complementary Research and Education Opportunities - A Comparison of Learning Factory Facilities and Methodologies at TU Wien and MTA SZTAKI. *Procedia CIRP* 54, 47–52. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.064>
- Klee, H., Allen, R., 2018. Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink, Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink.
<https://doi.org/10.1201/9781420044195>
- Kolberg, D., Knobloch, J., Zühlke, D., 2017. Towards a lean automation interface for workstations. *Int. J. Prod. Res.* 55, 2845–2856.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1223384>

- Krafcik, J.F., 1988. Triumph of the Lean Production System.
- Kreß, A., Metternich, J., 2020. System development for the configuration of learning factories. *Procedia Manuf.* 45, 146–151. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.086>
- Krittanawong, C., Zhang, H.J., Wang, Z., Aydar, M., Kitai, T., 2017. Artificial Intelligence in Precision Cardiovascular Medicine. *J. Am. Coll. Cardiol.* 69, 2657–2664. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.03.571>
- Kumar, R., Dwivedi, R.K., Verma, A., 2016. Poka-yoke technique, methodology & design. *Indian J. Eng.* <https://doi.org/10.1016/j.indeng.2016.03.001>, 362-370
- Kundgol, S., Petkar, P., Gaitonde, V.N., 2020. Implementation of value stream mapping (VSM) upgrading process and productivity in aerospace manufacturing industry. *Mater. Today Proc.* <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.282>
- Küsters, D., Praß, N., Gloy, Y.S., 2017. Textile Learning Factory 4.0 – Preparing Germany’s Textile Industry for the Digital Future. *Procedia Manuf.* 9, 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.035>
- Lamancusa, J.S., Simpson, T.W., 2004. The Learning Factory – 10 Years of Impact at Penn State. *Int. Conf. Eng. Educ.* 1–8.
- Lamancusa, J.S., Zayas, J.L., Soyster, A.L., Morell, L., Jorgensen, J., 2008. The learning factory: Industry-partnered active learning. *J. Eng. Educ.* 97, 5–11. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2008.tb00949.x>
- Lazarevic, M., 2019. A Systematic Literature Review of Poka-Yoke and Novel Approach to Theoretical Aspects 65, 454–467. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2019.6056>
- Lee, J., Bagheri, B., Kao, H., 2015. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0 - based manufacturing systems. *Manuf. Lett.* 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Lehekar, M.P., Urne, M., 2017. Implementation of Kanban. *Int. J. Trend Sci. Res. Dev.* Volume-1, 598–621. <https://doi.org/10.31142/ijtsrd4616>
- Levinson, W.A., 2002. Henry’s Ford Lean Vision: Enduring Principles from the first Ford Motor Plant, 1st Editio. ed. Productivity Press.
- Li, J., Blumenfeld, D.E., 2006. Quantitative analysis of a transfer production line with Andon 837–846. <https://doi.org/10.1080/07408170600733228>
- Liker, J.K., 2004. The Toyota Way: 14 Management Principles from the World’s Greatest Manufacturer.
- Lin, C.J., Chen, F.F., Chen, Y.M., 2013. Knowledge kanban system for virtual research and development. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 29, 119–134. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.04.020>

- Lu, Y., 2017. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *J. Ind. Inf. Integr.* 6, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- Mashelkar, R.A., 2018. Exponential Technology , Industry 4.0 and Future of Jobs in India 1–20. <https://doi.org/10.1177/0974929218774408>
- Matt, D.T., Rauch, E., Dallasega, P., 2014. Mini-factory - A learning factory concept for students and small and medium sized enterprises. *Procedia CIRP* 17, 178–183. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.057>
- Mavrikios, D., Papakostas, N., Mourtzis, D., Chryssolouris, G., 2013. On industrial learning and training for the factories of the future: A conceptual, cognitive and technology framework. *J. Intell. Manuf.* 24, 473–485. <https://doi.org/10.1007/s10845-011-0590-9>
- Melton, T., 2005. What Lean Thinking has to Offer the Process Industries 662–673. <https://doi.org/10.1205/cherd.04351>
- Mohamad, E., Rahman, M.S.A., Ito, T., Rahman, A.A.A., 2019. Framework of Andon Support System in Lean Cyber-Physical System Production Environment. *Proc. Manuf. Syst. Div. Conf. 2019*, 404. <https://doi.org/10.1299/jsmemsd.2019.404>
- Neacsu, G.C., Pascu, I.G., Nitu, E.L., Gavriluta, A.C., 2021. Brief review of methods and techniques used in Learning Factories in the context of Industry 4.0. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 1018, 0–14. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1018/1/012022>
- Ohno, T., 1988. *Toyota Production System. Beyond Large-Scale Production.* Productivity Press, Portland, Oregon.
- Okpala, C.C., 2014. Tackling Muda – The Inherent Wastes in Manufacturing Processes. *Int. J. Adv. Eng. Technol.* V.
- Pagliosa, M., Tortorella, G., Ferreira, J.C.E., 2019. Industry 4.0 and Lean Manufacturing: A systematic literature review and future research directions. *J. Manuf. Technol. Manag.* <https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2018-0446>
- Parashar, B.S.N., 2009. *Cellular Manufacturing Systems - An Integrated Approach.* PHI Learning.
- Pattanaik, L.N., Sharma, B.P., 2009. Implementing lean manufacturing with cellular layout: A case study. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 42, 772–779. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1629-8>
- Penn State University, 2021. Bernard M. Gordon learning factory: We bring the real world into the classroom. [WWW Document]. URL <https://www.lf.psu.edu> (accessed 4.8.21).
- Petrillo, A., De Felice, F., Cioffi, R., Zomparelli, F., 2018. Fourth Industrial Revolution: Current Practices, Challenges, and Opportunities. *Intech* 32, 137–144.

- Posada, J., Toro, C., Barandiaran, I., Oyarzun, D., Stricker, D., De Amicis, R., Pinto, E.B., Eisert, P., Döllner, J., Vallarino, I., 2015. Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet. *IEEE Comput. Graph. Appl.* 35, 26–40. <https://doi.org/10.1109/MCG.2015.45>
- Pötters, P., Schmitt, R., Leyendecker, B., 2018. Effectivity of quality methods used on the shop floor of a serial production—how important is Poka Yoke? *Total Qual. Manag. Bus. Excell.* 29, 1200–1212. <https://doi.org/10.1080/14783363.2018.1488559>
- Powell, D.J., 2018. Kanban for Lean Production in High Mix, Low Volume Environments. *IFAC-PapersOnLine* 51, 140–143. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.248>
- Protzman, C., Whiton, F., Kerpchar, J., Lewandowski, C.R., Stenberg, S., Grounds, P., 2016. A Brief History of Lean, in: *The Lean Practitioner’s Field Book*. pp. 51–60. <https://doi.org/10.1201/9781315116907-5>
- PSA, 2020. INDTECH 4.0 - Novas tecnologias para fabricação inteligente.
- Qin, J., Liu, Y., Grosvenor, R., 2016. A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond. *Procedia CIRP* 52, 173–178. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>
- Rahman, N.A.A., Sharif, S.M., Esa, M.M., 2013. Lean Manufacturing Case Study with Kanban System Implementation. *Procedia Econ. Financ.* 7, 174–180. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(13\)00232-3](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(13)00232-3)
- Razmeh, A.P., 2014. Kaizen and Kaizen Costing. *Acad. J. Res. Bus. Account.* 2, 43–52.
- Region, I.N.S., 2018. Industry 4.0 – opportunities and challenges for SMEs in the North Sea Region Desk study - December 2018, in: *Interreg North Sea Region Growin 4.0*. pp. 1–19.
- Reingold, E., 1999. *Toyota: People, Ideas and the Challenge of the New*. Penguin.
- Ricky, C., Kadono, Y., 2020. A Case Study of E-Kanban Implementation in Indonesian Automotive Manufacture. 2020 8th Int. Conf. Cyber IT Serv. Manag. CITSM 2020. <https://doi.org/10.1109/CITSM50537.2020.9268867>
- Roblek, V., Meško, M., Krapež, A., 2016. A Complex View of Industry 4.0. *SAGE Open* 6. <https://doi.org/10.1177/2158244016653987>
- Rof, M.L., 2011. Kaizen Costing Method and Its Role in The Management of An Entity. *Young Econ. J.* 104–109.
- Rother, M., Shook, J., 1999. *Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda* (Lean Enterprise Institute), Lean Enterprise Institute Brookline.

- Sanders, A., Elangeswaran, C., Wulfsberg, J., 2016. Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *J. Ind. Eng. Manag.* 9, 811–833. <https://doi.org/10.3926/jiem.1940>
- Scherrer-rathje, M., Boyle, T.A., Deflorin, P., 2009. Lean , take two ! Reflections from the second attempt at lean implementation. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2008.08.004>
- Schreiber, S., Funke, L., Tracht, K., 2016. BERTHA - A Flexible Learning Factory for Manual Assembly. *Procedia CIRP* 54, 119–123. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.163>
- Schroeder, C., 2015. The Challenges of Industry 4 . 0 for Small and Medium-sized Enterprises. *Friedrich Ebert Found.* 1–28.
- Shafiq, S.I., Sanin, C., Szczerbicki, E., Toro, C., 2015. Virtual engineering object/virtual engineering process: A specialized form of cyber physical system for industrie 4.0. *Procedia Comput. Sci.* 60, 1146–1155. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.166>
- Shah, R., Ward, P.T., 2007. Defining and developing measures of lean production 25, 785–805. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2007.01.019>
- Sharma, A., Singh, B.J., 2020. Evolution of Industrial Revolutions: A Review. *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.* 9, 66–73. <https://doi.org/10.35940/ijitee.i7144.0991120>
- Sharma, S.K., Singla, V., 2019. The Effects of Implementation of Kanban System on Productivity: A Case Study of Auto Parts Company. *IUP J. Oper. Manag.* 18, 56–68.
- Shingo, S., 1989. *A Study of the Toyota Production System*. Productivity Press, Cambridge,Massachussets and Norwalk, Connecticut.
- Shou, W., Wang, J., Wu, P., Wang, X., Chong, H., 2017. A cross-sector review on the use of value stream mapping 55, 3906–3928.
- Silva, A., Sá, J.C., Santos, G., Silva, F.J.G., Ferreira, L.P., Pereira, M.T., 2020. Implementation of SMED in a cutting line 00, 0–7. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.189>
- Simić, D., Svirčević, V., Corchado, E., Calvo-Rolle, J.L., Simić, S.D., Simić, S., 2021. Modelling material flow using the Milk run and Kanban systems in the automotive industry. *Expert Syst.* 38, 1–15. <https://doi.org/10.1111/exsy.12546>
- Stadnicka, D., Ratnayake, R.M.C., 2017. Enhancing Aircraft Maintenance Services: A VSM Based Case Study. *Procedia Eng.* 182, 665–672. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.177>

- Stadnicka, D., Ratnayake, R.M.C., 2016. Minimization of service disturbance: VSM based case study in telecommunication industry. *IFAC-PapersOnLine* 49, 255–260. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.609>
- Steffen, M., Frye, S., Deuse, J., 2013a. Vielfalt Lernfabrik. *wt Werkstattstech.* online 103, 233–239.
- Steffen, M., Frye, S., Deuse, J., 2013b. "The only Source of Knowledge is Experience" - Didaktische Konzeption und methodische Gestaltung von Lehr-Lern-Prozessen in Lernfabriken zur Aus- und Weiterbildung im Industrial Engineering 1–267.
- Stone, K.B., 2012. Four decades of lean: A systematic literature review. *Int. J. Lean Six Sigma* 3, 112–132. <https://doi.org/10.1108/20401461211243702>
- Suárez-Barraza, M.F., 2020. Implementación del “Kaizen-Innovación de Procesos-Jidoka” para hacer frente al COVID-19: un caso de estudio en un hospital público. *Ing. Ind.* 75–96. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2020.n039.4916>
- Sunk, A., Kuhlmann, P., Edtmayr, T., Sihn, W., 2017. Developments of traditional value stream mapping to enhance personal and organisational system and methods competencies. *Int. J. Prod. Res.* 55, 3732–3746. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1272764>
- Tekin, M., Arslanere, M., Etilioğlu, M., Koyuncuoğlu, Ö., Tekin, E., 2019. An Application of SMED and Jidoka in Lean Production. *Proc. Int. Symp. Prod. Res.* 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92267-6>
- Thames, L., Schaefer, D., 2017. *Cybersecurity for Industry 4.0 Analysis for Design and Manufacturing*, Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50660-9> Library
- Thames, L., Schaefer, D., 2016. Software-defined Cloud Manufacturing for Industry 4.0. *Procedia CIRP* 52, 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.041>
- Tisch, M., Hertle, C., Abele, E., Metternich, J., Tenberg, R., 2016. Learning factory design: a competency-oriented approach integrating three design levels. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 29, 1355–1375. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1033017>
- Tisch, M., Hertle, C., Cachay, J., Abele, E., Metternich, J., Tenberg, R., 2013. A systematic approach on developing action-oriented, competency-based Learning Factories. *Procedia CIRP* 7, 580–585. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.036>
- Tisch, M., Ranz, F., Abele, E., Metternich, J., Vera, H., 2015. Learning factory morphology – Study of form and structure of an innovative learning approach in the manufacturing domain. *Turkish Online J. Educ. Technol.* 2015, 356–363.

- Treville, S. De, Antonakis, J., 2006. Could lean production job design be intrinsically motivating ? Contextual , configurational , and levels-of-analysis issues 24, 99–123. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2005.04.001>
- Triana, N.E., Beatrix, M.E., 2019. Production System Improvement Through Kanban Application in Labor Intensive Company. *Sinergi* 23, 33. <https://doi.org/10.22441/sinergi.2019.1.005>
- United Nations Industrial Development Organization, 2018. Industry 4.0 - the Opportunities Behind the Challenge. Department of Trade, Investment and Innovation, Vienna, p. 31.
- University Puerto Rico-Mayagüez, 2021. Model Factory [WWW Document]. URL https://uprm.edu/p/model_factory/about (accessed 4.8.21).
- Ustundag, A., Cevikcan, E., 2018. Industry 4.0- Managing The Digital Transformation, Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer, Switzerland. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5>
- Vermesan, O., Friess, P., Guillemin, P., Sundmaeker, H., Eisenhauer, M., Moessner, K., Arndt, M., Spirito, M., Medagliani, P., Giaffreda, R., Gusmeroli, S., Ladid, L., Serrano, M., Hauswirth, M., Baldini, G., 2014. Internet of Things Applications: From Research and Innovation to Market Deployment, Internet of Things Applications: From Research and Innovation to Market Deployment.
- Veza, I., Gjeldum, N., Mladineo, M., 2015. Lean learning factory at FESB - University of Split. *Procedia CIRP* 32, 132–137. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.223>
- Vogel-Heuser, B., Hess, D., 2016. Guest Editorial Industry 4.0-Prerequisites and Visions. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 13, 411–413. <https://doi.org/10.1109/TASE.2016.2523639>
- Wagner, U., AlGeddawy, T., ElMaraghy, H., Müller, E., 2015. Developing products for changeable learning factories. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 9, 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.11.001>
- Wagner, U., AlGeddawy, T., ElMaraghy, H., Müller, E., 2012. The state-of-the-art and prospects of learning factories. *Procedia CIRP* 3, 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.020>
- Weber, A., 2004. The pros and cons of assembly cells. [WWW Document]. URL <https://www.assemblymag.com/articles/83136-the-pros-and-cons-of-cells> (accessed 2.16.21).
- Wijaya, S., Hariyadi, S., Debora, F., Supriadi, G., 2020. Design and implementation of poka-yoke system in stationary spot-welding production line utilizing internet-of-things platform. *J. ICT Res. Appl.* 14, 34–50. <https://doi.org/10.5614/itbj.ict.res.appl.2020.14.1.3>

- Womack, J.P., Jones, D.T., 2008. Lean Thinking—Banish Waste and Create Wealth in your Corporation. *J. Oper. Res. Soc.* 48, 1148–1148. <https://doi.org/10.1038/sj.jors.2600967>
- Womack, J.P., Jones, D.T., 2003. Lean Thinking-Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation.
- Womack, J.P., Jones, D.T., 1997. Lean Thinking—Banish Waste and Create Wealth in your Corporation. *J. Oper. Res. Soc.* 48, 1148–1148. <https://doi.org/10.1038/sj.jors.2600967>
- Womack, J.P., Jones, D.T., Roos, D., 1990. The Machine That changed the World.
- Xu, J., Huang, E., Hsieh, L., Lee, L.H., Jia, Q.S., Chen, C.H., 2016. Simulation optimization in the era of Industrial 4.0 and the Industrial Internet. *J. Simul.* 10, 310–320. <https://doi.org/10.1057/s41273-016-0037-6>
- Zonnenshain, A., Kenett, R.S., 2020. Quality 4.0—the challenging future of quality engineering. *Qual. Eng.* 32, 614–626. <https://doi.org/10.1080/08982112.2019.1706744>