

**Integração da Filosofia *Lean* com Tecnologias
da Indústria 4.0 para Otimização da
Produtividade numa Empresa do Setor
Metalomecânico**

João Filipe da Silva Marçal

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia e Gestão Industrial
(2º ciclo de estudos)

Orientadora: Prof. Doutora Tânia Daniela Felgueiras de Miranda Lima

outubro de 2024

Declaração de Integridade

Eu, João Filipe da Silva Marçal, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M12310 de Engenharia e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 08 /10 /2024

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Tânia Lima pelos conselhos, palavras de incentivo e orientação presente e dedicada que permitiram levar esta última etapa do percurso a bom porto.

Aos meus pais, um agradecimento por sempre me apoiarem ao longo desta e todas as etapas da minha vida e por não olharem a meios para me verem ter sucesso, que também é deles.

Ao Engenheiro Vítor Fernandes e a todos na Ciclo Fapril que se mostraram sempre disponíveis para me acompanhar e ajudar no desenvolvimento deste projeto, obrigado.

Agradeço aos meus irmãos, Ana e Pedro, por uma vida inteira de companheirismo, amizade e dores de cabeça.

À minha companheira de todas as horas, Graça, um agradecimento especial pela paciência, palavras de encorajamento, apoio e refeições desde o primeiro ao último dia.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos por fazerem estes cinco anos parecerem cinco dias e por tornarem este percurso em algo memorável.

Resumo

A crescente procura por flexibilidade e desenvolvimento tecnológico força as empresas a adaptarem-se, procurando capacitar os trabalhadores para lidar com tecnologias em campos como a robótica e a análise de dados, e projetar os seus sistemas para uma fácil integração das tecnologias da Indústria 4.0. Os *robots* colaborativos, que combinam a velocidade e precisão dos *robots* com a adaptabilidade humana de forma segura, permitem melhorar a produtividade e eficiência dos processos aos quais são alocados. A integração deste novo paradigma com o *Lean Manufacturing* permite potencializar as suas ferramentas, ajustando-as à nova realidade industrial, promovendo uma maior eficiência e flexibilidade nos processos produtivos.

A presente dissertação tem como objetivo o estudo de implementação de um *robot* colaborativo em diferentes postos de trabalho, procurando aumentar a produtividade e eficiência das operações, na empresa Ciclo Fapril. Para alcançar esse objetivo foi seguida uma metodologia de caso de estudo, no qual foram analisados três postos de trabalho de modo a avaliar os possíveis ganhos da implementação do *robot* nessas estações para a produção de três componentes afetos a cada uma delas.

Os resultados do presente estudo foram obtidos com recurso a simulações, sendo que estas indicam que a implementação do equipamento resultaria num aumento de produção de 71,4% na operação de furação de aros para camas de hospital, gerando uma poupança anual de 20.119 euros, com um retorno do investimento em 7,1 meses. Para a operação de curvatura de tubos para quadros de bicicletas infantis, a produtividade aumentaria em 36,4%, com uma poupança anual de 15.761 euros e um retorno em 9,1 meses. Para a maquinação de tubos para suportes de guiadores, a produtividade aumentaria em 32,8%, com um ganho anual de 9.430 euros e um retorno do investimento em 15,2 meses.. Juntamente à implementação do *robot* colaborativo, a adoção de outras tecnologias que permitam aproximar os postos de trabalho da digitalização permitirá também minimizar desperdícios e promover o desenvolvimento da empresa.

Palavras-chave

Lean Manufacturing; Indústria 4.0; *Robot* colaborativo; Indústria metalomecânica; Furação

Abstract

The growing demand for flexibility and technological development forces companies to adapt, seeking to train workers to deal with technologies in fields such as robotics and data analysis, and to design their systems for easy integration of Industry 4.0 technologies. Collaborative robots, which combine the speed and precision of robots with human adaptability in a safe way, make it possible to improve the productivity and efficiency of the processes to which they are assigned. Integrating this new paradigm with Lean Manufacturing allows its tools to be maximised, adjusting them to the new industrial reality, promoting greater efficiency and flexibility in production processes.

The aim of this dissertation is to study the implementation of a collaborative robot in different workstations, seeking to increase productivity and efficiency in operations at the Ciclo Fapril company. To achieve this goal, a case study methodology was followed, in which three workstations were analysed in order to assess the possible gains of implementing the robot in these stations for the production of three components assigned to each of them.

The results of this study were obtained through simulations, which indicate that the implementation of the equipment would result in a 71.4% increase in production in the operation of drilling hospital bed frames, generating annual savings of 20,119 euros, with a return on investment of 7.1 months. For the tube bending operation for children's bicycle frames, productivity would increase by 36.4%, with annual savings of 15,761 euros and a return on investment in 9.1 months. For the machining of tubes for handlebar supports, productivity would increase by 32.8%, with an annual gain of 9,430 euros and a return on investment of 15.2 months. Alongside the implementation of the collaborative robot, the adoption of other technologies that bring workplaces closer to digitalisation will also minimise waste and promote the company's development.

Keywords

Lean Manufacturing; Industry 4.0; collaborative robot; metalworking industry; drilling

Índice

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Acrónimos.....	xvii
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Metodologia.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Estrutura da Dissertação.....	4
Capítulo 2.....	5
<i>Lean Manufacturing</i>	5
2.1. <i>Lean Manufacturing</i>	5
2.1.1. Desperdícios <i>Lean</i>	6
2.1.2. Ferramentas <i>Lean</i>	7
2.1.2.1. 5S.....	8
2.1.2.2. Overall Equipment Effectiveness.....	9
2.1.2.3. Value Stream Mapping.....	11
2.1.2.4. Standard Work.....	13
Capítulo 3.....	17
Indústria 4.0.....	17
3.1. Indústria 4.0.....	17
3.1.1. Trabalho Inteligente e Operadores 4.0.....	19
3.1.2. <i>Lean</i> 4.0.....	20
3.1.2.1. Indústria 4.0 e os desperdícios <i>Lean</i>	21
3.1.2.2. Ferramentas <i>Lean</i> no contexto da Indústria 4.0.....	24
3.1.3. Colaboração Homem-Robot.....	27
3.1.3.1. <i>Robots</i> colaborativos.....	30
3.1.3.2. Ergonomia e segurança na colaboração Homem-Robot.....	31
Capítulo 4.....	35
Caracterização da Empresa.....	35
4.1. Apresentação da Empresa.....	35
4.2. Descrição do Processo Produtivo.....	36

4.2.1.	Corte de tubo	38
4.2.2.	Curvatura.....	39
4.2.3.	Corte por arrombamento	41
4.2.4.	Granalhagem	42
4.2.5.	Furação.....	43
4.2.6.	Soldadura	44
4.2.7.	Inspeção e embalamento.....	46
Capítulo 5	.....	47
Caso de Estudo	.....	47
5.1.	Apresentação do Caso de Estudo	47
5.1.1.	Aplicação das ferramentas <i>Lean</i>	47
5.1.2.	Apresentação de Propostas de Melhoria.....	53
5.1.3.	Implementação do <i>robot</i> colaborativo.....	55
5.1.3.1.	Programação do <i>robot</i> colaborativo.....	58
5.2.	Apresentação e Discussão de Resultados.....	60
Capítulo 6	.....	65
Conclusão	.....	65
6.1.	Conclusões.....	65
6.2.	Limitações	66
6.3.	Proposta de Trabalhos Futuros.....	67
Bibliografia	.....	69
Anexo I	.....	75

Lista de Figuras

Figura 1- Mapa atual do processo (Narke and Jayadeva, 2020).....	12
Figura 2 - Mapa futuro do processo (Narke and Jayadeva, 2020)	13
Figura 3 – Tabela de combinação de <i>Standard Work</i> (Shook, 2022)	15
Figura 4 - Associação entre tecnologias da I4.0 e desperdícios <i>Lean</i> (Adaptado de Rajab, Afy-Shararah and Salonitis, 2022)	23
Figura 5 – Tipos de interação Homem-Robot (Jahanmahin <i>et al.</i> , 2022)	28
Figura 6 - Componentes de um sistema HRC adaptado de (Othman and Yang, 2022)	30
Figura 7 - Organograma da Ciclo Fapril.....	35
Figura 8 – Desenho da cama de hospital com numeração dos componentes	37
Figura 9 - Lista de componentes	37
Figura 10 - Esquema do processo produtivo das camas de hospital.....	38
Figura 11 - Máquinas corte a) serra circular b) laser	38
Figura 12 - Carros de transporte de tubo cortado	39
Figura 13 - Máquina de curvar tubo	40
Figura 14 - Gabari de controlo.....	41
Figura 15 - Prensa mecânica.....	42
Figura 16 - Matriz de corte por arrombamento.....	42
Figura 17 - Granalhadora.....	43
Figura 18 - Suporte da máquina de furar com aro grande	44
Figura 19 - <i>Robots</i> de soldadura.....	45
Figura 20 - Gabaris de soldadura a) apoio para costas b) suporte para pés e secção de joelhos	45
Figura 21 - Mapa atual do processo.....	50
Figura 22 - Exemplos do 5S na Ciclo Fapril	52
Figura 23 - Cartão de 7S	52
Figura 24 - Mapa futuro do processo	54
Figura 25 - <i>Robot</i> colaborativo.....	55
Figura 26 - Pinça do <i>robot</i> colaborativo.....	56
Figura 27 - Tubo curvado para quadro de bicicleta.....	57
Figura 28 - Tubo para suporte de guiador de bicicleta	58
Figura 29 - Programa de <i>pick and place</i> para <i>robot</i> colaborativo	60

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tecnologias da Indústria 4.0 para combater os desperdícios <i>Lean</i> (Adaptado de (Cifone <i>et al.</i> , 2021; Naciri <i>et al.</i> , 2022; Rajab, Afy-Shararah and Salonitis, 2022).....	21
Tabela 2 - Integração das tecnologias da I4.0 com as ferramentas <i>Lean</i> (Florescu and Barabas, 2022; Rojas and Huamanchahua, 2022)	24
Tabela 3 - Componentes de um sistema HRC adaptado de (Othman and Yang, 2022).....	29
Tabela 4 - Tempo de ciclo das operações de fabrico de componentes	49
Tabela 5 - Tempo de ciclo da união dos componentes	49
Tabela 6 - Tabela de instruções de programação do <i>robot</i> colaborativo	59
Tabela 7 - Tempos de ciclo antes e após a implementação do <i>cobot</i>	61
Tabela 8 - Comparação entre o estado atual e o estado após a implementação do <i>robot</i> ..	62
Tabela 9 - Ganhos financeiros da implementação do <i>cobot</i>	63

Lista de Acrónimos

AGV's	<i>Automated Guided Vehicle</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
<i>Cobots</i>	<i>Robots Colaborativos</i>
CPS	Sistemas ciberfísicos
HRC	Colaboração Homem- <i>Robot</i>
HRI	Interação Homem- <i>Robot</i>
I4.0	Indústria 4.0
IoT	<i>Internet of Things</i>
JIT	<i>Just-in-Time</i>
M2M	Máquina a Máquina
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
RFID	Identificação por radiofrequência
SMED	<i>Single Minute Exchange of Die</i>
SWCT	Tabela de Combinação de <i>Standard Work</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
VSM	<i>Value Stream Mapping</i>

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo, apresenta-se a contextualização do trabalho desenvolvido, os objetivos que foram definidos, a metodologia utilizada e a estrutura da presente dissertação.

1.1. Contextualização

Os sistemas robóticos têm sofrido grandes alterações e mostram ter impactos socioeconômicos notáveis em várias áreas, sobretudo no meio industrial. Uma das grandes dificuldades da indústria transformadora é quantidade e diversidade de componentes envolvidos num processo produtivo e para combater isso, a utilização de *robots* industriais tem-se revelado uma solução de aplicação ampla e efetiva em processos produtivos convencionais devido à sua elevada resistência, velocidade e precisão. Face ao desenvolvimento das tecnologias robóticas e às exigências de eficiência e qualidade dos processos produtivos, a utilização de *robots* colaborativos e de *robots* manipuladores tem atraído cada vez mais atenção pelo seu potencial prático e variedade de aplicações (Feng *et al.*, 2020; Dossou, Torregrossa and Martinez, 2022).

Apesar da Indústria 4.0 (I4.0) ser um tópico muito discutido e estudado ao longo da última década, tecnologias como a robótica e a inteligência artificial continuam a ter um contributo significativo na transformação da indústria e na melhoria do desempenho das empresas. Deste modo, a modernização dos processos produtivos aliada à implementação de conceitos da Indústria 4.0 como automação, *robots* colaborativos, colaboração Homem-Máquina, *Internet of Things*, *Big Data* entre outros, torna-se essencial para a eliminação de atividades que não agregam valor ao processo produtivo (Dossou, Torregrossa and Martinez, 2022).

Um *robot* colaborativo, muitas vezes apelidado de *cobot*, é um *robot* desenhado para trabalhar segura e simultaneamente com humanos, sem a necessidade de “gaiolas” ou vedações de segurança, no mesmo espaço de trabalho. A implementação destes equipamentos tem como objetivo a melhoria da eficiência operacional, inovação e ergonomia, através da delegação das tarefas repetitivas e que exigem esforço físico acrescido por parte do operador, como colocar e retirar material num equipamento e movimentar cargas dentro da célula de trabalho, ao *robot* colaborativo, deixando este com as funções complexas que exigem um maior grau de adaptação e raciocínio, funções de controlo, supervisão e otimização do processo. Aliados à implementação das novas tecnologias, as

ferramentas do *Lean Manufacturing*, tal como as tecnologias da I4.0 procuram alcançar uma maior eficiência operacional e consideram o Homem como parte ativa do processo de melhoria, sendo assim reconhecidas como uma referência para atingir a melhoria sustentável dos processos com investimento limitado (Quenehen, Pocachard and Klement, 2019).

A expansão dos mercados e rápida evolução da tecnologia verificadas nos últimos anos tem forçado as empresas a tornarem-se cada vez mais inovadoras e flexíveis, de modo a adquirirem vantagens competitivas para conseguirem resistir a um contexto incerto (Charrua-Santos *et al.*, 2020). O mercado exige produtos cada vez mais individualizados, em quantidades cada vez maiores e mais rapidamente, tornando os processos cada vez mais complexos e variáveis. O *Lean Manufacturing*, é uma filosofia que tem por base a eliminação dos desperdícios e a simplificação dos processos produtivos e, que por consequência, promove a sua melhoria (Charrua-Santos *et al.*, 2020; Langlotz and Aurich, 2020). Deste modo, e tendo em conta as ferramentas da I4.0 referidas anteriormente e a capacidade que esta tem de conectar os recursos físicos, digitais e humanos da empresa, é possível observar como o *Lean* e a Indústria 4.0 podem ter uma relação de sinergia, fornecendo mutuamente suporte para a sua implementação, possibilitando deste modo, o sucesso da organização neste ambiente de rápido desenvolvimento tecnológico e mudança constante (Charrua-Santos *et al.*, 2020; Langlotz and Aurich, 2020).

Assim, pretende-se estudar formas eficientes de integrar este tipo equipamentos nas linhas de produção, fomentando um ambiente de simbiose entre o Homem e a máquina para aumentar a produtividade da linha e a qualidade do que é produzido através da redução dos desperdícios e melhorias no *standard work*, assegurando um balanceamento da produção que não dê origem a gargalos ou outros desperdícios, bem como evitar as movimentações repetitivas e tarefas que envolvam esforço físico por parte do operador.

1.2. Metodologia

O presente trabalho tem por base o método científico, ou seja, segue um conjunto padronizado de procedimentos para a aquisição do conhecimento científico. Este método permite a qualquer investigador testar, de forma independente e imparcial, teorias pré-existentes e submetê-las a um debate aberto, a alterações ou a melhorias. Para que o conhecimento possa ser considerado científico, este deve ter sido obtido através do método científico e, como tal, deve ser replicável, lógico, confirmável e preciso (Osei-Kyei and Chan, 2017).

Existem dois tipos de pesquisa científica, a indutiva, que se foca na inferência de conceitos e padrões teóricos a partir dos dados observados, e a dedutiva, em que o objetivo do investigador é testar os conceitos e padrões teóricos com novos dados empíricos (Osei-Kyei and Chan, 2017). Dos dois tipos de pesquisa, a presente dissertação é desenvolvida segundo a pesquisa dedutiva, uma vez que se pretende avaliar os efeitos da implementação de um *robot* colaborativo, aliado às ferramentas *Lean* para a obtenção de melhorias na produtividade.

A metodologia empregada para esta dissertação é a do estudo de caso, que se trata de um método de estudo aprofundado de um fenómeno ao longo do tempo, no seu contexto real, ou em diversos locais, uma vez que será efetuada a análise de um caso real de uma empresa (Osei-Kyei and Chan, 2017).

A primeira etapa deste trabalho consistiu na elaboração de uma revisão bibliográfica sobre as temáticas em estudo, de modo a identificar os conceitos, as ferramentas e os métodos usualmente utilizados em contextos e situações similares. Pretendeu-se ainda com esta revisão que fosse possível indicar o que esperar aquando da aplicação das ferramentas utilizadas no contexto industrial e também, quais as possíveis limitações.

A pesquisa de artigos científicos para a elaboração da revisão bibliográfica foi realizada com recurso às bases de dados *Science Direct*, *Scopus* e *IEEE Xplore*. A gestão da referenciação foi realizada com recurso ao *software* Mendeley.

1.3. Objetivos

O objetivo da presente dissertação passa pela implementação de um *robot* colaborativo para a otimização de uma linha de produção, de modo a alcançar melhorias na qualidade dos produtos e na produtividade.

Uma vez estabelecido o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realização de uma revisão bibliográfica sobre as temáticas em estudo;
- Caracterização do processo produtivo e dos equipamentos utilizados;
- Utilização da ferramenta *Value Stream Mapping* para identificação de desperdícios na linha de produção;
- Implementação do *robot* colaborativo;
- Análise e comparação dos novos *Key Performance Indicators* com os anteriores à instalação do *robot* colaborativo;
- Propostas de melhoria ao funcionamento da linha.

1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação divide-se em cinco capítulos, iniciando-se pela introdução, na qual é contextualizado o trabalho desenvolvido, apresentados os objetivos e a metodologia utilizada, bem como a sua estrutura.

No segundo capítulo aborda-se o *Lean Manufacturing*, a sua origem e princípios, os seus desperdícios e principais ferramentas utilizadas na procura da melhoria contínua, sendo explanadas em maior detalhe as ferramentas aplicáveis ao caso de estudo.

No capítulo 3 apresenta-se a origem e a evolução da Indústria 4.0, as suas principais tecnologias, assim como a mudança por estas provocada no meio industrial. É ainda abordada a ligação entre o *Lean* e a Indústria 4.0, salientando o impacto da transformação digital nas ferramentas *Lean* e no combate aos diferentes tipos de desperdícios. Este capítulo é encerrado com uma abordagem à temática da colaboração Homem-Robot (HRC), sendo abordados os diferentes tipos de interação entre os dois agentes e as características que compõem um sistema de colaboração Homem-Robot. Ainda na HRC é exposta a diferença entre os *robots* industriais comuns e os *robots* colaborativos e a forma como os segundos melhor se adaptam ao novo paradigma da indústria, bem como quais os requisitos de ergonomia e segurança a ter em conta para que a implementação de um sistema de colaboração Homem-Robot seja bem-sucedida.

No quarto capítulo é apresentada a Ciclo Fapril, a sua missão, visão e valores, assim como a sua estrutura organizacional. É ainda apresentada uma descrição do setor metalomecânico português, no qual a empresa se insere, e do processo de fabrico do produto respeitante ao caso de estudo realizado.

O quinto capítulo contém a apresentação do caso de estudo e a descrição da implementação das ferramentas utilizadas em conjunto com o *robot* colaborativo. Após a elaboração dos programas do *cobot* para os diferentes componentes a produzir, foram realizadas simulações e recolhidos os novos dados, procedendo-se de seguida à sua apresentação e discussão, na qual foi efetuada a comparação entre o estado antes e o estado esperado da implementação do *robot* colaborativo e das ferramentas *Lean* referidas.

No sexto e último capítulo, são apresentadas as conclusões sobre o caso de estudo, assim como as limitações encontradas e que o condicionaram. Por fim, são apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros para que os processos da Ciclo Fapril possam continuar o seu caminho de melhoria.

Capítulo 2

Lean Manufacturing

Neste capítulo é abordada a origem do *Lean Manufacturing*, bem como os seus princípios, desperdícios e principais ferramentas utilizadas na procura da melhoria contínua, sendo explanadas em maior detalhe as ferramentas relevantes ao caso de estudo.

2.1. *Lean Manufacturing*

O *Lean Manufacturing*, muitas vezes referido apenas como *Lean* é uma filosofia que foi desenvolvida na década de 1950 com o *Toyota Production System* com o objetivo de reduzir os desperdícios e eliminar todas as atividades que não agregam valor ao processo produtivo, que na década de 1970 começou a ser largamente divulgada para mostrar a chave do sucesso das empresas japonesas, especialmente no setor automóvel. Contudo, só nos anos 90 com a publicação do livro “*The Machine that Changed the World*” escrito por James P. Womack, Daniel T. Jones e Daniel Roos é que o conceito de *Lean Manufacturing* foi realmente conhecido no ocidente e desde então é reconhecido como uma metodologia de gestão da produção de topo (Henao, Sarache and Gómez, 2019; Dossou, Torregrossa and Martinez, 2022).

Esta filosofia assenta em cinco pilares, o valor, o mapeamento da cadeia de valor, o fluxo da cadeia de valor, sistema puxado e melhoria contínua. Tendo estes pilares por base, é necessário implementar as ferramentas e técnicas que estão em constante evolução, para criar um ambiente eficaz dentro da organização, permitindo produzir utilizando menos espaço, recursos humanos e financeiros e material (Alefari, Salonitis and Xu, 2017; Kumar *et al.*, 2022).

Embora a filosofia *Lean* seja amplamente utilizada e percebida, a sua implementação ainda enfrenta alguns desafios, uma vez que para que a transformação *Lean* seja bem sucedida, é necessário que alguns fatores como a cultura organizacional, a capacidade e compromisso da gestão de topo, a disponibilização dos recursos adequados, a abordagem estratégica das melhorias, o trabalho em equipa, a prontidão da organização, entre outros fatores, estejam orientados para o pensamento *Lean* envolvendo todos os elementos da organização na melhoria contínua da mesma (Alefari, Salonitis and Xu, 2017).

2.1.1. Desperdícios *Lean*

Os desperdícios podem ser dos mais variados tipos, podem ser de tempo, de material ou de espaço e a eliminação dos processos é um dos princípios fundamentais do *Lean*, uma vez que a sua exclusão do curso de operações favorece a melhoria do sistema de produção, resultando numa redução dos custos operacionais sem comprometer o valor total do produto. A filosofia *Lean* identifica sete principais tipos desperdícios (Kumar *et al.*, 2022; Rajab, Afy-Shararah and Salonitis, 2022):

- Defeitos: qualquer produto que, por algum motivo, como materiais e componentes não conformes ou produzido fora das especificações constitui um defeito. Estes podem afetar a confiabilidade dos clientes na empresa e não devem ocorrer repetidamente;
- Excesso de *stock*: engloba todo o inventário de matérias-primas, produtos em processamento e produtos acabados, que esteja armazenado à espera de ser utilizado ou expedido;
- Movimentações desnecessárias: movimentos que não tenham contributo direto para a transformação produto por parte do operador, são vistos como atividades que não agregam valor, devendo então ser eliminados. Deste modo, o *layout* do local de trabalho deve ser planeado de modo que os movimentos realizados sejam apenas os necessários;
- Sobreprocessamento: define-se como fazer mais do que é pedido pelo cliente, o que gera desperdícios adicionais no que respeita ao trabalho, materiais e mão de obra;
- Sobreprodução: ocorre quando o volume de produção é superior à procura do produto, afetando todo o sistema, uma vez que constitui um desperdício de dinheiro, tempo e espaço;
- Tempo de espera: estes podem incluir a espera por trabalho, informações, matéria-prima, acessórios do equipamento ou alguma forma de comunicação, fazendo com que o processo não tenha um fluxo contínuo;
- Transportes: o transporte de materiais, sejam eles, ferramentas, peças ou acessórios de máquinas ou produto intermédio entre postos de trabalho, constituem atividades dispendiosas que não agregam valor.

Além destes sete, passou ainda a ser considerado um oitavo desperdício denominado de subaproveitamento humano, que se refere ao não aproveitamento das capacidades e competências dos trabalhadores da empresa que, por não serem reconhecidas, acabam por não serem utilizadas em prol da mesma (Rajab, Afy-Shararah and Salonitis, 2022).

2.1.2. Ferramentas *Lean*

Para suportar a implementação da filosofia *Lean*, bem como pra identificar e eliminar os desperdícios mencionados anteriormente, foram desenvolvidas diversas ferramentas, tais como (Dossou, Torregrossa and Martinez, 2022; Kumar *et al.*, 2022; Naemah and Wong, 2023):

- 5S: aplicação de 5 palavras japonesas começadas por “s” que podem ser traduzidas para utilização, organização, limpeza, padronização e disciplina, que ajudam a manter um ambiente de trabalho que contribua para um bom desempenho;
- Heijunka: consiste no planeamento da produção de modo a reduzir o tamanho dos lotes, resultando num volume de produção mais uniforme;
- Just-in-Time (JIT): respeita ao que produzir, quando produzir e em que quantidade, de modo a reduzir o tempo de produção e os custos com inventário;
- Kaizen: é uma palavra japonesa que significa melhoria contínua. Este conceito reforça a ideia de que a melhoria contínua é a única forma de levar uma indústria à perfeição e possibilita a minimização dos desperdícios, o aumento da produtividade, do envolvimento dos colaboradores e da inovação;
- Kanban: sistema visual que utiliza cartões para representar o número de tarefas de um processo, reduzindo o trabalho em curso e maximizando a eficiência do processo;
- Lean 6 Sigma: método de controlo da qualidade e redução da variabilidade do processo;
- Overall Equipment Effectiveness (OEE): é um indicador que determina a eficiência global de um equipamento através do cálculo de três parâmetros, a disponibilidade, o desempenho e a qualidade;
- Poka-Yoke: dispositivos utilizados para prevenir a ocorrência de erros ou defeitos e que se foca nos motivos que os causam;
- Single Minute Exchange of Die (SMED): utilizado para minimizar os tempos de *setup* dos equipamentos;
- Total Productive Maintenance (TPM): forma de manutenção aliada à produção, aplicada de modo a maximizar eficiência, consistência e capacidade do processo;
- Standard Work: assegura a eliminação de variações na execução das tarefas, mantendo a consistência e homogeneidade do processo;
- Value Stream Mapping (VSM): ferramenta que permite mapear todo o fluxo produtivo de modo que sejam detetados todos os desperdícios e atividades que não agregam valor, eliminando-os, reduzindo assim os desperdícios dentro da organização.

Estas são apenas algumas das diversas ferramentas que o *Lean* tem para oferecer e das quais as empresas podem fazer uso para encontrar a melhor solução para o seu processo. Apesar da sua variedade, estas ferramentas acabam sempre por ter como missão melhorar o desempenho e eficácia dos processos através da eliminação das atividades que não se traduzem em valor para o consumidor final, reduzindo assim as implicações económicas, ambientais e sociais negativas relacionadas com as operações de fabrico (Naeemah and Wong, 2023).

Em seguida, são descritas em maior detalhe as ferramentas 5S, OEE, *Standard Work* e o VSM, uma vez que são relevantes ao caso de estudo que será apresentado. Através do VSM será possível visualizar o processo como um todo e identificar as tarefas onde se encontram atividades sem valor acrescentado, sendo aplicados de seguida o 5S e o *Standard Work* de forma a colmatar essas atividades através de medidas simples e que irão estabelecer a base para a implementação de outras melhorias no futuro. O OEE servirá como indicador para acompanhar o impacto destas ferramentas no processo ao longo das suas três vertentes.

2.1.2.1. 5S

O 5S é uma de várias ferramentas e técnicas ligadas ao *Lean Manufacturing* que enfatiza a simplificação do espaço de trabalho, ajuda a geri-lo, a reduzir os desperdícios, e simultaneamente promove a saúde e a segurança, o que resulta num ambiente de trabalho positivo e colaboradores mais motivados para manterem as boas práticas dentro da organização (Shahriar *et al.*, 2022). Os 5S vêm das palavras japonesas *seiri*, *seiton*, *seiso*, *seiketsu* e *shitsuke* que têm os seguintes significados (Omogbai and Salonitis, 2017):

1. Senso de utilização (*seiri*): organização do local de trabalho de modo que as ferramentas e materiais a utilizar sejam facilmente alcançadas;
2. Senso de organização (*seiton*): utilização de marcações e legendas para indicar claramente o lugar onde o material deve ser arrumado;
3. Senso de limpeza (*seiso*): quer o próprio local de trabalho, quer os materiais a trabalhar e ferramentas necessárias devem estar devidamente limpos;
4. Senso de padronização (*seiketsu*): os métodos e as formas de executar as tarefas devem estar registados e serem aceites por todos como parte da cultura da organização;
5. Senso de disciplina (*shitsuke*): assegurar a manutenção dos anteriores e, por consequência a melhoria contínua.

É necessário que esta ferramenta seja suportada por processos padronizados para que seja realmente eficaz, o que se torna importante para assegurar o sucesso dos restantes pilares

e também porque é muitas vezes considerada um pré-requisito para a implementação bem sucedida de outras técnicas como a TPM ou o SMED, uma vez que a sua ausência faz com que certas ineficiências do processo não sejam eliminadas e, por consequência, a finalidade das outras ferramentas fique por atingir (Shahriar *et al.*, 2022).

Como tal, ao planejar e regular o processo produtivo, o 5S permite torná-lo mais simples e possibilita a redução de capital e tempo necessários, bem como a poupança de espaço operacional e menor registo de produtos defeituosos. No entanto, fatores como a dimensão da organização, o tipo de produto, a formação dos operadores e a predisposição da organização para a qualidade e para a melhoria contínua têm influência na sua implementação e no desempenho do sistema após a ferramenta ter sido aplicada (Omogbai and Salonitis, 2017).

Mrugalska, Konieczna and Wyrwicka (2020), no seu caso prático da implementação desta ferramenta numa empresa do ramo da metalomecânica concluíram que a utilização do método 5S, devido à sua simplicidade, facilitava a sua adoção por parte dos operadores, promovia a eficácia das operações, bem como proporcionava um ambiente de trabalho mais seguro e ergonómico. Já no estudo de Yağlı *et al.* (2024), os autores implementaram a metodologia 5S na área da maquinaria e apresentaram resultados positivos, com uma diminuição do tempo de paragem dos equipamentos provocada pela desorganização da sala de ferramentas em 76%, uma diminuição de 78% na quantidade de sucata devido a ferramentas de corte defeituosas e de 85% nas movimentações desnecessárias. No caso de estudo de Veres *et al.* (2018), efetuado na indústria automóvel, os autores testaram a relação entre o nível do 5S e a produtividade, tendo obtido uma correlação de Pearson moderada de 0,65 com um grau de significância de 0,022.

Dos casos práticos apresentados retira-se não só a versatilidade da implementação desta ferramenta, mas também o impacto que esta pode ter na eficiência e custo dos processos, bem como na segurança e bem-estar dos operadores na realização das suas tarefas.

2.1.2.2. Overall Equipment Effectiveness

Atualmente, os ciclos de melhoria contínua são essenciais para permitir alcançar a excelência operacional e a manutenção da competitividade das empresas. Uma vez que existe uma diferença entre a produtividade planeada e a produtividade real, e sendo necessário que o segundo valor seja o mais elevado possível, torna-se cada vez mais importante a existência de indicadores que reflitam a produtividade (Van De Ginste, Aghezzaf and Cottyn, 2022).

O OEE é um indicador que foi inicialmente introduzido no âmbito da TPM e combina informação sobre a utilização do equipamento, rendimento do processo e qualidade dos produtos, como se pode ver pela sua fórmula de cálculo (equação 1) (Klimecka-Tatar and Ingaldi, 2022; Van De Ginste, Aghezzaf and Cottyn, 2022).

$$OEE = Disponibilidade \times Desempenho \times Qualidade \times 100 \quad (1)$$

Os parâmetros da disponibilidade, desempenho e qualidade que suportam este cálculo estão descritos nas equações 2, 3 e 4, respetivamente.

A disponibilidade compreende as perdas de disponibilidade relacionadas com todas as paragens, sejam estas de natureza planeada, como tempos de *setup* e ajustes no equipamento, ou não planeada, como é o caso das avarias ou falhas no equipamento (Klimecka-Tatar and Ingaldi, 2022).

$$Disponibilidade = \frac{\text{tempo produção planeado} - \text{tempo paragens}}{\text{tempo produção planeado}} \quad (2)$$

O desempenho contempla perdas relativas a pequenas interrupções e tempos ociosos ou abrandamentos no ciclo de produção provocados por uma menor velocidade na execução das tarefas ou do equipamento (Klimecka-Tatar and Ingaldi, 2022; Van De Ginste, Aghezzaf and Cottyn, 2022).

$$Desempenho = \frac{\text{Produção real}}{\text{Produção esperada}} \quad (3)$$

A qualidade tem por base as perdas resultantes do arranque, defeitos e produtos que necessitem de ser retrabalhados (Van De Ginste, Aghezzaf and Cottyn, 2022),

$$Qualidade = \frac{N^{\circ} \text{ de peças boas}}{N^{\circ} \text{ de peças total}} \quad (4)$$

A capacidade de integrar vários aspetos da produtividade numa única métrica global, facilita a sua compreensão e comparação, tornando esta ferramenta bastante popular para proceder à medição da produtividade (Van De Ginste, Aghezzaf and Cottyn, 2022).

Segundo Hung, Li and Cheng, (2022), o OEE é uma ferramenta que permite identificar e potencializar o verdadeiro potencial de uma empresa, uma vez que a análise dos três parâmetros de cálculo, disponibilidade, desempenho e qualidade permite caracterizar a origem e o tipos de perdas existentes nos processos. Deste modo, é possível verificar melhorias tanto ao nível da eficiência dos equipamentos como do volume de produção, através de uma melhor utilização dos mesmos, bem como da diminuição dos tempos de ciclo planeados por meio da eliminação de ineficiências e da otimização das operações. Os autores apresentam três casos da aplicação do OEE, dois no setor têxtil e um na área da metalomecânica, tendo reportado que através do OEE as empresas utilizadas nestes casos de estudo obtiveram melhorias significativas tanto no volume de produção, como na eficiência dos seus equipamentos. Estes propuseram ainda uma melhoria para este indicador que passaria pela inclusão de um parâmetro de planeamento na equação original, dando origem ao *value added* OEE (Hung, Li and Cheng, 2022).

2.1.2.3. Value Stream Mapping

Face à crescente procura de produtos com um elevado grau de personalização e concorrência global que obrigam as empresas a terem processos produtivos cada vez mais diversificados, torna-se necessário que exista uma monitorização contínua dos mesmos para garantir a sua eficiência (Horsthofer-Rauch *et al.*, 2022).

O *Value Stream Mapping*, é uma técnica utilizada para analisar, planear e gerir o fluxo de materiais e informação necessários para entregar um produto ao cliente, através de um sistema de símbolos normalizados que permitem a visualização de diversos fluxos de produção, onde são identificadas as atividades que acrescentam e que não acrescentam valor, segundo a perspetiva do cliente. Assim, esta ferramenta torna-se bastante útil, pois possibilita a identificação das ineficiências e dá a oportunidade para que sejam apontadas oportunidades de melhoria, especialmente quando combinada com outras técnicas, como é o caso do 5S ou do balanceamento de linha, que permitem a minimização dos desperdícios no local de trabalho e uma distribuição equilibrada do trabalho nesses mesmos locais (Dinesh *et al.*, 2022).

O VSM possibilita também a compreensão do estado atual do processo e dos trabalhos em curso e serve como meio de comunicação, no entanto, a forma convencional de recolha de dados não é ideal, uma vez que é morosa e apenas representa um intervalo de tempo específico, o que impossibilita que haja um retrato fiel da realidade do processo. Como tal, e à luz da Indústria 4.0, a digitalização contínua permite a recolha de dados extensivos e detalhados sobre a produção, tornando o VSM numa ferramenta dinâmica e capaz de

fornecer informação fiável, mesmo com uma grande variabilidade da produção (Horsthofer-Rauch *et al.*, 2022).

Com estes dados, pode ser criado um mapa atual do processo produtivo, com o intuito de analisar e perceber onde se encontram as fontes de desperdícios e quais as medidas que podem ser tomadas para a sua eliminação, que por sua vez irá dar origem a um potencial mapa futuro do processo, que representa a forma como a empresa pode funcionar mais eficientemente (Rathi *et al.*, 2022).

Narke and Jayadeva (2020), no seu caso de estudo, detalham a aplicação do VSM numa empresa do setor metalomecânico, sediada na Índia. Os autores começaram por recolher dados sobre o processo produtivo, registando todos os tempos das operações a realizar desde que a matéria-prima é recebida até este ser expedido para o cliente. Após a recolha dos dados foi elaborado o mapa atual do processo, conforme ilustrado na Figura 1.

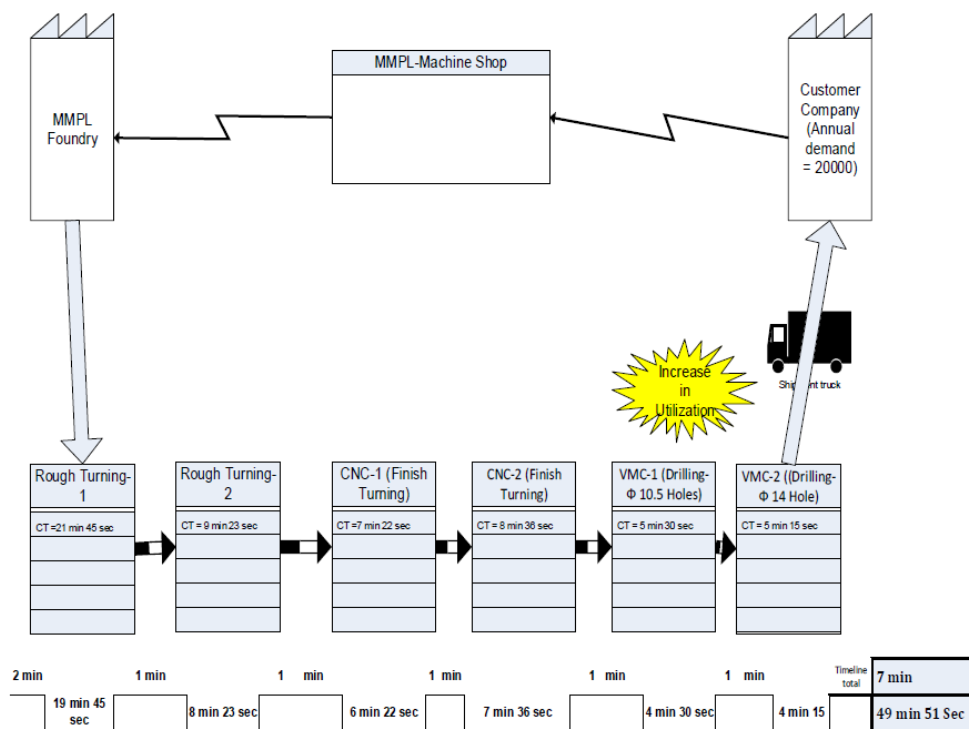


Figura 1- Mapa atual do processo (Narke and Jayadeva, 2020)

Ao analisar o mapa atual, Narke and Jayadeva (2020) detetaram uma rotura *Kaizen* que consistia na utilização de dois equipamento para realizar operações de maquinação em cada um dos lados da peça. Posto isso, foi proposto pelos autores que se combinassem as operações num só equipamento através da criação de um novo acessório de fixação que permitisse realizar as tarefas sem a necessidade de trocar de equipamento ou de acessório

de fixação. Ao colocar em prática a proposta de melhoria foram retirados os novos tempos de ciclo de cada etapa do processo e com esses novos dados construído o mapa futuro, como se pode ver na Figura 2.

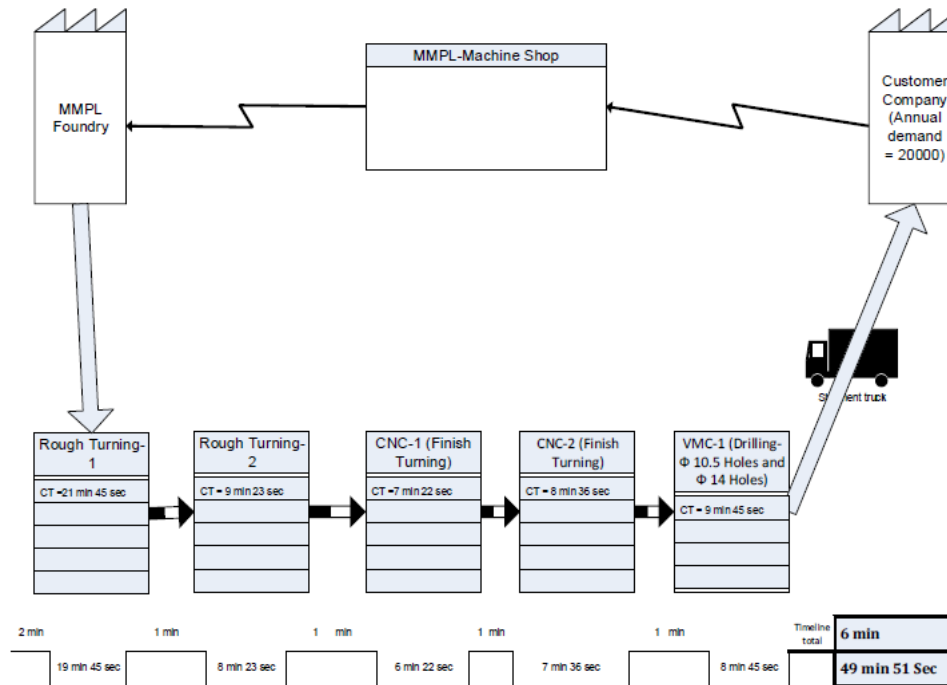


Figura 2 - Mapa futuro do processo (Narke and Jayadeva, 2020)

Deste modo, através da implementação do *Value Stream Mapping* foi possível obter uma redução 336 horas anuais em atividades que não agregavam valor, uma poupança de 1.119,50 euros, bem como libertado um equipamento para o fabrico de outros produtos (Narke and Jayadeva, 2020).

2.1.2.4. *Standard Work*

O *standard work*, ou trabalho padronizado, consiste num conjunto de procedimentos de trabalho que permite definir os melhores métodos e sequências para todos os processos, a adotar pelos operadores, com o objetivo de minimizar desperdícios e maximizar o desempenho, garantindo que o volume de produção está de acordo com o nível de encomendas dos clientes, e uma vez implementado e apresentado no posto de trabalho, este é alvo de um processo de melhoria contínua (Marinelli *et al.*, 2021).

O *standard work* envolve três grandes elementos (Pereira *et al.*, 2016; Santos, Santos and Santos, 2021; Shook, 2022):

- Takt time: tem origem do alemão “taktzeit” que significa ritmo e trata-se da cadência de produção para responder à procura. O *Takt time* não é um valor medido ou observado, mas sim calculado através da equação 5. Ao gerir a produção de acordo com o *Takt time*, consegue-se obter um fluxo de produtos regular e detetar anomalias no processo e atuar corrigi-las.

$$Takt\ time = \frac{\text{tempo de produção disponível}}{\text{unidades a produzir}} \quad (5)$$

- Sequência padronizada: determina a melhor e mais segura ordem de tarefas para a produção dos produtos, repetida pelos colaboradores de forma consistente, tornando-a mais eficiente. O trabalho é distribuído de modo a assegurar que o número de colaboradores na linha ou célula de trabalho é o necessário para atingir o *Takt time* e que nenhum destes é sobre ou subutilizado, assim como que não existem paragens desnecessárias.
- Trabalho em processo padronizado: número mínimo de material, peças ou informação em processo necessário para manter o fluxo de produção contínuo e sem paragens.

De modo a auxiliar na implementação do *standard work*, foi desenvolvida a tabela de combinação de *standard work* (SWCT), que é uma ferramenta largamente utilizada que permite a visualização de todas as tarefas de forma sequencial e a análise do tempo de cada uma delas, como se pode ver na Figura 3. Além das atividades e do seu tempo, é também traçada a linha do *Takt time* como referência do tempo máximo para se produzirem as unidades necessárias (Santos, Santos and Santos, 2021).

Standardized Work Combination Table	From:		Date:	Required Units per Shift:	Hand																						
	To:		Area:	Takt Time:	Walk																						
Work Elements	Time (sec.)			Seconds																							
	Hand	Auto	Walk	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100				
1																											
2																											
3																											
4																											
5																											
6																											
7																											
8																											
9																											
10																											
11																											
12																											
13																											
14																											
15																											
Totals		Waiting			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100			
				Seconds																							

Figura 3 – Tabela de combinação de *Standard Work* (Shook, 2022)

A implementação de processos de trabalho padronizados traz benefícios como a existência de procedimentos documentados, redução da variabilidade do processo, facilidade na formação de novos operadores, redução do esforço e lesões músculo-esqueléticas e cria ainda uma base de referência para o processo de melhoria contínua (Marinelli *et al.*, 2021).

No caso de estudo apresentado por Mundaca-Lopez *et al.* (2023), é apresentada uma empresa do setor metalomecânico com baixos indicadores de produtividade. Face a estes indicadores, os autores optaram por implementar o *standard work*, juntamente com outras ferramentas, de modo a melhorar as condições de trabalho e maximizar a utilização dos equipamentos disponíveis. Estes recorreram a diagramas de trabalho padronizado, SWCT, registos de formação e planos de atividades normalizado, com o objetivo de melhorar o desempenho e reduzir da variabilidade do processo. A implementação destas medidas resultou numa redução do tempo de ciclo em 15,61%, que quando combinada com os resultados das outras ferramentas aplicadas, nomeadamente o 5S, o *Systematic Layout Planning*, que consiste numa metodologia que permite identificar e analisar diferentes *layouts*, de modo a determinar o mais adequado para dar resposta às necessidades da fábrica e minimizar a taxa de estrangulamento, os custos de transporte de material e os tempos de paragem e a TPM, permitiram que o OEE da empresa fosse elevado dos 64% para os 72%.

Padilla-Triveno and Quiroz-Flores (2022) apresentaram também um caso de estudo da implementação desta ferramenta semelhante ao apresentado anteriormente. Neste, os

autores estabeleceram procedimentos de trabalho padronizado com o intuito de minimizar os desperdícios na unidade de produção. A aplicação do *standard work* neste caso resultou numa diminuição de 34,02% no tempo de paragem das máquinas por falta de atenção da parte do operador.

Capítulo 3

Indústria 4.0

Neste capítulo aborda-se a origem e evolução da Indústria 4.0 e quais as suas principais tecnologias, assim como o impacto destas na mudança do paradigma industrial e o seu efeito na força de trabalho. É também apresentada a ligação entre a filosofia *Lean* e a Indústria 4.0, salientando o impacto da transformação digital nas ferramentas *Lean* e no combate aos diferentes tipos de desperdícios. Por fim, é introduzida a colaboração Homem-Robot e alguns conceitos importantes da robótica colaborativa e ergonomia do espaço de trabalho associada ao uso destes equipamentos.

3.1. Indústria 4.0

A Indústria 4.0 surgiu pela primeira vez na Alemanha no ano de 2011 e, desde então, viabilizou a utilização das novas tecnologias de informação e comunicação em vários setores de atividade. Esta foi designada de indústria inteligente devido à sua capacidade de digitalizar os processos produtivos e integrar sistemas ciberfísicos (CPS) (Silvestri, Gallo and Silvestri, 2022). Sistemas estes que foram concebidos para integrar componentes virtuais e físicos, que possibilitam a monitorização e controlo do processo produtivo em tempo real através de redes de computação e comunicação (Florescu and Barabas, 2022). O controlo automatizado e a partilha de informação ao longo de todo o processo produtivo derivados da indústria 4.0 capacitam as empresas de meios para se tornarem mais flexíveis e competitivas (Silvestri, Gallo and Silvestri, 2022).

Este novo paradigma conduziu a mudanças significativas nos sistemas produtivos, centrando o foco no fornecimento de produtos inovadores e de elevada qualidade com um menor tempo até à sua comercialização. Como tal, o consumidor procura diferentes variedades de produtos que satisfaçam o nível das suas necessidades funcionais e económicas, obrigando as indústrias transformadoras a tornarem-se mais flexíveis na conceção e fabrico dos mesmos. Assim, atualmente, as organizações apostam na adoção de tecnologias produtivas que lhes permitam satisfazer as exigências dos clientes (Eswaran and Bahubalendruni, 2022).

A nova fase na evolução das atividades industriais tem três pilares tecnológicos na sua base (Dornelles, Ayala and Frank, 2022; Florescu and Barabas, 2022; Kopeinig, Woschank and Olipp, 2024):

- *Internet of Things (IoT)*: pode ser considerada uma infraestrutura global que estabelece uma ligação entre o meio físico e o virtual, com o intuito de integrar objetos e dispositivos físicos, sensores, formas de comunicação e sistemas de tecnologias de informação, de modo a facilitar a recolha de dados e monitorização em tempo real. As redes de sensores e as etiquetas com identificadores por radiofrequência (RFID) são tecnologias proeminentes associadas à IoT pela sua capacidade de recolha de dados automatizada, viabilizam a ligação com outros dispositivos como os *Automated Guided Vehicles (AGV's)*, *cobots* e outros equipamentos que através de comunicação máquina-a-máquina (M2M), promovem um melhor desempenho de produção;
- *Big Data Analytics*: consiste no conjunto de métodos e ferramentas para a recolha, processamento e análise de grandes volumes de dados, com recurso a algoritmos e aplicações de *software*, que auxiliam as organizações no tratamento desses dados, possibilitando o processo de tomada de decisão baseado em informação;
- *Cloud Computing*: trata-se de um recurso capaz de atuar como plataforma ou infraestrutura de armazenamento de dados recolhidos continuamente por tecnologias da IoT, que pode ser acedida por diferentes intervenientes. Do *Cloud Computing* derivam aplicações como o *cloud manufacturing*, que promove a partilha de informação entre a cadeia de abastecimento e os processos produtivos através dos recursos de computação e armazenamento de dados, podendo ser considerado uma forma de combinar diferentes aspetos da I4.0 como a IoT, *Big Data Analytics* e *Cloud Computing*.

Estas, por sua vez dão suporte a tecnologias de ponta como a robótica, a realidade virtual e aumentada, a manufatura aditiva, entre outras, que por se encontrarem num ambiente interconectado, onde computadores, equipamentos e outros elementos do processo, cada vez mais inteligentes, comunicam entre si, oferecendo inúmeras vantagens como o aumento da produtividade, a economia de recursos e a redução de desperdícios (Ghobakhloo, 2020; Dornelles, Ayala and Frank, 2022).

É muitas vezes mencionado que a I4.0 pela sua natureza tecnológica é um conceito que se opõe à força de trabalho, na medida em que um maior nível de automação leva a uma independência entre os operadores e os equipamentos, fazendo com que estes sejam apenas necessários para realizar tarefas de cariz cognitivo no chão de fábrica. No entanto, a eliminação dos trabalhadores das linhas de produção não tem de ser o caminho a seguir, pois estes são um ativo valioso para as empresas e em vez de serem substituídos por equipamentos tecnologicamente mais avançados, estes podem ser habilitados e auxiliados

por estas tecnologias inteligentes no desempenho das suas funções (Dornelles, Ayala and Frank, 2022).

3.1.1. Trabalho Inteligente e Operadores 4.0

As tecnologias de ponta mencionadas anteriormente contemplam quatro dimensões inteligentes que se tornam o ponto central da aplicação da tecnologia da Indústria 4.0, o fabrico inteligente, os produtos e serviços inteligentes, a cadeia de abastecimento inteligente e o trabalho inteligente. As primeiras três concentram-se na aplicação de tecnologias que permitem tornar o sistema produtivo mais inteligente e que simultaneamente fornecem produtos ou serviços conectados que integrem os clientes e a cadeia de abastecimento nas atividades de fabrico (Dornelles, Ayala and Frank, 2022). Já a última dimensão, permite apoiar as dimensões anteriores e reconhece que os trabalhadores também devem ser alvo da aplicação da tecnologia, uma vez que são o elemento mais adaptável e resiliente do processo produtivo, o que os torna num fator de importância considerável para as empresas que pretendam aumentar a flexibilidade dos seus sistemas de produção. Estes operadores que são capacitados pela tecnologia para melhor desempenho das suas funções são apelidados de “operadores 4.0” (Dornelles, Ayala and Frank, 2022).

A dimensão do trabalho inteligente engloba um conjunto de tecnologias que auxiliam os operadores a melhorar a sua produtividade e flexibilidade de forma a cumprirem os requisitos do sistema de produção tais como (Dornelles, Ayala and Frank, 2022):

- Automação: conhecida como robótica avançada, é caracterizada pela utilização de *robots* adaptáveis e flexíveis guiados por parâmetros pré-estabelecidos sem intervenção humana;
- Exoesqueletos: assistem o operador recorrendo a um dispositivo que permite aumentar a sua força;
- Realidade Aumentada: melhora o ambiente de trabalho através da visualização de informação relevante ao desempenho das atividades de produção;
- Realidade Virtual: permite uma interação imersiva e simulação segura com *feedback* em tempo real, possibilitando a utilização de equipamentos perigosos e melhoria dos processos de formação;
- Robots colaborativos: equipamentos capazes de interagir com os operadores durante o processo produtivo, auxiliando nas tarefas mais repetitivas e menos ergonómicas através da partilha de um espaço de trabalho seguro;
- AGV's: são veículos que possuem um sensor magnético ou ótico que seguem uma trajetória predefinida, utilizados no contexto industrial para libertar o operador de tarefas que não agregam valor;

- *Wearable Devices*: estes dispositivos podem ser peças de roupa, pulseiras ou *smartwatches* desenhados que permitem fazer a recolha de dados sobre a saúde ocupacional e as movimentações dos trabalhadores de forma a se poder gerir da melhor forma esta informação e a tomar decisões.

Estes são apenas alguns exemplos de tecnologias utilizadas em tarefas comuns como no planeamento de projetos, nas operações de montagem, no controlo da qualidade, na manutenção, entre outras, que possibilitam que os operadores tenham um desempenho mais eficiente (Dornelles, Ayala and Frank, 2022).

3.1.2. Lean 4.0

Desde a sua criação, o *Lean* tem evoluído a par com a indústria, os seus métodos e ferramentas. O que no início era uma filosofia para minimizar os desperdícios e promover o envolvimento dos trabalhadores no processo de melhoria contínua, passando pela aplicação de ferramentas como o 5s, o VSM, o SMED e do sistema *Kanban*, é atualmente utilizada para conciliar as necessidades do processo com as da cadeia de valor, assegurando a satisfação de todas as partes interessadas (Naciri *et al.*, 2022).

Com o auxílio da transformação digital, nasceu então uma nova versão do *Lean*, apelidada de *Lean 4.0*, que surge de uma de três hipóteses, a primeira que assume que o *Lean* é um pré-requisito para a implementação da Indústria 4.0, uma vez que digitalizar e automatizar processos ineficientes acaba por automatizar e melhorar processos com desperdícios por eliminar, podendo mascará-los ou até agravá-los, opondo-se assim ao processo de melhoria contínua desejado. Opostamente, a segunda hipótese foca-se na ideia de que a implementação do *Lean* em termos de flexibilidade e complexidade apresenta limites que poderiam ser facilmente ultrapassados pela I4.0, com recurso à recolha de informação em tempo real. Por fim, a última hipótese funde os dois conceitos, considerando que o *Lean* é a base para o sucesso da produção e que a I4.0 otimiza a sua implementação. É ainda importante salientar que os princípios *Lean* se mantêm inalterados, sendo estes apenas complementados e melhorados pelas tecnologias que advêm da Indústria 4.0 (Dillinger *et al.*, 2022; Naciri *et al.*, 2022).

Segundo Iyer, Sangwan and Dhiraj (2023) é notória a transição para a integração do *Lean* com a Indústria 4.0, uma vez que a sua integração pode conduzir a melhorias nos processos produtivos. Um bom exemplo da integração das ferramentas *Lean* com a I4.0 é o VSM, que tal como já foi mencionado anteriormente, está limitado pelos métodos de recolha de dados tradicionais de natureza estática, que acabam por não fornecer dados precisos e por causar

perdas de informação. A recolha de dados em tempo real começa a tornar-se uma necessidade para a implementação eficaz das ferramentas *Lean*, sendo que, futuramente, tecnologias como o *Cloud Manufacturing*, a simulação, a IoT, entre outras, estarão integradas em todas as ferramentas *Lean*, de modo a melhorar a eficiência dos processos e reduzir de forma eficaz os desperdícios neles presentes (Iyer, Sangwan and Dhiraj, 2023).

3.1.2.1. Indústria 4.0 e os desperdícios *Lean*

As funcionalidades e as tecnologias da Indústria 4.0 podem ser utilizadas para apoiar a implementação do *Lean* através da identificação e eliminação das atividades que não agregam valor ao sistema produtivo (Rajab, Afy-Shararah and Salonitis, 2022). Dada a natureza distinta dos diferentes tipos de desperdícios, podem ser encontradas dentro da I4.0 diversas soluções para a sua identificação e eliminação, o que permite uma melhor e mais fácil implementação do *Lean* e, por consequência, sistemas de produção mais eficientes, como se pode ver na Tabela 1 (Rajab, Afy-Shararah and Salonitis, 2022):

Tabela 1 – Tecnologias da Indústria 4.0 para combater os desperdícios *Lean* (Adaptado de (Cifone *et al.*, 2021; Naciri *et al.*, 2022; Rajab, Afy-Shararah and Salonitis, 2022))

Desperdício	Tecnologias I4.0	Exemplos
Defeitos	IoT Robótica	A IoT permite reduzir o aparecimento de defeitos de informação e aumentar a rastreabilidade dos produtos, através da utilização de redes sensores, etiquetas RFID, comunicação M2M e plataformas de computação integrada. A utilização de <i>robots</i> autónomos permite aumentar a padronização e minimizar a ocorrência de defeitos nas células e linhas de produção.
Excesso de <i>stock</i>	<i>Cloud Computing</i> IoT	A <i>Cloud Computing</i> garante melhores estimativas do <i>stock</i> corrente e previsto do que os sistemas digitais tradicionais e permite que a informação relativa ao <i>stock</i> seja acedida através da <i>Cloud</i> em qualquer momento a partir de qualquer dispositivo, centralizando as atividades de gestão de <i>stock</i> . A IoT viabiliza alcançar um equilíbrio na linha de produção, de modo a reduzir a constituição de <i>stocks</i> , muitas vezes associados à sobreprodução.

Movimentações desnecessárias	Manufatura aditiva Robótica Simulação	Com recurso a <i>softwares</i> de simulação, pode-se formular a disposição ótima das células de trabalho, <i>layout</i> e espaços físicos, bem como definir qual o melhor curso de ação da produção e avaliar a sua eficiência. Através da manufatura aditiva é possível minimizar as movimentações do operador durante o processo, uma vez que o produto é concebido através da adição de material por camadas, sem a necessidade de utilização de ferramentas especializadas. Na mesma linha de ação, a robótica com a sua crescente autonomia, permite que os operadores se foquem mais em melhorar o processo do que a operá-lo.
Sobreprocessamento	<i>Big Data Analytics</i> <i>Cloud Computing</i>	<i>Big Data Analytics</i> pode ser utilizada no controlo do processo produtivo ao nível do controlo da qualidade e da análise de tendência do mesmo. As ferramentas do <i>Big Data Analytics</i> , aliadas ao <i>Cloud Computing</i> capacitam os equipamentos para que corrijam autonomamente os desvios dos processos padronizados e definir as melhores estratégias o refinamento do processo.
Sobreprodução	<i>Big Data Analytics</i> IoT	A capacidade de recolha de dados em tempo real e a comunicação M2M associados à IoT facilitam a determinação das necessidades dos clientes, bem como asseguram que o ritmo de produção coincide com essas necessidades de modo a produzir apenas o que é necessário quando é necessário. Além da capacidade de recolha de dados e através dos <i>Big Data Analytics</i> , é possível fazer previsões da procura mais fiáveis e melhorar as etapas de planeamento.
Subaproveitamento Humano	<i>Big Data Analytics</i> Realidade Aumentada Realidade Virtual	Os dispositivos de realidade aumentada/virtual podem ser usados para potenciar o conhecimento e competências dos trabalhadores, facilitar o processo de formação e treino, assim como promover o seu bem-estar e motivação. O <i>Big Data Analytics</i> possibilita a minimização das atividades de tratamento e processamento de dados, deixando mais tempo para a resolução de problemas.
Tempo de espera	AGV's <i>Big Data Analytics</i> IoT Robótica	Com o aumento do volume de dados e capacidade de análise dos mesmos, a informação no espaço de trabalho torna-se cada vez mais precisa e pode ser acedida em tempo real, minimizando o tempo de

		<p>espera e melhorando a eficiência da cadeia de abastecimento.</p> <p>A utilização de veículos autoguiados aliada a um planeamento de rotas e <i>layout</i> otimizados pode reduzir substancialmente os tempos de espera associados ao transporte de materiais durante o processo. A utilização de <i>robots</i> e a ligação entre estes e os veículos de transporte através da IoT, permite sincronização das operações e redução dos tempos de espera.</p>
Transporte	AGV's <i>Big Data Analytics</i>	<p>A utilização dos AGV's possibilita a existência de um sistema de transporte autónomo ou semiautónomo para a melhoria da eficiência das linhas de produção, controlo de <i>stocks</i> e apoio logístico.</p> <p>Através dos <i>Big Data Analytics</i> é possível definir sistemas de transporte robustos, uma vez que há registo em tempo real sobre as rotas delineadas, equipamentos em funcionamento e em necessidade de abastecimento, assim como sobre os veículos e pessoas disponíveis para o transporte.</p>

A figura 4 permite uma visualização simplificada da tabela 1 acima apresentada.

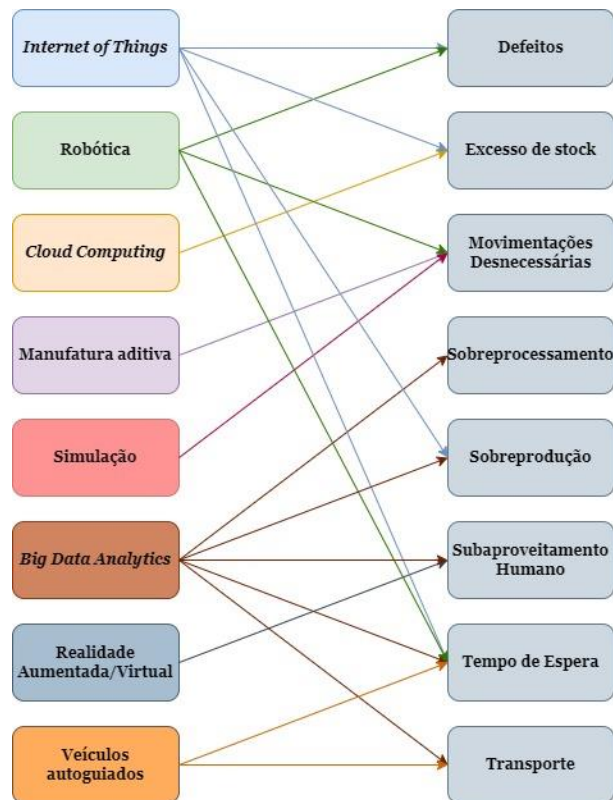


Figura 4 - Associação entre tecnologias da I4.0 e desperdícios *Lean* (Adaptado de Rajab, Afy-Shararah and Salonitis, 2022)

3.1.2.2. Ferramentas *Lean* no contexto da Indústria 4.0

Tal como mencionado anteriormente, o *Lean Manufacturing* é suportado por diversas ferramentas amplamente aplicadas para a identificação e eliminação de atividades sem valor acrescentado, quer ao nível operacional, quer ao nível estratégico (Ejsmont *et al.*, 2020). No entanto, o crescente dinamismo dos mercados provocou um aumento na complexidade e variabilidade dos processos que tornou algumas dessas ferramentas desajustadas para o seu propósito. Deste modo, a integração destas ferramentas com tecnologias características da Indústria 4.0 vem fazer face ao carácter estático das ferramentas *Lean*, permitindo que estas se adaptem aos sistemas produção cada vez mais autónomos e flexíveis, mantendo a eliminação dos desperdícios e a melhoria contínua como peça central do sucesso dos processos produtivos (Ejsmont *et al.*, 2020; Rojas and Huamanchahua, 2022).

Na Tabela 2 é possível visualizar a ligação entre as ferramentas *Lean* e as tecnologias que estas integram de modo a adaptar-se ao novo contexto industrial.

Tabela 2 - Integração das tecnologias da I4.0 com as ferramentas *Lean* (Florescu and Barabas, 2022; Rojas and Huamanchahua, 2022)

Ferramenta <i>Lean</i>	Tecnologias I4.0	Integração
5S	Robots colaborativos AGV's Simulação	A tecnologia de simulação existente pode ser utilizada para verificar os ganhos esperados da implementação desta ferramenta e determinar outras melhorias a implementar no local de trabalho que não tinham sido consideradas. O recurso a <i>cobots</i> e a AGV's promovem um ambiente de colaboração entre o Homem e o <i>robot</i> e uma organização do trabalho mais flexível, que podem resultar em células de trabalho mais flexíveis e ergonómicas
<i>Heijunka</i>	Automação IoT CPS	A automação da produção pode potenciar um melhor fluxo de produção, que é um dos focos centrais do <i>Heijunka</i> . A utilização da IoT e dos CPS possibilitam a recolha de informação e comunicação entre equipamentos em tempo real, facilitando as tarefas de planeamento e gestão da produção.
<i>Just-in-Time</i>	Automação <i>Big Data Analytics</i> Simulação	Com recurso a <i>softwares</i> de simulação é possível planear um modelo de produção que, com recurso a equipamentos automatizados, tem a capacidade de produzir num sistema puxado.

		A vasta capacidade de processamento de dados e informação associada aos <i>Big Data Analytics</i> permite que haja um fluxo de informação fiável e em tempo real.
<i>Kaizen</i>	<i>Big Data Analytics</i> Simulação	A capacidade de recolha e processamento de dados das ferramentas dos <i>Big Data Analytics</i> poderão promover a eliminação de desperdícios, devido à aptidão destas para recolher dados continuamente e partilhá-los e analisá-los automaticamente. As técnicas de simulação de processo disponíveis poderão contribuir para a redução do trabalho em curso, desperdícios ao longo do processo e do tempo de execução das tarefas, que é crucial no processo de melhoria contínua.
<i>Kanban</i>	<i>Big Data Analytics Cloud Computing</i> IoT Realidade Aumentada	O <i>Kanban</i> tradicional incorre em vários riscos que podem levar a falhas por perda ou danos nos cartões físicos. Assim, o recurso a redes de sensores, a etiquetas com RFID e a cartões eletrónicos dão origem ao <i>e-Kanban</i> que viabiliza a automação da recolha de dados e facilita o controlo de todos os elementos ao longo do processo. O aparecimento de equipamentos cada vez mais inteligentes e capazes de comunicar entre si aliados ao <i>Cloud Computing</i> e ao <i>Big Data Analytics</i> proporcionam uma melhor combinação entre o chão de fábrica e o armazém de matéria-prima, facilitando o fluxo de produtos e material em todo o processo.
<i>Poka-Yoke</i>	IoT	A variedade de tecnologias ligadas à IoT e a sua habilidade para as ligar com os equipamentos produtivos promoverão a deteção de erros por parte dos equipamentos e facilitarão a determinação da sua origem.
SMED	Manufatura aditiva Robótica avançada Simulação	Com a manufatura aditiva, torna-se possível produzir lotes personalizados de produtos com configurações complexas, o que permitirá que sejam reduzidos ou até mesmo eliminados os tempos de <i>setup</i> de troca e ajuste de ferramentas necessárias à conceção desses mesmos produtos. Através de <i>softwares</i> de simulação é possível estudar e definir qual a reconfiguração mais rápida da máquina, encurtando o tempo necessário para realizar as operações necessárias. Os avanços na robótica e a utilização de AGV's permitirão que os materiais e ferramentas necessários a uma determinada atividade de <i>setup</i> sejam entregues no momento exato de modo a eliminar deslocações e atrasos na procura de ferramentas.

Standard Work	CPS Robots colaborativos	Com a utilização de <i>cobots</i> , as exigências ergonômicas do local de trabalho alteram-se, sendo criado um ambiente colaborativo entre Homem e <i>robot</i> que poderá viabilizar a execução de tarefas complexas e repetitivas pelo <i>robot</i> com maior precisão. A integração do mundo físico com o digital poderá gerar aumentos na produtividade através de soluções de automatização. Assim, será possível definir processos padronizados que sirvam de base para a identificação e eliminação de falhas e desperdícios.
TPM	<i>Big Data Analytics</i> Realidade Aumentada Realidade Virtual CPS	Os <i>Big Data Analytics</i> são a base de algoritmos complexos de realidade aumentada que auxiliam a implementação da TPM, uma vez que as tecnologias de realidade aumentada/virtual facilitam as manutenções corretiva e preditiva pela sua capacidade de detetar e prever falhas e anomalias nos equipamentos. A utilização dos sistemas ciberfísicos e equipamentos cada vez mais inteligentes habilitarão a previsão e programação de ações de manutenção automáticas com o auxílio dos <i>Big Data Analytics</i> , maximizando assim a disponibilidade dos equipamentos produtivos.
VSM	CPS IoT Simulação	O VSM é uma técnica <i>Lean</i> que pode ser altamente potenciada pelas tecnologias da I4.0. Os diversos métodos de simulação realçam a visibilidade das operações e melhoram a identificação de desperdícios e de oportunidades de melhoria. A IoT permitirá viabilizar a análise VSM em tempo real, o que ajudará a identificar e eliminar atividades sem valor agregado mais rapidamente. É ainda possível complementar a implementação da IoT ao integrar os CPS, que permitirá a redução dos bloqueios e atraso na produção, bem como maximizar o valor e otimizar o desempenho.

Torre, Leo and Bonamigo (2023), apresentaram um caso de estudo de uma empresa brasileira do ramo metalomecânico, na qual conjugavam tecnologias da indústria 4.0 com ferramentas *Lean* como a TPM e o *Kaizen*, com o objetivo de minimizarem as perdas associadas à manutenção corretiva de sistemas hidráulicos. Foram implementados sensores em alguns dos equipamentos destes sistemas para monitorizar parâmetros como a pressão, temperatura, nível do óleo, entre outros, fazendo com que os indicadores de gestão da manutenção estivessem atualizados, o que permitia que o engenheiro ou técnico de manutenção tomasse as medidas necessárias quando algum destes parâmetros se encontrava fora dos limites. Os sensores aplicados foram ligados a uma rede de *Cloud*

Computing, que possibilitou que os dados dos parâmetros estabelecidos fossem tratados recorrendo a *Big Data Analytics* e que, subsequentemente, fossem realizadas simulações que permitem efetuar a avaliação de quando realizar a manutenção do equipamento.

O recurso ao *Lean 4.0* possibilitou a redução da manutenção corretiva nos sistemas hidráulicos da empresa, contribuiu para uma maior conectividade e visibilidade do processo como um todo, para a melhoria do desempenho operacional e disponibilidade dos equipamentos, bem como para a criação de planos de manutenção visando a eliminação de desperdícios, o que resultou numa diminuição de 58,5% em perdas de produção e custos associados à manutenção corretiva (Torre, Leo and Bonamigo, 2023).

3.1.3. Colaboração Homem-Robot

Atualmente, a utilização de *robots* é uma parte indispensável das atividades de interação Homem-Robot (HRI), seja na automação de serviços de saúde, transporte, gestão de armazéns ou indústria e linhas de produção, entre outros. No caso da indústria, os *robots* foram introduzidos no chão de fábrica para auxiliar ou substituir operadores em diferentes tipos de tarefas repetitivas e perigosas, como operações mecânicas, manipulação e transporte de objetos, operações de montagem, entre outras. Uma vez que são capazes de operar com maior velocidade e precisão, melhorando a qualidade e eficiência dos processos produtivos. Contudo, os operadores não deixam de ser necessários para supervisionar estes novos equipamentos e para evitar a ocorrência de problemas inesperados durante o processo (Dobrokvashina *et al.*, 2022).

A interação Homem-Robot incide no planeamento, avaliação e compreensão de sistemas robóticos destinados para a interação com humanos e pode ser dividida em três categorias, coexistência, cooperação e colaboração (Jahanmahin *et al.*, 2022; Safavi *et al.*, 2024). Nos cenários de coexistência, os *robots* e os utilizadores efetuam tarefas independentes entre si em locais separados sem qualquer tipo de contacto. Para os casos de cooperação e colaboração, o espaço de trabalho passa a ser partilhado, sendo que nas situações de cooperação, o *robot* e o indivíduo executam as suas tarefas de um modo sequencial, no qual qualquer nível de contacto é considerado satisfatório, enquanto na colaboração, ambos operam a mesma tarefa e o contacto entre as partes além de necessário, é desejado. Dada essa necessidade de contacto, torna-se crucial que os *robots* utilizados sejam capazes de ter consciência do ambiente ao seu redor, especialmente nos cenários de colaboração (Jahanmahin *et al.*, 2022). Na figura 5 apresentada de seguida, são ilustrados os três tipos de interação mencionados anteriormente.

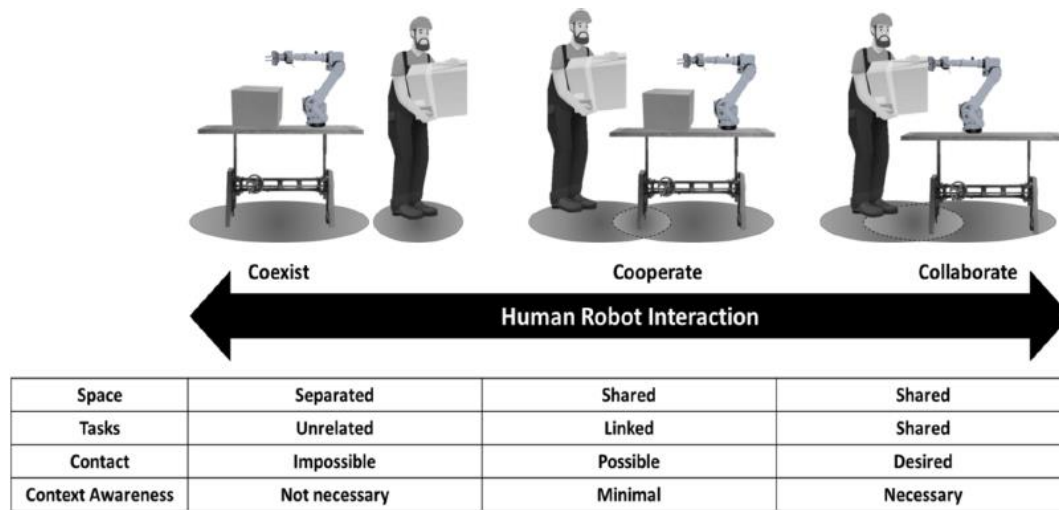


Figura 5 – Tipos de interação Homem-Robot (Jahanmahin *et al.*, 2022)

Da HRI surge a colaboração Homem-Robot (HRC) que tem um maior foco na combinação entre a flexibilidade, rapidez e compreensão do processo do Homem e a precisão e capacidade de trabalho sem paragens ou erros dos *robots* no mesmo espaço de trabalho, de modo a melhorar a produtividade e qualidade do processo, bem como reduzir a carga ergonómica sobre os trabalhadores (Oberc *et al.*, 2019; Jonek *et al.*, 2023).

Os sistemas de HRC são cada vez mais utilizados na indústria transformadora, sendo também crescente o recurso a *robots* colaborativos, uma vez que estes facilitam este tipo de interação entre Homem e *robot*. O investimento no desenvolvimento de áreas de trabalho colaborativas visa capacitar os operadores para partilharem informações com os *robots* de modo a melhorar a produtividade e eficiência do processo, o que reforça a ideia de que as tecnologias da I4.0 e que o trabalho inteligente permite ao operador trabalhar de forma mais eficiente e influenciar o processo de uma forma global, especialmente nas fases de tomada de decisão. Além disso, os *cobots* são capazes de comunicar os operadores através de interfaces intuitivos e redes de sensores, permitindo uma comunicação simples entre Homem e *cobot* através de gestos, voz, entre outros métodos, o que torna o trabalho proativo em vez de reativo (Othman and Yang, 2022).

A colaboração Homem-Robot é definida pela natureza das preocupações de trabalho, pela satisfação do operador e pela facilidade de troca de informação entre operadores e *cobots*, podendo os sistemas HRC ser classificados segundo quatro principais categorias, níveis de colaboração, funções laborais, métodos de controlo e segurança, e interfaces de comunicação, explanadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Componentes de um sistema HRC adaptado de (Othman and Yang, 2022)

Componentes do Sistema HRC			
Níveis de Colaboração	Funções Laborais	Métodos de Controlo e Segurança	Interfaces de Comunicação
<u>Independente</u> : operador e <i>cobot</i> focam-se em diferentes tarefas separadamente.	<u>Supervisão</u> : a relação entre o operador humano e o <i>cobot</i> é definida como líder-seguidor, na qual o operador é o líder.	<u>Paragem de segurança monitorizada</u> : quando o operador entra a área de segurança designada, o <i>robot</i> colaborativo mantém a sua posição.	Gestos corporais
<u>Sequencial</u> : ambos executam operações sequencialmente na mesma tarefa.	<u>Colega</u> : o operador e o <i>robot</i> definem e mantêm um ritmo de trabalho.	<u>Orientação manual</u> : o operador é capaz de mover o <i>cobot</i> manualmente, sem necessitar de uma fonte de força externa.	Interfaces táteis
<u>Simultâneo</u> : o tipo de trabalho e a sua duração é o mesmo para ambos, mas os processos são diferentes.	<u>Subordinado</u> : neste tipo de relação, o <i>robot</i> é o líder.	<u>Controlo de velocidade e distância</u> : a força e velocidade do <i>robot</i> estão limitadas a áreas de segurança de acordo com a posição do operador.	Comandos de voz
<u>Apoio</u> : trabalham na mesma peça e executam o mesmo processo de forma sincronizada.		<u>Limitador de força e potência</u> : o <i>cobot</i> tem uma determinada amplitude de força e binário em que pode trabalhar sem exceder para não provocar lesões no operador	Rastreio facial e ocular

A figura 6 serve de representação visual da Tabela 3 acima apresentada.

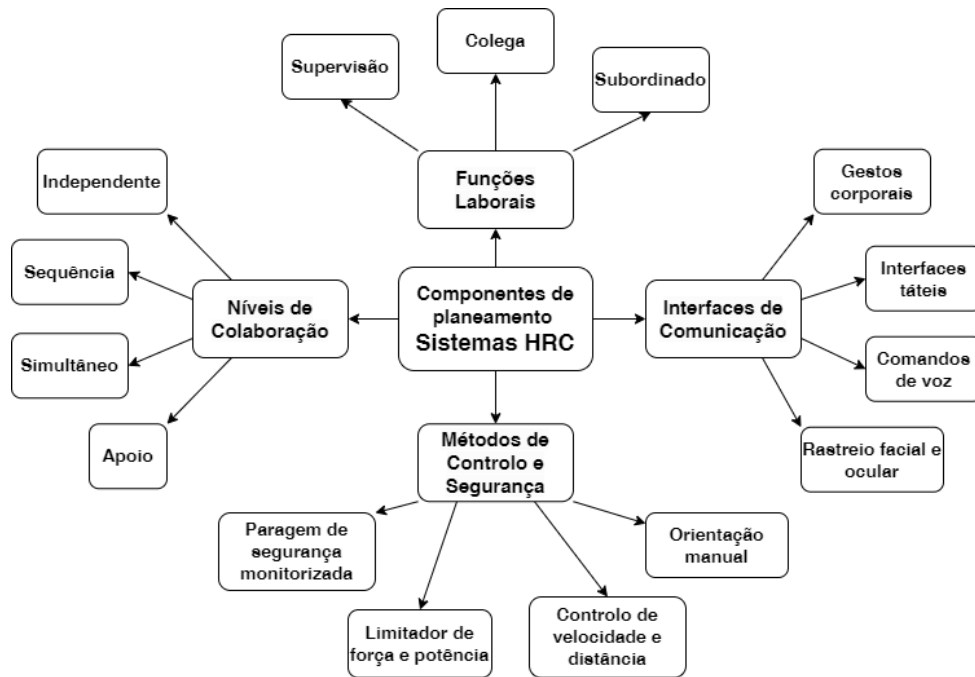


Figura 6 - Componentes de um sistema HRC adaptado de (Othman and Yang, 2022)

3.1.3.1. **Robots colaborativos**

Os típicos *robots* industriais podem ser definidos como equipamentos programáveis e autocontrolados, compostos por elementos eletrónicos, eléctricos ou mecânicos, capazes de realizar uma série de operações complexas. Estes possuem corpos de grande dimensão, pesados e rígidos e são utilizados para efetuar tarefas difíceis ou perigosas do ponto de vista do operador humano, como transportar grandes cargas e têm, normalmente, uma aplicação específica e espaço de trabalho próprio, isolado da força de trabalho humana (Sherwani, Asad and Ibrahim, 2020). No entanto, as atuais necessidades de flexibilidade e adaptabilidade para fazer face aos desafios do mercado implicam que haja uma mudança nos equipamentos utilizados (Othman and Yang, 2022). De modo, a enfrentar esses desafios dos novos mercados são cada vez mais utilizados os *robots* colaborativos que são concebidos para operarem em conjunto com a força de trabalho no mesmo espaço de forma segura sem qualquer tipo de barreira física. Os *cobots* são mais leves, mais fáceis de instalar e têm uma mobilidade maior, comparativamente aos *robots* industriais, o que os torna altamente flexíveis, sendo capazes de realizar uma grande variedade de tarefas e daí serem utilizados em vários setores industriais (Sherwani, Asad and Ibrahim, 2020).

Embora sejam bastante flexíveis e adaptáveis, não deixa de ser importante selecionar um *cobot* com características adequadas às tarefas a realizar num determinado processo. Características tais como (Vogel, Lindner and Kratzsch, 2023):

- **Graus de liberdade:** corresponde ao número de eixos sobre os quais o *robot* se pode movimentar e está relacionado com a sua mobilidade;

- Espaço de trabalho: este espaço inclui todas as posições e orientações que o *robot* pode alcançar com o seu ponto central da ferramenta, definindo a forma e tamanho da área de trabalho do equipamento;
- Precisão: Capacidade que o *robot* tem de repetir os movimentos de forma precisa e sem desvios;
- Dinâmica de movimento: está associada à velocidade e aceleração das articulações. Esta velocidade é, de um modo geral, especificada para cada articulação;
- Carga útil: corresponde à carga máxima que o *robot* consegue suportar ou mover para que consiga alcançar todos dentro da sua área de trabalho.

Apesar dos benefícios ligados ao uso deste tipo de equipamentos no contexto industrial, existem outros aspetos a ter em consideração para que a sua implementação seja bem-sucedida, como é o caso da segurança e da ergonomia, sendo que quanto mais próxima for a colaboração entre o Homem e o *robot*, maior terá de ser a atenção para os requisitos de segurança durante a fase de implementação (Andersson and Syberfeldt, 2024).

3.1.3.2. Ergonomia e segurança na colaboração Homem-Robot

Com a crescente complexidade e exigência do ambiente industrial, é essencial assegurar o bem-estar dos trabalhadores e, simultaneamente otimizar a eficiência do processo. A colaboração dentro de um espaço de trabalho partilhado além possibilitar operações mais flexíveis e eficientes, requer tecnologias de segurança avançadas, como sistemas de monitorização em tempo real, sensores de força e binário, controlo manual, entre outras. O aumento na utilização dos *robots* colaborativos levou a uma evolução das características de segurança inerentes a estes equipamentos, uma vez que são consideradas fundamentais para garantir a segurança e bem-estar dos trabalhadores no meio dos seus pares robóticos (Baratta *et al.*, 2024).

Nos sistemas de produção robóticos tradicionais em que os *robots* e os operadores humanos trabalham separadamente, algumas das medidas de segurança implementadas passam pela criação de barreiras físicas, como vedações de segurança equipadas com sensores capazes de detetar a presença desses agentes nas áreas de risco e de desligar o equipamento, impedindo a ocorrência de acidentes. Estas mesmas medidas não podem ser aplicadas no contexto da HRC, uma vez que o espaço de trabalho é partilhado, o que faz com que o risco de colisão com o próprio *robot* ou com o objeto que este manuseia aumenta (Karagiannis *et al.*, 2022).

Existem duas principais abordagens no que respeita à segurança durante a colaboração, a prevenção de contactos e a deteção e mitigação de contactos, ou seja, abordagens pré-colisão e pós-colisão, respetivamente (Gualtieri, Rauch and Vidoni, 2021; Baratta *et al.*, 2023). A prevenção de contactos pretende garantir a segurança dos operadores ao evitar contactos perigosos através de metodologias e sistemas preventivos, como o planeamento e controlo de movimentos e sistemas de sensores para monitorização de objetos, que contribuem para uma melhor previsão das colisões e, por consequência, para a minimização da sua ocorrência. Já a deteção e mitigação de contactos assegura a segurança dos trabalhadores ao reduzir o impacto de contactos inesperados ou indesejados, sendo que para melhorar as medidas de segurança baseadas em técnicas de proteção é necessário desenvolver as características relacionadas com o *hardware*, com os sensores de deteção de contacto e o planeamento de trajetória e controlo do *cobot*, características estas que são fundamentais para a minimização dos efeitos relacionados com as colisões (Gualtieri, Rauch and Vidoni, 2021).

Além dos riscos de segurança físicos, os *cobots* são ainda capazes influenciar o estado psicológico do trabalhador, podendo provar sentimentos de medo, surpresa e ansiedade, caso o *robot* seja robusto o suficiente para causar danos, se mova a uma velocidade elevada com uma ferramenta na extremidade afiada ou com uma trajetória imprevisível. Como tal, a perceção de segurança é um aspeto de elevada importância durante a HRC, que deriva da perceção da situação e que destaca a compreensão e previsão, por parte dos trabalhadores, dos elementos relacionados com a segurança no trabalho, o que torna cada vez mais importante o envolvimento humano na adaptação ao comportamento de um *cobot* durante a fase de conceção do mesmo (Lu *et al.*, 2022).

No âmbito da segurança e com o objetivo de identificar os requisitos de segurança para as pessoas que trabalham com *robots* industriais, a *International Organization for Standardization* (ISO) publicou normas de referência para a segurança dos *robots* industriais, que permitem a utilização segura das novas tecnologias, como é o caso das normas ISO 10218 partes 1 e 2 que se destinam a estabelecer os requisitos de segurança para os *robots* e para os sistemas robóticos de um modo geral. Mais recentemente, foi publicada a especificação técnica ISO/TS 15066 que tem maior foco nos espaços de trabalho partilhados entre os operadores humanos e os *robots*, fornecendo diretrizes mais claras sobre as atividades realizadas em colaboração (Karagiannis *et al.*, 2022).

Sempre que se menciona segurança e eficiência, é indispensável referir a ergonomia, especialmente quando os sistemas de produção atuais contam tanto com elementos

automatizados, como com elementos humanos, sendo que os últimos são altamente influenciados pelos fatores ergonómicos (Baratta *et al.*, 2023). O papel da ergonomia no contexto da colaboração Homem-Robot passa por assistir o ser humano na redução da carga biomecânica e cognitiva associada ao trabalho e evitar a introdução de novos riscos para a saúde ou segurança dos operadores (Gualtieri, Rauch and Vidoni, 2021)

Segundo a *International Ergonomics Association* (IEA), a ergonomia é a área científica responsável pela compreensão das interações entre os seres humanos e os elementos de um sistema, focando-se na aplicação de princípios teóricos, dados e métodos para a otimização do bem-estar humano e o desempenho do sistema (IEA, 2024).

A ergonomia é composta por três dimensões, a física, a cognitiva e a organizacional. A ergonomia física incide sobre os princípios da anatomia humana, da antropometria, da fisiologia e da biomecânica que se relacionam com a atividade física, tendo como principais tópicos de análise as posturas de trabalho, o manuseamento manual de cargas, as lesões e músculo-esqueléticas relacionadas com o trabalho, entre outros (IEA, 2024). O recurso a *robots* colaborativos pode ser uma ferramenta útil para minimizar a repetição de movimentos e as tarefas que envolvam o manuseamento manual de cargas, promovendo o bem-estar do operador, assim como a segurança do espaço de trabalho através de estratégias de programação de tarefas e de planeamento e controlo de movimentos, que permitem alterar o ciclo de trabalho e o desempenho dos sistemas robóticos consoante a condição física do operador (Gualtieri, Rauch and Vidoni, 2021; IEA, 2024).

Já a ergonomia cognitiva aborda os processos mentais, como é o caso da perceção, da memória, do raciocínio e da resposta motora, procurando avaliar a carga mental de trabalho, a capacidade de tomada de decisão, a fiabilidade humana, o stress ocupacional e a forma como estes, e outros aspetos, se relacionam com a interação entre o Homem e o sistema (IEA, 2024). A partilha do espaço de trabalho com um *cobot*, embora traga vantagens ao nível da eficiência e produtividade, pode introduzir novas formas de desconforto aos colaboradores, o que torna cada vez mais importante minimizar as fontes de stress mental e desconforto psicológico, obrigando as organizações a melhorar as estratégias de avaliação e teste dos sistemas colaborativos, que são fundamentais para detetar e mitigar possíveis fontes de risco cognitivo (Gualtieri, Rauch and Vidoni, 2021).

Por último, o domínio da ergonomia organizacional, está associado à otimização dos sistemas sociotécnicos, nomeadamente as suas estruturas organizacionais, políticas e processos, sendo o planeamento dos horários de trabalho, a comunicação, a gestão dos

recursos humanos, o trabalho em equipa e o *layout* produtivo alguns dos aspetos principais deste domínio (Velasco *et al.*, 2022; IEA, 2024).

Capítulo 4

Caracterização da Empresa

Neste capítulo é apresentada a empresa Ciclo Fapril, a sua missão, visão e valores, assim como a sua estrutura organizacional. É ainda apresentado o processo de fabrico do produto respeitante ao caso de estudo realizado.

4.1. Apresentação da Empresa

A Ciclo Fapril – Indústrias Metalúrgicas, S. A. iniciou a sua atividade em 1965, em Águeda, dando resposta às necessidades do setor de produção de bicicletas e motorizadas em Portugal. Na década de 70 entra no setor automóvel e evolui para outros setores, fornecendo sempre componentes metálicos. Atualmente, dedica-se ao fabrico de componentes metálicos baseados em estampagem e quinagem de chapa, corte e dobragem de tubo e arame, tornearia, mecanização e soldadura (Ciclo Fapril, 2019).

A empresa conta com 140 colaboradores e está dividida nos diversos departamentos que podem ser observados através do organograma da Figura 7. Esta está presente nos mercados de 14 países, sendo o principal destino do que é produzido a exportação, onde os mercados francês, espanhol e alemão são os mais expressivos (Ciclo Fapril, 2019).

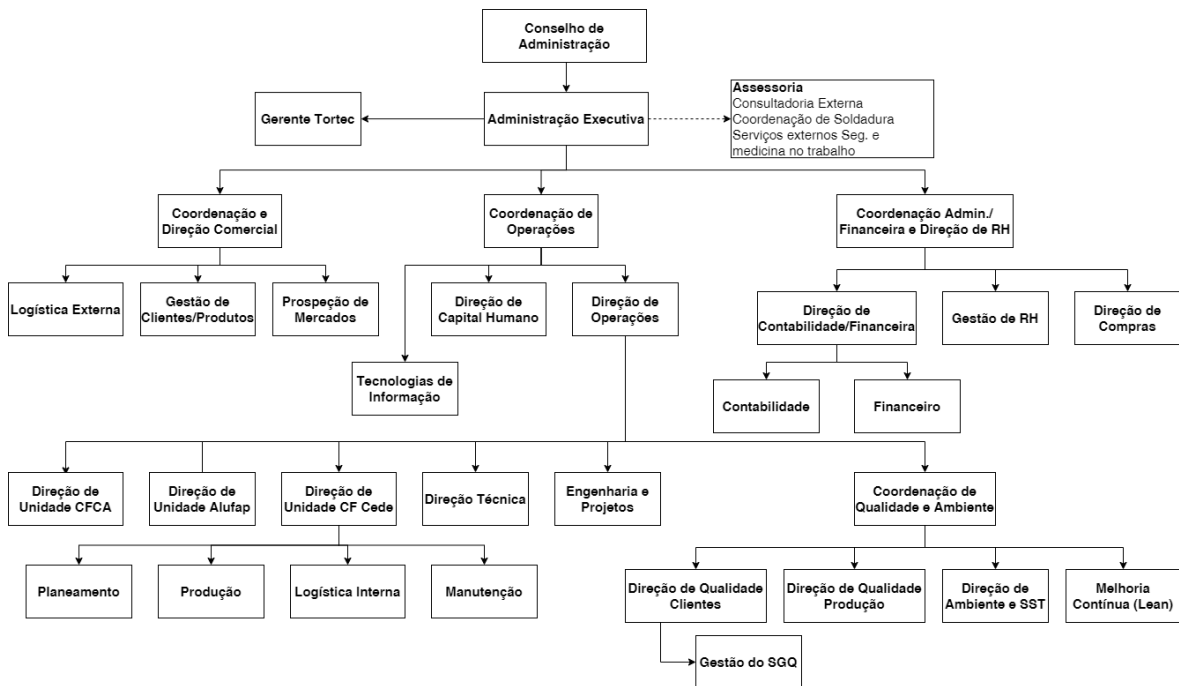


Figura 7 - Organograma da Ciclo Fapril

A Ciclo Fapril tem como atividade a produção de componentes metálicos, fazendo com que esta se insira no setor metalomecânico, e tem a Classificação de Atividade Económica (CAE), Rev-3 C25992 – fabricação de outros produtos metálicos diversos, n. e.

De acordo com o BPstat (2024), na análise efetuada ao setor metalomecânico em Portugal, referente ao ano de 2022, é observável que este é composto por cerca de 10.831 empresas que empregam 196.983 pessoas, tendo registado um volume de negócios de 34.309 milhões de euros. Quanto ao setor específico da Ciclo Fapril, mencionado acima, este conta com 870 empresas responsáveis por empregar 9713 pessoas, obtendo uma rendibilidade de 1.092.927 milhares de euros, de acordo com as estatísticas do Banco de Portugal (2024).

A Ciclo Fapril tem os seus sistemas de gestão da qualidade e de gestão ambiental certificados pelas normas NP EN ISO 9001:2015 e NP EN ISO 14001:2015, respetivamente, e é ainda certificada pela norma EN 1090-1:2009+A1:2011 para o controlo de produção em fábrica de componentes estruturais para estruturas metálicas em aço.

A empresa tem como missão satisfazer os seus clientes com base na inovação e melhoria contínua com o menor impacto ambiental, visando ser líder na área de subcontratação de produtos metálicos (Ciclo Fapril, 2019).

Os seus valores são (Ciclo Fapril, 2019):

- O dinamismo, tendo capacidade de iniciativa para enfrentar todos os obstáculos;
- O respeito, considerando sempre todos os colaboradores, parceiros e meio ambiente;
- A cooperação, mostrando-se disponível e com espírito de equipa para resolver os desafios a enfrentar em sintonia com os seus parceiros;
- A flexibilidade a todos os níveis da organização.

4.2. Descrição do Processo Produtivo

A Ciclo Fapril, uma vez que é uma empresa subcontratada, produz uma grande variedade de produtos. No entanto, o processo de fabrico descrito de seguida apenas diz respeito à estrutura metálica para camas de hospital, como se pode observar na Figura 8. Na Figura 9 é possível ver a legenda da numeração dos componentes da figura acima apresentada.

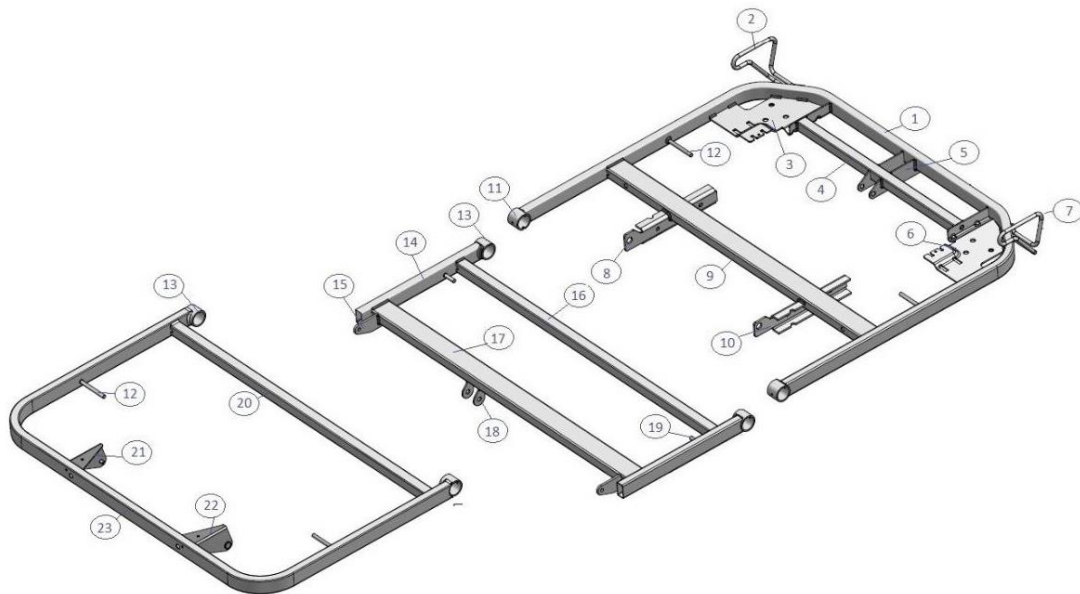


Figura 8 – Desenho da cama de hospital com numeração dos componentes

Nr	Referência	Descrição	Quant.
1	30902489	TUBO CURVADO BACKREST NARROW HR	1
2	89754	ARAME DIR BACKREST NARROW HR	1
3	20902486D	CHAPA SUP DIR BACKREST NARROW C/ PORCA HR	1
4	30902487	TUBO SUP BACKREST NARROW HR	1
5	8700638	PAT SUP ELEVACÃO ENCOSTO HR	2
6	20902486E	CHAPA SUP ESQ BACKREST NARROW C/ PORCA HR	1
7	89755	ARAME ESQ BACKREST NARROW HR	1
8	8700810	CHAPA INF DIR BACKREST NARROW HR	1
9	30902488_OB	TUBO INF BACKREST NARROW HR	1
10	8700811	CHAPA INF ESQ BACKREST NARROW HR	1
11	30903728	CASQUILHO Ø38X30,5 C FUROS	2
12	891164	PERNO Ø8X76 AÇO	4
13	30901763	CASQUILHO Ø38X30,5	4
14	30901769	TUBO LATERAL KNEE SECTION HROM	2
15	8700642	PAT SUP SECÇÃO JOELHO HR	2
16	30902482	TB INFERIOR KNEE SECTION NARROW HROM	1
17	30902483	TB SUPERIOR KNEE SECTION NARROW HROM	1
18	8700641	PAT SUP ELEVACÃO JOELHO (k) HR	2
19	89520	PERNO Ø8X30 AÇO ESPECIAL HR	2
20	30902481_OB	TRAVESSA FOOT SECTION NARROW	1
21	20903602D	CHAPA DIR CONJ PÉS	1
22	20903602E	CHAPA ESQ CONJ PÉS	1
23	30902480	TUBO CURVADO FOOT SECTION NARROW HR	1

Figura 9 - Lista de componentes

Dos componentes listados na Figura 9, só são de fabrico próprio os que resultam da transformação de tubo de aço, os restantes entram no processo através de fornecimento externo por parte de empresas quer dentro quer fora do grupo Ciclo Fapril. Deste modo, o processo produtivo inicia-se com a receção dos diferentes tipos de tubo, redondo, quadrado e retangular no armazém, onde são inspecionados para garantir que cumprem com os requisitos de qualidade da Ciclo Fapril para poderem passar às próximas de produção.

Na Figura 10 encontra-se esquematizado o processo produtivo que será descrito de seguida.

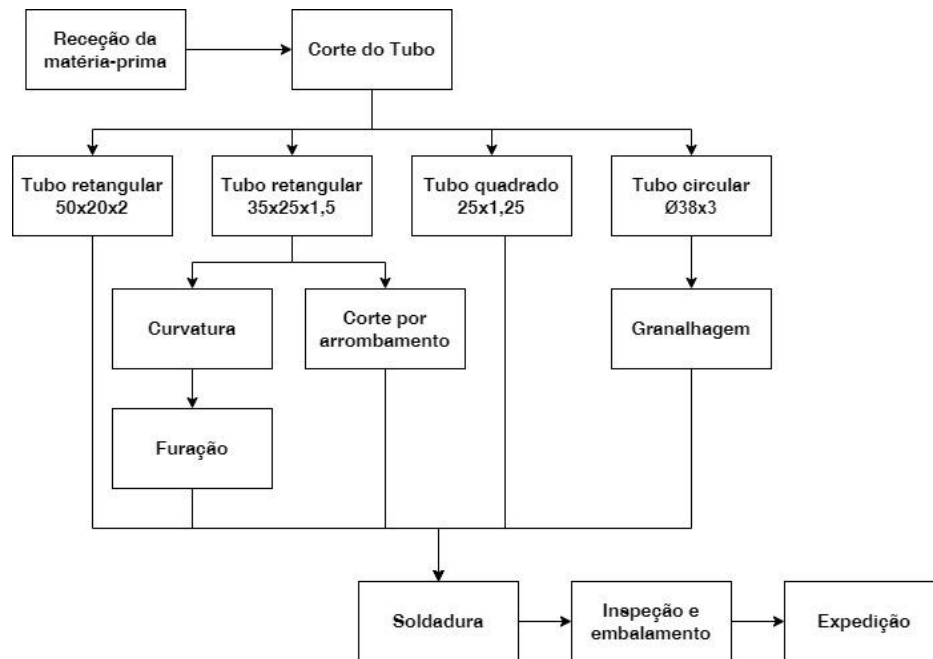


Figura 10 - Esquema do processo produtivo das camas de hospital

4.2.1. Corte de tubo

Na etapa de corte, são seccionados os tubos através de corte a laser, que além de cortar o tubo com as dimensões requeridas, também permite obter geometrias como furos ou reentrâncias, impossíveis de obter através do outro método de corte utilizado, o corte com serra circular, empregado para operações de corte reto. Ao saírem dos equipamentos, os tubos são colocados em carros específicos, alguns até com divisórias para facilitar a arrumação e a contagem de unidades produzidas e também a sequência de operações das estações para onde estes seguem posteriormente. Nas Figuras 11 e 12 é possível ver os equipamentos utilizados nestas operações, bem como os carros de transporte de peças entre a estação de corte e as restantes estações do processo produtivo.



Figura 11 - Máquinas corte a) serra circular b) laser



Figura 12 - Carros de transporte de tubo cortado

Após o corte dos diferentes tubos com os comprimentos e geometrias desejadas, o processo divide-se, uma vez que alguns tubos seguem diretamente para a soldadura que é a última etapa do processo de transformação, enquanto outros ainda têm de passar por outros processos, como a curvatura e a furação, até terem a forma necessária para poderem chegar à última fase da produção.

4.2.2. Curvatura

Uma das operações a efetuar antes da soldadura é a curvatura por mandril que, ao contrário de outros tipos de curvatura, como a curvatura hidráulica ou por indução, que utilizam força hidráulica para proceder à curvatura do tubo ou aquecem o tubo por indução antes de curvar de modo a torna-lo mais maleável, respetivamente, a curvatura por mandril permite curvas mais precisas, mantendo a forma interna do tubo e minimizando a formação de rugas, achatamentos e outras deformações que podem levar à sua rejeição, sem possibilidade de recuperação através de retrabalho. Neste equipamento estão também presentes duas matrizes, a matriz de torno, responsável por fixar o tubo seguramente durante toda a operação, e a matriz de curvatura, que define o raio de curvatura sobre o qual o tubo vai ser conformado. Desta operação resultam dois tipos de aros, os aros pequenos e os aros grandes, que vão fazer parte do suporte para os pés e do apoio para as costas, respetivamente.

A operação de curvatura inicia-se com a limpeza do tubo em todo o seu comprimento pelo operador e a inserção do tubo segundo a direção do mandril na máquina de curvar, acionando-a de seguida, tendo o operador que se manter fora do perímetro de segurança definido. Ao acionar a máquina as matrizes seguram o tubo que é avançado até ao ponto de curvatura, no qual o braço de curvatura irá aplicar a força necessária para conformar o tubo

segundo a respetiva matriz. Uma vez conformado o tubo, este é marcado pelo operador, de modo que o operador encarregue da etapa seguinte consiga saber qual a orientação correta da peça.

As peças curvadas são retiradas da máquina e controladas a 100% pelo operador, quer visualmente, sendo verificada a existência de rugosidades, deformações ou outro tipo de defeitos, quer através de um gabari de controlo que permite verificar a conformidade da peça ao nível do comprimento das extremidades e dos ângulos de curvatura. A peça curvada e devidamente inspecionada é depois colocada num cavalete de apoio ou numa caixa para facilitar o abastecimento da etapa de furação, que se encontra na mesma célula de trabalho, e, caso se verifiquem defeitos ou que as peças comecem a estar próximas dos valores limite da tolerância, cabe ao operador afinar a máquina de modo a assegurar a qualidade das peças seguintes.

Nas Figuras 13 e 14, é possível visualizar a máquina de curvar utilizada e o gabari de controlo.



Figura 13 - Máquina de curvar tubo

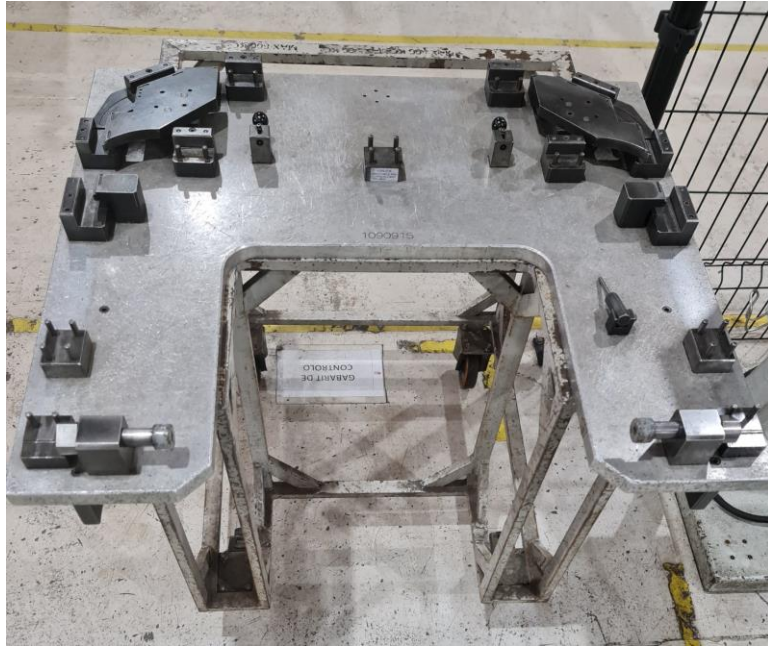


Figura 14 - Gabari de controle

4.2.3. Corte por arrombamento

É ainda necessário abordar o processo de corte por arrombamento, que é executado no tubo retangular que irá constituir a secção dos joelhos, componente central visível na Figura 8. Este processo é simples e começa pela limpeza do tubo e colocação na matriz, tendo em consideração a importância do correto posicionamento do tubo para que não ocorram deformações no tubo ou cortes desalinhados. Com a peça devidamente posicionada na matriz, o operador aciona a prensa mecânica carregando no pedal que faz descer a punção, que por sua vez realiza o corte, sendo a peça depois inspecionada visualmente para verificar a sua integridade e colocada no carro de transporte para passar à soldadura.

Nas Figura 15 e 16 pode-se observar a prensa usada, bem como a matriz onde é colocado o tubo.



Figura 15 - Prensa mecânica



Figura 16 - Matriz de corte por arrombamento

4.2.4. Granalhagem

Os tubos circulares, uma vez sobre forma de casquilhos são transportados até à secção de polimento, onde se procede à granalhagem. A granalhagem é um processo realizado para fazer o tratamento da superfície dos casquilhos através da projeção de partículas abrasivas, a granalha, contra a sua superfície a alta velocidade e pressão. Nesta operação, o operador coloca os casquilhos no tambor rotativo e, uma vez terminado o ciclo da granalhadora, o

mesmo coloca-os em caixas para depois poderem abastecer o posto da soldadura. Uma vez que se trata de componentes de pequena dimensão e que são produzidos em grande quantidade, a granalhagem dos casquilhos é, normalmente, efetuada uma vez por semana para garantir que o abastecimento da etapa seguinte está assegurado.

Na Figura 17 é possível ver a granalhadora utilizada neste processo.



Figura 17 - Granalhadora

4.2.5. Furação

No seguimento da curvatura, os tubos agora sobre a forma de aros passam à etapa da furação. Nesta etapa, o operador coloca a peça no suporte observável na Figura 18, que fixa a peça durante este processo. A operação de furação consiste na abertura de furos no topo e face da peça, sendo esta face a marcada previamente pelo operador da curvatura, bem como a fresagem das extremidades do aro. Estando concluída a furação, o operador retira a peça do suporte e usa uma pistola de ar pneumática para remover o excesso de fluído de corte do interior da peça, colocando-a no cavalete de trabalho, no qual se efetua a limpeza do líquido de corte no exterior e os acabamentos manuais, sendo os furos no topo de ambos os aros são escareados e, no caso dos aros pequenos, as extremidades fresadas são limadas. Uma vez concluídos os acabamentos e estando as peças limpas do fluído de corte, estas são colocadas num carro especial para poderem ser transportadas para a última fase, a soldadura.

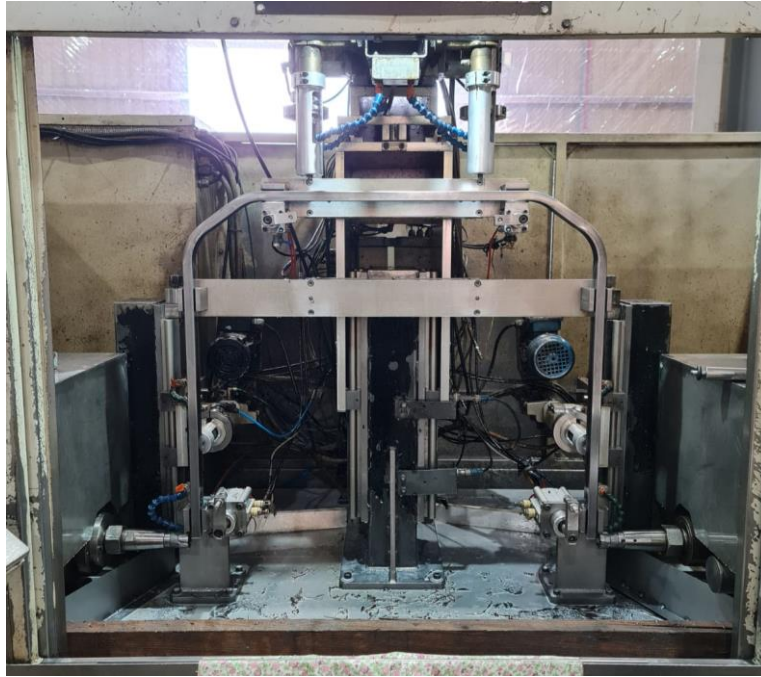


Figura 18 - Suporte da máquina de furar com aro grande

4.2.6. Soldadura

A última etapa do processo produtivo é a soldadura, sendo a soldadura *Metal Inert Gas/Metal Active Gas* (MIG/MAG) a utilizada para realizar a união de todos os componentes listados na Figura 9. Este tipo de soldadura, efetuado por dois *robots* de soldadura apresentados na Figura 19, é um processo de arco elétrico que utiliza um eletrodo consumível e uma atmosfera protetora de gás. Esta operação é realizada alternando entre os dois lados do *robot* de soldadura, no qual de um lado é soldado o apoio para as costas e no outro são soldadas a suporte para os pés e a secção dos joelhos, uma vez que têm um número próximo de componentes e pontos de solda.



Figura 19 - Robots de soldadura

O processo de soldadura começa com a limpeza e montagem dos componentes nos respetivos gabaris de soldadura, que se podem ver na Figura 20, e é pressionado o botão que valida a operação e sinaliza aos *robots* que podem iniciar a soldadura do lado do botão que foi pressionado, sendo que, quando os *robots* se encontram a soldar de um dos lados, no outro o operador retira as peças soldadas e torna a montar os componentes no gabari e a validar a operação para que quando os *robots* terminarem a tarefa do lado oposto, possam soldar do seu lado, repetindo este ciclo entre os dois operadores presentes no posto de trabalho. No espaço de tempo em que o *robot* está a soldar, os operadores colocam as peças soldadas que retiraram do gabari numa mesa de trabalho, na qual realizam uma marcação, indicando o sentido da peça, removem os pingos de solda e inspecionam a peça visualmente para a presença de defeitos, terminando por colocar as peças sem defeito num carro para serem inspecionadas antes de embalar.

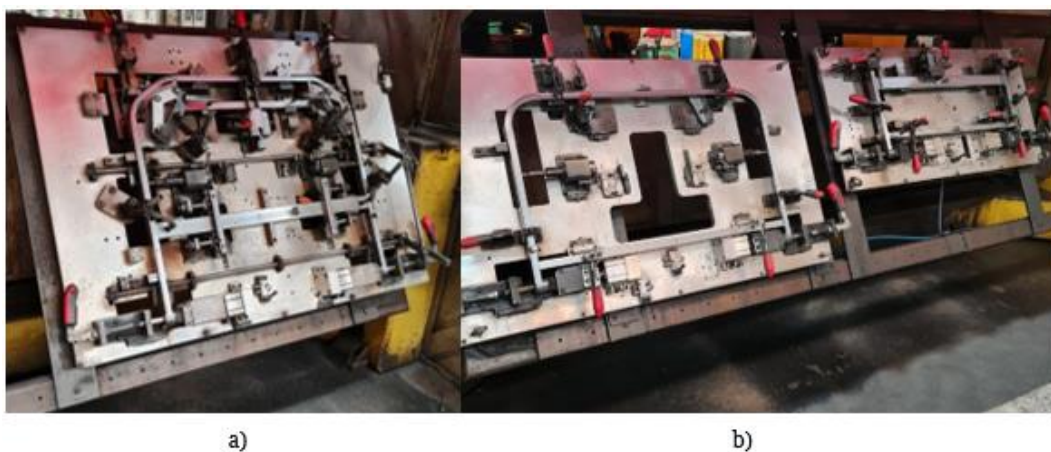


Figura 20 - Gabaris de soldadura a) apoio para costas b) suporte para pés e secção de joelhos

Alguns dos defeitos encontrados podem ser porosidades, provocadas por um mau fluxo do gás de proteção que permitem penetração de impurezas ou gases como o oxigénio na barreira de proteção, soldas desalinhadas, que ocorrem quando os componentes a soldar não estão bem limpos e ainda contêm óleo na sua superfície ou quando o elétrodo está muito comprido, e fissuras, muitas vezes causadas por interrupções abruptas na soldadura. As peças que se encontrem com defeito são marcadas e colocadas num carro igual ao mencionado anteriormente, mas de cor vermelha, que indica que são peças que necessitam de ser retrabalhadas.

4.2.7. Inspeção e embalamento

Ao concluir todas as operações, é necessário que seja efetuada uma inspeção final rigorosa das peças antes destas serem enviadas para o cliente. Um operador especializado procede à inspeção das peças, assegurando-se que nenhuma das peças contém pingos de solda, fissuras ou porosidades nos cordões de solda, bem como marcas da ferramenta de curvatura ou rugosidades e outras deformações nos tubos, de modo a cumprir com os requisitos de qualidade do cliente. As peças conformes são colocadas em caixas de cartão pelo próprio operador e recolhidas por um operador logístico que as transporta para o armazém de expedição. No armazém de expedição são colocadas nas caixas as etiquetas com todas as informações necessárias à rastreabilidade do produto, envolvidas em plástico e expedidas para o cliente.

Capítulo 5

Caso de Estudo

Este capítulo contém a apresentação do caso de estudo e a descrição da implementação das ferramentas utilizadas em conjunto com o *robot* colaborativo. Após a elaboração dos programas do *cobot* para os diferentes componentes a produzir, foram realizadas simulações e recolhidos os novos dados, procedendo-se de seguida à sua apresentação e discussão, na qual foi efetuada a comparação entre o estado antes e o estado esperado da implementação do *robot* colaborativo e das ferramentas *Lean* referidas.

5.1. Apresentação do Caso de Estudo

O caso de estudo foi realizado no posto de trabalho da curvatura e furação, no qual foi proposto ao autor que implementasse um *robot* colaborativo para auxiliar na operação de curvatura de aros para camas de hospital, com o objetivo de automatizar o processo, minimizando as operações a realizar pelo operador e aumentando os níveis de produtividade e padronização do mesmo.

Ao iniciar o projeto, o autor foi recebido pelo diretor de produção da Ciclo Fapril, que o guiou pelas diferentes áreas da empresa, transmitindo conhecimento sobre as diferentes operações que eram realizadas dentro da mesma. Após ter sido transmitida uma visão integral das atividades da empresa, foi realizada uma caracterização mais aprofundada das tarefas e respetivas secções relacionadas com o projeto, nomeadamente a curvatura e a furação, que eram as operações nas quais se pretendia que fosse instalado o *robot* colaborativo.

Uma vez proposto o projeto de implementação do *robot* colaborativo, foi necessário realizar um levantamento do estado atual do processo de fabrico descrito anteriormente, e, para esse efeito, foi utilizado o VSM, uma vez que é uma ferramenta que permite ter uma visão global de todo o processo e dos seus fluxos de matéria e informação. Em conjunto com o mapeamento da cadeia de valor utilizou-se o OEE, de modo a obter uma perspetiva mais completa do processo, através da integração da efetividade dos equipamentos em cada operação.

5.1.1. Aplicação das ferramentas *Lean*

Das quatro ferramentas referidas, o VSM, o 5S, o OEE e o *standard work*, o VSM foi a primeira a ser utilizada uma vez que, tal como mencionado anteriormente, permite

visualizar o processo como um todo e analisar possíveis fontes de desperdícios. Assim, de modo a realizar o levantamento inicial do processo, começou-se por recolher os tempos de ciclo das operações de todos os componentes produzidos internamente para proceder à construção do mapa atual do processo.

Ao observar o processo de fabrico, durante a fase de recolha de dados, denotou-se que existia uma falta de uniformidade na forma como os diferentes operadores executavam as tarefas da operação de furação, quer na própria execução, quer na sequência em que as tarefas eram efetuadas, assim como se reparou numa variação dos tempos de ciclo registados nessa mesma operação quando um operador diferente a realizava. Esta variação poderia resultar da falta de padronização do trabalho, uma vez que cada operador executava as tarefas da forma que considerava melhor, assegurando-se apenas de que a peça produzida estava dentro dos requisitos de qualidade estabelecidos. Outros motivos para a variação do tempo de ciclo poderiam ser o desgaste das fresas e brocas, bem como o controlo do fluxo de fluído de corte, que quanto mais elevado for, maior será a velocidade de avanço das ferramentas, contudo, estes fatores podem ser facilmente controlados pelo operador, mantendo um ritmo de trabalho adequado ao fluxo de produção e à prolongação do tempo de vida das ferramentas.

Face às variações identificadas na execução do trabalho, foi definido que seria adequado aplicar o *standard work*, através da elaboração uma instrução de trabalho padronizado, de modo a ter um processo mais uniforme e uma base sólida para formação de novos operadores ou fácil adaptação de operadores de outras secções do chão de fábrica.

Como base para padronização do trabalho, a ferramenta 5S também seria aplicada. Apesar dos sentidos de utilização, organização, limpeza e disciplina estarem presentes na cultura da empresa, era necessário sensibilizar os operadores para a importância da padronização do trabalho e de criar e recorrer a documentos padronizados como base para a melhoria contínua.

Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados os tempos de ciclo medidos, em minutos e segundos, de todas as operações realizadas para o fabrico dos componentes individuais e da operação de soldadura que os une com os restantes componentes obtidos externamente. Contudo, deve ser notado que os tempos de ciclo de operações como a curvatura, furação e soldadura, que são influenciados pela destreza e experiência do operador que as executa, resultam da média de várias medições realizadas ao longo do período em que o autor se encontrava na empresa

a desenvolver o caso de estudo, o que pode acabar por camuflar a realidade do processo no seu dia a dia.

Tabela 4 - Tempo de ciclo das operações de fabrico de componentes

	Referência	Corte tubo	Corte por arrombamento	Granalhagem	Curvatura	Furação
Tempo de ciclo	1769	00:14	00:06	-	-	-
	2480	00:14	-	-	00:54	1:50
	2481	00:16	-	-	-	-
	2482	00:16	-	-	-	-
	2483	00:17	-	-	-	-
	2487	00:03	-	-	-	-
	2488	00:22	-	-	-	-
	2489	00:14	-	-	1:11	1:54
	3728	00:05	-	00:02	-	-
	1763	00:05	-	00:02	-	-

Tabela 5 - Tempo de ciclo da união dos componentes

	Referência	Soldadura
Tempo de ciclo	3010 - Suporte pés e secção joelhos	6:35
	3010 – Apoio para costas	6:30
	3010 – Controlo e embalamento	2:20

De seguida, na Figura 21, é apresentado o mapa VSM do estado atual do processo de fabrico das camas de hospital. Dado o modo como os registos são efetuados, a Ciclo Fapril apenas analisa o OEE para as secções de produção como um todo, ao invés de analisar o OEE por equipamento. Face a isso, optou-se por incluir no VSM apenas o parâmetro da disponibilidade dos equipamentos utilizados nas operações apresentadas anteriormente.

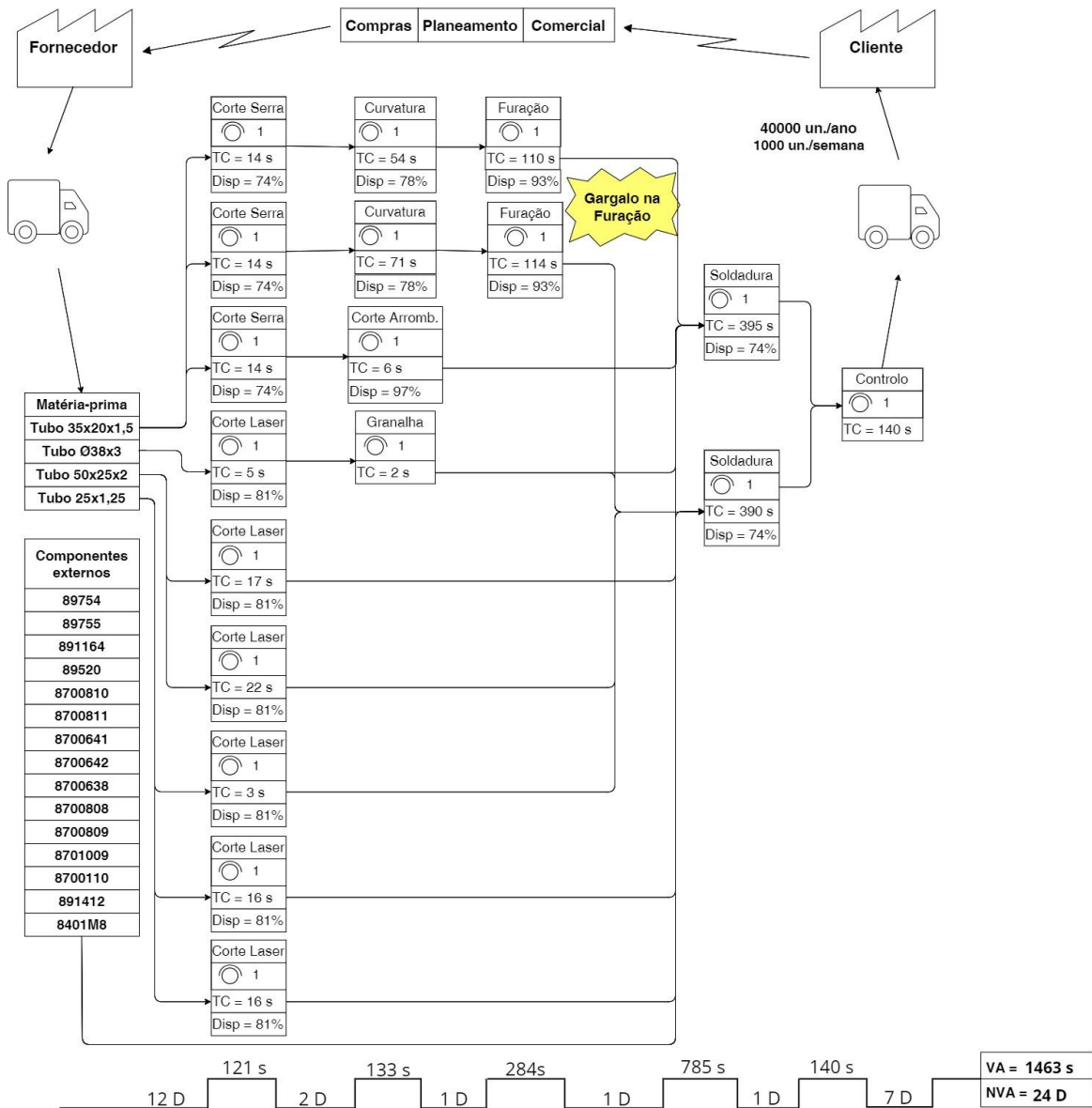


Figura 21 - Mapa atual do processo

Ao se analisar o VSM do estado atual, identificou-se um gargalo na etapa de furação, fruto do elevado tempo de ciclo nesta operação relativamente à operação de curvatura que a antecede. Este gargalo além de poder interferir com o abastecimento da operação de soldadura, pode provocar também a acumulação de caixotes de aros por furar, originando o congestionamento das vias de circulação no chão de fábrica. Deste mapa, denota-se ainda o elevado tempo de atividades sem valor acrescentado, sendo grande parte deste correspondente ao tempo de encomenda e receção da matéria-prima em armazém, bem como ao tempo de recolha das peças embaladas, sendo esta recolha efetuada pelo cliente.

Com vista à uniformização do trabalho foi elaborada uma instrução de trabalho padronizado, na qual são especificadas as responsabilidades, a sequência de tarefas e as

medidas de segurança necessárias à realização da operação de furação. Pretende-se que com este documento haja um registo detalhado e disponível para os operadores, de como as tarefas daquela operação devem ser executadas por forma a garantir uma maior uniformidade entre eles na sua forma de trabalhar. De modo a assegurar que a instrução de trabalho elaborada descreve a sequência ótima e que constam no documento todos os elementos necessários, e que os mesmos estão corretos, foram consultados os operadores, o capitão da equipa e a responsável pela secção, resultando no documento que pode ser analisado no Anexo I.

Além da elaboração da instrução de trabalho, era importante determinar qual o ritmo de trabalho necessário para cumprir com a quantidade encomendada, ou seja, o *Takt time*. Para uma encomenda de 40.000 unidades anuais, a Ciclo Fapril, nas suas 40 semanas de trabalho procede à produção desta quantidade prevista, tendo em conta possíveis aumentos ou diminuições nas encomendas mensais. Assim, através da equação 6 foi possível calcular o *Takt time* para a produção semanal da linha das camas de hospital.

$$Takt\ time = \frac{Unidades\ a\ produzir}{Tempo\ de\ produção\ disponível} = \frac{40000}{40} = 1000\ unidades/semana \quad (6)$$

A padronização do trabalho deve ser algo enraizado na cultura das empresas para que o trabalho seja consistentemente efetuado de forma correta e segura. No caso da Ciclo Fapril, os sentidos de utilização, organização, limpeza e disciplina estão já presentes na cultura da empresa, pois tal como se pode ver pela Figura 22, existem marcações no chão a demarcar os espaços de trabalho e o devido local dos elementos presentes no chão de fábrica, em cada posto de trabalho existe um *kit* de limpeza que é utilizado diariamente e nos postos onde é necessário utilizar ferramentas, apenas se encontram nas mesas de trabalho as ferramentas que são necessárias utilizar. A empresa tem ainda implementada uma iniciativa própria de 7S, na qual aos 5S acrescentou os sentidos de sustentabilidade e segurança, assim como reforça a difusão dos seus valores, missão e visão por todos os membros da organização. Neste sentido, a elaboração da instrução de trabalho, veio reforçar a necessidade de melhorar o sentido de padronização, para que se crie uma rotina de trabalho padronizada e adequada, garantindo sempre a qualidade do que é produzido e a segurança dos operadores envolvidos na operação.



Figura 22 - Exemplos do 5S na Ciclo Fapril

Na Figura 23 apresenta-se um cartão que é distribuído por todos os colaboradores da Ciclo Fapril no âmbito da iniciativa de 7S, à qual são realizadas auditorias internas com regularidade, quer nos gabinetes, quer nos postos de trabalho no chão de fábrica, de modo a assegurar que todos dentro da organização, desde os responsáveis pelas diversas secções aos operários fabris, cumprem os objetivos desta iniciativa que tem por base a criação e manutenção de postos de trabalho, limpos, organizados e seguros.

Segurança	Eliminar	Arrumar	Limpar	Standardizar	Respeitar	Sustentabilidade
Estamos em segurança?	É útil?	É fácil de encontrar?	A área de trabalho está limpa?	Qual é o Standard?	O Standard é respeitado?	Como está o nosso Planeta?
<p> Criar um ambiente de trabalho seguro</p>	<p> Separar o necessário do desnecessário</p>	<p> Tudo tem um lugar e cada coisa deve estar nesse lugar</p>	<p> Limpar o local de trabalho. Pintar se necessário. Desenvolver estratégias para reduzir as fontes de sujidade e otimizar a limpeza</p>	<p> Definir uma checklist e um standard para a arrumação e limpeza (incluir qual o material de limpeza a utilizar e a duração da mesma)</p>	<p> Criar uma cultura de limpeza e arrumação tendo por base a autodisciplina. Criar um sistema de auditoria para comparar todas as áreas da organização.</p>	<p> Criar métodos que potenciem a qualidade de vida e longevidade do Planeta</p>
VISÃO						
ONDE QUEREMOS CHEGAR						
Ser líder na área de subcontratação de produtos metálicos						
MISSÃO						
ONDE ESTAMOS						
Satisfazer os requisitos do cliente com base na inovação e melhoria contínua, com o menor impacto ambiental						
VALORES						
O QUE NOS É MAIS IMPORTANTE						
Flexibilidade						
<i>Ser flexível a todos os níveis da nossa organização</i>						
Cooperação						
<i>Estar sempre disponível e ter espírito de equipa para resolver os problemas que a nossa organização enfrenta em sintonia com os nossos parceiros</i>						
Dinamismo						
<i>Ter capacidade de iniciativa para enfrentar todos os obstáculos</i>						
Respeito						
<i>Considerar todos os colaboradores, parceiros e meio ambiente em toda a nossa atuação</i>						

Figura 23 - Cartão de 7S

5.1.2. Apresentação de Propostas de Melhoria

Uma vez realizado o levantamento do processo, foram identificadas algumas falhas promotoras de desperdícios, tais como:

- Falta de padronização e instruções de trabalho específicas para a execução de tarefas;
- Transporte dos aros furados para a estação da soldadura pelo operador da furação;
- Gargalo na etapa de furação;
- Falta de registos no sistema informático provocada pela dependência de ordens de fabrico em papel.

Os desperdícios como a falta de padronização ou o transporte de material por parte do operador, que o obriga a parar a produção, causam um aumento do tempo de ciclo e obrigam a paragens desnecessárias que acabam por agravar o problema do gargalo na etapa de furação, uma vez que os tubos após serem todos curvados e transformados em aros, demoram cerca de mais um turno para serem furados, apesar de ambas as etapas do processo produtivo ocorrerem em simultâneo.

A dependência de documentos em suporte físico faz com que nem sempre sejam efetuados registos das operações no sistema informático, como paragens não planeadas ou *setups*, o que leva a que os indicadores utilizados para medir a eficiência dos processos e a eficácia dos equipamentos, como é o caso do OEE, calculados com base nos dados que constam no sistema através do registo, não retratam o processo devidamente, apresentando, por exemplo, valores de disponibilidade do equipamento ou produtividade diferentes dos reais.

Face aos problemas identificados foram propostas melhorias ao processo que englobam a utilização de ferramentas *Lean*, bem como a utilização de tecnologias da Indústria 4.0:

- Elaboração de uma instrução de trabalho padronizado para o posto da furação;
- Alteração da responsabilidade do transporte do carro de componentes do posto de furação para o de soldadura;
- Aumentar a digitalização dos documentos e dos postos de trabalho para maior facilidade nos registos;
- Implementação do *robot* colaborativo para diminuição do tempo de ciclo;

Com estas propostas, pretende-se diminuir os tempos de ciclo das operações para os postos de trabalho afetos ao projeto, bem como criar um *standard work* que se possa estender aos restantes postos de trabalho e utilizar os recursos associados à I4.0 para automatizar os

processos e diminuir a carga de trabalho sobre os operadores, possibilitando também a oportunidade para um melhor aproveitamento dos recursos humanos por parte da empresa.

Na Figura 24 pode ser visualizado o VSM do estado futuro do processo, no qual se pode observar qual o estado esperado do processo após a implementação das melhorias apresentadas anteriormente.

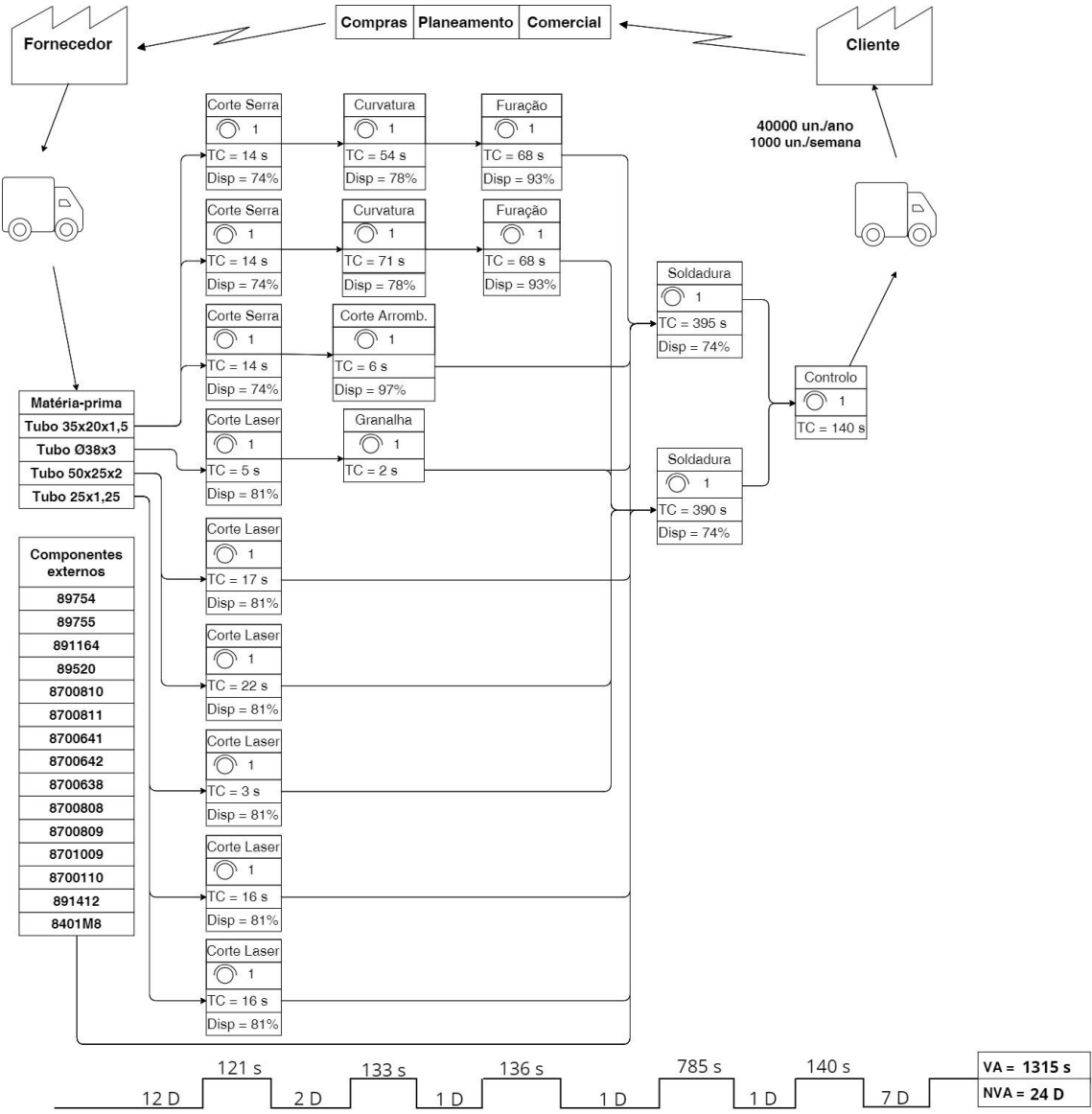


Figura 24 - Mapa futuro do processo

Relativamente ao mapa inicial apresentado na Figura 21, o mapa futuro do processo apresentado conta com a introdução do *robot* colaborativo no posto de furação e com a elaboração de uma instrução de trabalho padronizado a ser introduzida nesse mesmo posto de trabalho, por forma a eliminar o gargalo nele existente. Ao analisar o mapa futuro, denota-se uma redução do tempo de valor acrescentado ao implementar as propostas

elencadas anteriormente, com especial foco para a implementação do *robot* colaborativo, que permitirá uma redução do tempo de ciclo da operação de furação de 114 segundos para 68 segundos, retirando tarefas ao operador e deixando-o com mais tempo para executar os acabamentos manuais nas peças após a maquinação. Deste modo, a operação de furação passa a ter a capacidade de acompanhar o fluxo da operação de curvatura, não só eliminando o gargalo que existe nesta operação, mas também resultando em ganhos logísticos, através da eliminação das caixas de aros por furar que se acumulam entre as duas operações.

5.1.3. Implementação do *robot* colaborativo

Tendo uma visão global do processo e estando este padronizado procedeu-se então à implementação da peça chave do projeto, o *robot* colaborativo, ilustrado na Figura 25. Trata-se de um *robot* colaborativo EC66 da Elite Robots com seis eixos de movimento, um alcance máximo de 941 mm e uma capacidade de carga máxima de 6 kg.



Figura 25 - *Robot* colaborativo

O *robot* mencionado trata-se apenas de um braço robótico, que necessita de um atuador final, que pode variar consoante a utilização pretendida para o equipamento. Para o caso de estudo em questão, em que o *robot* irá realizar operações de *pick and place*, é necessária uma pinça para que seja possível agarrar e movimentar o tubo conforme desejado. Numa fase inicial, pensou-se em adquirir uma pinça magnética, uma vez que é bastante versátil e se consegue adaptar às diferentes geometrias dos tubos utilizados pela Ciclo Fapril, sendo que estes são sempre materiais ferrosos, o que poderia minimizar tempos de *setup* da troca da garra para os diferentes tipos de tubo. No entanto, dado o formato dos componentes em análise neste caso de estudo, a pinça magnética acabou por ser descartada enquanto opção,

visto que por ter apenas um ponto de contacto, existia sempre a possibilidade de o manuseamento da peça não ser o ideal. Como tal, foi desenvolvida internamente a pinça apresentada na Figura 26.



Figura 26 - Pinça do *robot* colaborativo

Inicialmente, este caso de estudo estava centrado na linha de produção de camas de hospital, tendo sido primeiramente proposto que este fosse alocado ao posto de curvatura dos aros. Contudo, durante a etapa de recolha de dados, reparou-se que existia uma diferença considerável nos tempos de ciclo de curvatura e de furação, sendo estes de 71 e de 114 segundos para os aros do suporte para costas e de 54 e 110 segundos para os aros do apoio para pés, respetivamente. Face a esta discrepância nos tempos de ciclo das duas operações que ocorrem simultaneamente, foi proposto aos responsáveis pelo projeto que se alterasse a etapa do processo produtivo na qual o *cobot* seria implementado, uma vez que ao introduzir este equipamento na etapa de curvatura iria apenas agravar um gargalo já existente na etapa de furação.

Assim, ao introduzir o *robot* na operação de furar aros, pretendeu-se minimizar o manuseamento da peça por parte do operador e aumentar a sua produtividade através da redução do número de tarefas que este tinha de executar por peça, deixando-o apenas com as tarefas de limpeza, acabamentos manuais e colocação da peça terminada no carro de

transporte, uma vez que a geometria da própria peça e o formato do carro dificultavam a execução dessa tarefa pelo *robot*.

Apesar do projeto ser destinado à linha de produção de camas de hospital, percebeu-se que mesmo com a alteração do posto de trabalho a que o *cobot* iria ser alocado, a implementação deste equipamento para a linha de produção inicialmente proposta não seria muito viável, devido a diversos fatores, sendo eles o formato das peças a produzir, que pela sua dimensão e formato dificultava o manuseamento da peça pelo *robot*, e também o facto de a pinça desenvolvida internamente não ter sido concebida para agarrar o tipo de tubo utilizado nas operações de curvatura e furação. Como tal, foi realizada uma análise no chão de fábrica de modo a seleccionar outros postos de trabalho com potencial para a aplicação do *robot*, independentemente da linha de produção.

Os postos de trabalho seleccionados estão afetos à produção dos componentes que podem ser analisados nas Figuras 27 e 28. Estes componentes fazem parte da linha de produção de bicicletas infantis de roda de catorze e de dezasseis polegadas, sendo que para a produção de uma bicicleta, são necessárias duas unidades do componente da Figura 27 e apenas uma unidade do componente da Figura 28. Estes postos de trabalho e respetivos componentes foram seleccionados devido à simplicidade das operações e pelo facto de a pinça desenvolvida ter sido concebida para agarrar tubos redondos como os da Figura 27, sendo capaz também de agarrar com facilidade os tubos da Figura 28, apesar do aumento no diâmetro. Assim, com a inclusão destes postos de trabalho, foi possível realizar um estudo de implementação mais amplo e que permitiu analisar qual o melhor local para a alocação do *robot* colaborativo.

Na Figura 27 é apresentado um tubo que integra o quadro das bicicletas, que vai ser analisado na operação de curvatura que lhe confere o formato observável.

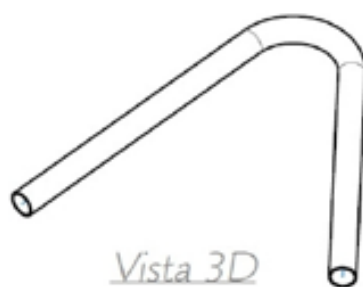


Figura 27 - Tubo curvado para quadro de bicicleta

Na Figura 28, é possível observar o tubo que fará o suporte para o guiador, maquinado num centro de maquinação de comando numérico computadorizado (CNC).

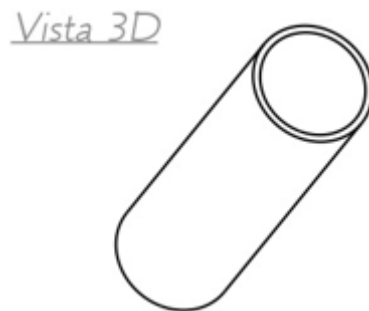


Figura 28 - Tubo para suporte de guidador de bicicleta

Ao contrário do posto de furação, no qual o *robot* trabalha juntamente com o operador, levando-o a executar menos tarefas, para estes dois postos de trabalho, dada a simplicidade das tarefas, o *robot* colaborativo vai substituir o operador humano, permitindo que este seja aproveitado para outras tarefas mais complexas, em vez realizar a tarefa repetitiva de alimentar a máquina. Contrariamente também ao estudo realizado para a linha das camas de hospital, para os componentes apresentados não foi elaborado um VSM de modo a efetuar um levantamento de todo o processo, uma vez que foram apenas analisados os postos de trabalho especificamente para as operações de curvatura do tubo da Figura 27 de maquinação do tubo da Figura 28. Neste caso, só foram medidos os tempos das operações específicas em estudo.

5.1.3.1. Programação do *robot* colaborativo

Tendo o *robot* um atuador final, este está pronto para realizar as operações desejadas. O braço robótico é ainda acompanhado de um controlador e de uma consola, com a qual se efetua a programação, sendo que esta pode ser realizada de duas formas, através de *scripts* que podem ser carregados na consola através de uma *pen* USB, ou criando um ficheiro na própria consola, na qual são inseridos os comandos através do menu de instruções e definidos os pontos ao arrastar manualmente o *robot* para as posições desejadas.

Uma vez que a programação usando a consola é um método bastante intuitivo e a possibilidade de arrastar o braço robótico para a posição desejada, permitindo que se visualizem os pontos exatos que o *robot* deve alcançar de modo a poder executar os movimentos desejados de forma precisa, o autor optou por esse método para operacionalizar o *robot*, tendo elaborado os programas para a produção dos três componentes em análise.

Existem diversos tipos de comandos que podem ser inseridos durante a elaboração de um programa para este tipo de *robot*, podendo estes pertencer aos grupos de instruções de *input* e *output*, de controlo lógico, matemáticas, de movimento, de definição e aquisição, entre outros. Na Tabela 6 constam alguns dos comandos pertencentes ao conjunto de instruções referidos.

Tabela 6 - Tabela de instruções de programação do *robot* colaborativo

Grupo de instruções	Instrução	Descrição
<i>Input/Output</i>	DIN	<i>Input</i> digital
	DOUT	<i>Output</i> digital
	MIN	<i>Input</i> virtual
	MOUT	<i>Output</i> virtual
Controlo Lógico	IF	Declaração <i>If</i>
	ELSE	Declaração <i>Else</i>
	WHILE	Declaração de ciclo <i>While</i>
	WAIT	Espera
	TIMER	Temporizador
	PAUSE	Pausa
Matemáticas	AND	Operação lógica E
	OR	Operação lógica OU
	ADD	Operação de soma
	DIST	Calcular a distância entre dois pontos
Movimento	MOVJ	Interpolação de articulações
	MOVC	Interpolação circular
	MOVL	Interpolação linear
	MOVDRAG	Repetição de deslocação livre
Definição e Aquisição	SETJOINT	Designação de posição
	SET	Designação de variável
	SETTOOLFRAME	Definir coordenadas da ferramenta
	GETTOOLFRAME	Obter coordenadas da ferramenta

A programação do *robot* iniciou-se com a definição das coordenadas dos pontos através do comando “SETJOINT”, que grava os valores angulares das seis articulações do *robot* numa variável designada de P. De seguida, são introduzidos os comandos de movimentam o *robot* até aos pontos previamente definidos, tendo sido utilizado o comando “MOVJ”, que move o equipamento por interpolação articular para a posição desejada.

Após a introdução dos comandos de movimento dos pontos de recolha e colocação da peça, foi inserido um comando de ativação da ferramenta “DOUT” ao qual se acrescenta “ON” ou “OFF” para se realizar o fecho da pinça no ponto de *pick* e a abertura da mesma no respetivo

ponto de *place*, sendo ainda adicionada a instrução *TIMER* que mantém o *robot* na sua posição atual durante o intervalo de tempo definido, para garantir a correta fixação das peças que são agarradas, assim como a colocação das peças na máquina. Na Figura 29 pode ser observado um exemplo de um programa de *pick and place* simples com um ponto de recolha e um ponto de colocação final.

```
8 SETJOINT P007 -22.5845,-40.6069,27.1776,-99.4441,84.1987,-70.9518,0.0000,0.0...
9 SETJOINT P008 -31.8985,-55.1402,53.5900,-112.1277,86.6578,-79.7519,0.0000,0.0...
10 SETJOINT P009 29.8236,-56.3582,56.0111,-113.3237,86.6111,-79.6454,0.0000,0.0...
11 SETJOINT P010 29.8236,-51.4199,73.4691,-113.6215,87.9043,-79.7106,0.0000,0.0...
12 MOVJ P001 VJ=60% PL=7
13 MOVJ P002 VJ=60% PL=7
14 MOVJ P003 VJ=40% PL=0 ACC=50 DEC=50
15 DOUT OT#(1) ON
16 TIMER T=1.0 S
17 MOVJ P004 VJ=60% PL=7
18 MOVJ P005 VJ=60% PL=0 ACC=50 DEC=50
19 DOUT OT#(1) OFF
20 TIMER T=1.0 S
21 MOVJ P001 VJ=60% PL=7
22 TIMER T=13.0 S
23 MOVJ P006 VJ=100% PL=5
24 MOVJ P007 VJ=40% PL=0
25 DOUT OT#(0) ON
26 TIMER T=1.0 S
27 MOVJ P008 VJ=50% PL=0
28 MOVJ P009 VJ=70% PL=0
```

Figura 29 - Programa de *pick and place* para *robot* colaborativo

5.2. Apresentação e Discussão de Resultados

Após a elaboração dos programas, foram realizadas simulações para as três operações, aproximando sempre os movimentos e os pontos da realidade das operações e tendo em consideração os tempos de operação das máquinas que vão realizar as transformações nos tubos para os diferentes componentes. Deste modo, com a integração deste *robot* colaborativo nos postos de trabalho, será possível aumentar a sua produtividade, não só pela diminuição do tempo de ciclo das operações, mas também pela eliminação das paragens ou quebras no ritmo de trabalho provocadas pela fadiga de um dia de trabalho, uma vez que uma das grandes mais valias deste tipo de equipamentos é a sua capacidade de trabalhar a um ritmo consistente e de forma ininterrupta. Fruto das simulações realizadas, foram recolhidos os novos tempos de ciclo, que constam na Tabela 7, de modo a ser possível comparar o estado atual das operações com o estado esperado após a implementação do *cobot*.

Tabela 7 - Tempos de ciclo antes e após a implementação do *cobot*

		Furação de aros	Curvatura de tubos para quadros	Maquinação de suporte de guiador
Tempo de ciclo (segundos)	Estado atual	114	40	59
	Após <i>robot</i>	68	30	40

Nas equações 7 e 8 apresentam-se as fórmulas de cálculo para a produtividade e para o seu aumento percentual, respetivamente.

$$Produtividade\ real = \frac{3600}{tempo\ de\ ciclo} \times fator\ de\ ocupação\ da\ máquina \quad (7)$$

Este fator de ocupação da máquina trata-se de um valor percentual que considera o tempo em que a máquina está ocupada pelo operador face ao tempo disponível para produzir. A Ciclo Fapril nos seus cálculos internos para definição dos objetivos de produção tem este valor estabelecido em 90%, de modo a excluir as paragens por pausas programadas ou outras necessidades dos operadores dos cálculos de produtividade.

$$Aumento\ (\%) = \frac{(Produtividade\ esperada - Produtividade\ atual)}{Produtividade\ atual} \times 100 \quad (8)$$

Nas equações 9 e 10, são apresentadas as fórmulas de cálculo para determinar o custo unitário das peças para os três componentes, bem como o número de horas semanais necessárias trabalhar para dar resposta à carga de trabalho necessária para o cumprimento da quantidade encomendada.

$$Custo\ unitário = \frac{Custo\ hora\ da\ operação}{N^o\ de\ peças\ por\ hora} \quad (9)$$

$$Carga\ horária\ necessária = \frac{Quantidade\ da\ encomenda\ anual}{(Carga\ horária\ semanal \times N^o\ de\ peças\ por\ hora)} \quad (10)$$

Na Tabela 8 é apresentado um resumo do estado atual do processo e do estado esperado do processo com a implementação do *cobot* para os três postos de trabalho diferentes.

Tabela 8 - Comparação entre o estado atual e o estado após a implementação do *robot*

			Tempo/ciclo (s)	Produtividade (un./h)	Custo (€/un.)	Horas necessárias
Comparação entre o estado atual e após implementação do <i>robot</i>	Furação de aros	Estado atual	114	28	0,60	14,4
		Com <i>robot</i>	68	48	0,35	8,4
	Curvatura de tubos para quadros	Estado atual	40	79	0,36	10,3
		Com <i>robot</i>	30	108	0,26	7,6
	Maquinação de suporte do guiador	Estado atual	59	61	0,47	6,7
		Com <i>robot</i>	40	81	0,35	5,1

Como se pode verificar através da análise dos dados apresentados na Tabela 8, espera-se que os tempos de ciclo diminuam, especialmente na operação de furar da linha das camas de hospital, uma vez que ao retirar as etapas de colocação e retirada da peça na máquina de furar das tarefas do operador, este passa a ter mais tempo para efetuar a limpeza e acabamentos da peça, eliminando por completo o intervalo de tempo em que a máquina não operava porque o operador tinha de realizar outras tarefas, resultando num aumento da produtividade de 71,4%. Já para os componentes dos quadros de bicicleta e suporte do guiador, esperam-se aumentos de 36,4% e 32,8%, respetivamente.

A última coluna da Tabela 8 diz respeito ao número médio de horas numa semana de trabalho que são necessárias para produzir face à quantidade requerida de cada componente para responder à encomenda do cliente, tendo em conta os níveis de produtividade.

Nas equações 11, 12 e 13, são expostos os cálculos para as colunas do ganho anual, número de peças para amortizar o *robot* e o tempo de retorno do investimento, respetivamente.

$$Ganho\ anual = Ganho\ unitário \times Quantidade\ anual \quad (11)$$

$$N^{\circ}\ de\ peças\ para\ amortizar\ o\ robot = \frac{Custo\ do\ robot}{Ganho\ unitário} \quad (12)$$

$$\text{Tempo de retorno do investimento} = \frac{N^{\circ} \text{ de kits completos} \times 11 \text{ meses}}{\text{Quantidade de encomenda}} \quad (13)$$

O aumento da produtividade esperado com a implementação do *robot* colaborativo, prevê ainda numa diminuição do custo unitário dos componentes. Na Tabela 9, podem ser observados os ganhos financeiros espectáveis da aplicação deste equipamento para os três postos de trabalho referidos, bem como o tempo estimado para o retorno do investimento efetuado, que ronda os 13.000 euros.

Tabela 9 - Ganhos financeiros da implementação do *cobot*

	Ganho unitário (€/un.)	Ganho anual (€)	Quantidade anual	Nº de peças para amortizar o robot	Tempo de retorno do investimento (meses)
Camas de hospital	0,25	20.119	80.000	51.693	7,1
Quadros de bicicleta	0,10	15.761	163.840	135.142	9,1
Suporte de guiador	0,12	9.430	81.920	112.927	15,2

O número de *kits* corresponde à quantidade total de camas ou bicicletas dos dois tipos completas a produzir para se obter o retorno do investimento, ou seja, uma vez que uma cama de hospital completa necessita de 2 anos, o número de *kits* completos necessários produzir, é metade dos 51.693 aros, de ambos os tipos, sendo necessário produzir apenas 25.847 camas face a uma encomenda anual de 40.000 camas. Já para os tubos dos quadros de bicicleta, apesar da quantidade da encomenda de 40.960 ser a mesma para os dois tipos de bicicletas, cada bicicleta requer dois tubos curvados, o que faz com que sejam necessários curvar 135.142 tubos de uma quantidade total de 163.840 de modo a amortizar o *robot*.

No caso da linha das camas de hospital, na qual apenas foi analisada a produção dos aros para o suporte das costas e o apoio para os pés, é necessário produzir 40.000 aros de cada tipo, o que poderá resultar numa poupança anual de 20.119 euros. Já para os tubos dos quadros das bicicletas, uma vez que se trata de um componente em que são necessárias duas unidades para produzir a peça final e, dado que são produzidos dois tipos de bicicletas, as de roda de catorze e de dezasseis polegadas, para a encomenda anual de 40.960 de cada tipo de bicicleta, prevê-se uma poupança anual de 15.761 euros. Quanto aos tubos que suportam o guiador destas bicicletas, a quantidade da encomenda é a mesma, mas como apenas é

necessário um tubo por tipo de bicicleta, são maquinados 81.920 tubos no centro CNC, o que faz com que o valor da poupança com a implementação do *robot* colaborativo seja de 9.430 euros, o menor dos três postos analisados.

Além dos ganhos monetários esperados com a implementação do *robot*, outro aspecto relevante a analisar é o tempo de retorno do investimento. Dos três postos de trabalho, aquele que apresenta o menor tempo esperado para retorno do investimento é o da furação dos aros para camas de hospital, podendo o *robot* ser completamente amortizado em 7,1 meses. Apesar disto, o *robot* pode ser amortizado em menos tempo, uma vez que, devido ao seu pequeno porte, este pode ser deslocado de um posto de trabalho para outro. Dado que o tempo semanal esperado para a realização de cada uma destas operações é menor, ao colocar o *cobot* num suporte que permita transportá-lo com facilidade dentro do chão de fábrica, este pode executar as operações nos diferentes postos de trabalho em dias diferentes, o que permitirá não só aumentar a disponibilidade dos equipamentos destes postos de trabalho para a produção de outros produtos, mas também diminuir o tempo de amortização deste equipamento.

A utilização deste *robot* colaborativo, possibilitará uma redução de tarefas ao operador na operação de furação de aros e a substituição total do mesmo nas operações de curvatura de tubos para o quadro de bicicletas e de maquinação do tubo de suporte para o guiador. Dado que se tratam de tarefas repetitivas, o recurso a este tipo de equipamento pode tornar estes postos de trabalho menos exigentes ao nível físico e cognitivo, melhorando assim as suas condições ergonómicas. Contudo, uma vez que não foi possível implementar o equipamento, não se efetuou uma avaliação ergonómica dos postos de trabalho de modo a validar esta hipótese.

Capítulo 6

Conclusão

Neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre o caso de estudo, assim como as limitações encontradas e que o condicionaram. Por fim, são apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros para que os processos da Ciclo Fapril possam continuar o seu caminho de melhoria.

6.1. Conclusões

Ao longo da presente dissertação foram seguidos e cumpridos a maioria dos objetivos propostos, tornando assim possível a retirada de conclusões sobre o caso de estudo realizado.

Inicialmente, foi proposto ao autor que fosse implementado um *robot* colaborativo no posto de curvatura de tubo da linha de produção de camas de hospital, no entanto, ao realizar o levantamento inicial com recurso à ferramenta *Lean VSM*, este notou que seria mais benéfico para o processo como um todo que o equipamento fosse alocado ao posto de furação, onde se realiza a operação que sucede a curvatura do tubo, devido ao gargalo identificado neste posto de trabalho. Face ao gargalo identificado e a outros desperdícios identificados através do VSM foram propostas melhorias ao processo e implementadas outras ferramentas *Lean* como o *standard work* e o 5S, com o intuito de minimizar tais desperdícios.

Tendo o levantamento inicial do processo sido efetuado e os desperdícios identificados, iniciou-se a etapa de implementação do *robot* colaborativo, na qual foram encontradas dificuldades que condicionaram a viabilidade do projeto inicialmente definido, fazendo com que o *robot* colaborativo não chegasse a ser efetivamente implementado. Como tal, foram selecionados outros dois componentes, desta vez os componentes para as bicicletas infantis, cujos postos de trabalho eram adequados para a implementação do *robot*, acabando o projeto inicial por se tornar num estudo de implementação deste equipamento para três componentes específicos em três postos de trabalho diferentes.

O *robot* foi programado para a produção dos três componentes e foram realizadas simulações de modo a obter os dados do estado esperado destas operações com a integração deste equipamento. Assim, fruto das simulações realizadas, prevê-se um aumento da produtividade de 71,4% para a operação de furar aros para camas de hospital, de 36,4% para

a operação de curvar tubos para quadros de bicicletas e de 32,8% para a operação de maquinação de tubos para o suporte do guiador.

O aumento da produtividade referido permitirá uma redução do custo unitário dos componentes em análise, o que se traduz numa poupança anual de 20.119 euros para a operação de furar aros para camas de hospital, de 15.761 euros para a operação de curvar tubos para quadros de bicicletas e de 9.430 euros para a operação de maquinar tubos para suporte do guiador. Tendo em conta o investimento efetuado no equipamento e a quantidade de 40.000 camas e de 40.960 bicicletas de cada tipo, foi calculado o tempo de retorno do investimento realizado, esperando-se que, ao ser alocado à operação de furar aros, em 7,1 meses o equipamento seja completamente amortizado e, para as operações de curvar e maquinar os tubos para as bicicletas infantis, esse tempo de retorno seja de 9,1 e de 15,2 meses, respetivamente.

Assim, face aos resultados obtidos das simulações, o posto de furar aros para camas de hospital apresenta os maiores ganhos, quer ao nível do aumento da produtividade e poupança anual resultante, quer no tempo de retorno do investimento. No entanto, uma vez que a pinça desenvolvida foi concebida para os tubos do quadro de bicicleta e, sendo que a diferença dos valores de poupança anual e o tempo de retorno de investimento para a operação de curvatura destes tubos não serem muito superiores aos apresentados para a operação de furar aros, a implementação do *robot* colaborativo neste posto será uma melhor opção a curto prazo, enquanto a implementação do *robot* no posto de furação será uma melhor operação a médio prazo, uma vez que terá de ser desenvolvida uma pinça que se adeque à dimensão e formato de tubo deste componente.

6.2. Limitações

O caso de estudo apresentado encontrou algumas limitações durante o seu desenvolvimento. Inicialmente, foi proposto ao autor que implementasse o *cobot* no posto de trabalho de curvatura para os aros de camas de hospital, sendo este trocado pelo posto de furação após efetuar o levantamento inicial do processo, no entanto, uma vez que a pinça concebida internamente não era adequada quer para a dimensão quer para o formato do tubo utilizado para este componente, assim como o manuseamento deste tipo de componente não seria o mais fácil devido também ao suporte em que o *robot* estava colocado, foram escolhidos outros componentes e as respetivas operações para se realizar o estudo de implementação deste equipamento.

Além da pinça desenvolvida não ser a adequada para o projeto inicial, o presente caso de estudo viu-se também limitado pelo suporte no qual estava colocado o *robot*, dado que não foi possível colocar o equipamento nos postos de trabalho de modo a testar o seu funcionamento em condições reais de produção, o que obrigou ao recurso de simulações para a obtenção de dados relativos às alterações que a implementação do *robot* traria às operações analisadas.

Por último, não foi possível realizar uma avaliação ergonómica da operação de furar aros na qual o *robot* iria trabalhar a par com o operador humano, uma vez que não foi possível implementar o *robot* colaborativo, impossibilitando assim avaliar quais os efeitos da relação Homem-Robot.

6.3. Proposta de Trabalhos Futuros

Ao estudo desenvolvido na Ciclo Fapril, podem ser ainda sugeridas propostas de trabalhos futuros para que a empresa possa melhorar o seu desempenho. O primeiro passo neste sentido passa pela criação de um novo suporte para o *robot*, de modo a possibilitar que este possa ser efetivamente implementado nos postos de trabalho e aumentar a produtividade dos mesmos.

A utilização de ordens de fabrico em papel consta ser uma fonte de desperdício para a Ciclo Fapril, não só pelos custos associados à sua impressão, mas também pelo tempo de produção que é perdido pelos operadores, pois têm de se deslocar a postos de registo distribuídos pelo chão de fábrica com a ordem de fabrico em papel para efetuarem qualquer tipo de registo no sistema informático, seja este de paragem por avaria ou *setup* ou de conclusão dessa mesma ordem de fabrico.

Deste modo, o autor propõe que se dê um passo na direção da Indústria 4.0 através da digitalização dos procedimentos dos postos de trabalho, ou seja, ao introduzir dispositivos digitais com capacidade para fazer a ligação entre o sistema informático existente e os postos de trabalho. Assim, os operadores poderão aceder às ordens de fabrico que já estão lançadas no sistema de planeamento da empresa em vez de esperarem que uma ordem de fabrico em papel chegue ao posto de trabalho para poderem iniciar a produção e poderão também efetuar registos diretamente no posto de trabalho, eliminando deslocações desnecessárias aos atuais postos de registo e perdas de tempo durante estas deslocações.

A implementação desta proposta permitirá prevenir o extravio das ordens de fabrico em suporte papel, prevenido assim a ocorrência da omissão do registo de quantidades e

incoerências entre o *stock* de componentes em processo e material existentes no chão de fábrica e o *stock* destes mesmos elementos registados no sistema.

Bibliografia

- Alefari, M., Salonitis, K. and Xu, Y. (2017) ‘The role of leadership in implementing lean manufacturing’, *Procedia CIRP*, 63, pp. 756–761. doi: 10.1016/j.procir.2017.03.169.
- Andersson, M. and Syberfeldt, A. (2024) ‘Improved interaction with collaborative robots - evaluation of event-specific haptic feedback in virtual reality’, *Procedia Computer Science*, 232(2023), pp. 1055–1064. doi: 10.1016/j.procs.2024.01.104.
- Banco de Portugal (2024) Quadros do Setor [online]. Available at: <https://www.bportugal.pt/QS/qsweb/Dashboards>. [Accessed: 7 May 2024].
- Baratta, A., Cimino, A., Gnoni, M. G. and Longo, F. (2023) ‘Human Robot Collaboration in Industry 4.0: a literature review’, *Procedia Computer Science*, 217, pp. 1887–1895. doi: 10.1016/j.procs.2022.12.389.
- Baratta, A., Cimino, A., Longo, F., Mirabeli, G. and Nicoletti, L. (2024) ‘Task Allocation in Human-Robot Collaboration: A Simulation-based approach to optimize Operator’s Productivity and Ergonomics’, *Procedia Computer Science*, 232, pp. 688–697. doi: 10.1016/j.procs.2024.01.068.
- BPstat (2024) Análise setorial da indústria metalomecânica [online]. Available at: <https://bpstat.bportugal.pt/conteudos/publicacoes/1313>. [Accessed: 7 May 2024].
- Charrua-Santos, F., Santos, B. P., Enrique, D. V., Alberto, A., Bibete, H., Osorio, G. J. and Lima, T. M. (2020) ‘An Overview of Lean Production and Industry 4.0 in Different Context’, in *2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*. IEEE, pp. 69–72. doi: 10.1109/ICITM48982.2020.9080386.
- Ciclo Fapril (2019) Home [online]. Available at: <https://ciclofapril.pt/pt/>. [Accessed: 7 May 2024].
- Cifone, F. D., Hoberg, K., Holweg, M. and Staudacher, A. P. (2021) “‘Lean 4.0’: How can digital technologies support lean practices?”, *International Journal of Production Economics*, 241(June 2020), p. 108258. doi: 10.1016/j.ijpe.2021.108258.
- Dillinger, F., Tropschuh, B., Dervis, M. Y. and Reinhart, G. (2022) ‘A Systematic Approach to Identify the Interdependencies of Lean Production and Industry 4.0 Elements’, *Procedia CIRP*, 112(March), pp. 85–90. doi: 10.1016/j.procir.2022.09.041.
- Dinesh, S. N., Shalini, M., Vijay, M., Vijey Mohan, R. C., Saminathan, R. and Subbiah, R. (2022) ‘Improving the productivity in carton manufacturing industry using value stream mapping (VSM)’, *Materials Today: Proceedings*, 66, pp. 1221–1227. doi: 10.1016/j.matpr.2022.05.015.
- Dobrokvashina, A., Chebotareva, E., Sulaiman, S., Zagirov, A., Kuo-Hsien, H. and Magid, E. (2022) ‘Human Robot Interaction in Collaborative Manufacturing Scenarios: Prospective Cases’, in *2022 International Siberian Conference on Control and*

- Communications (SIBCON)*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002876.
- Dornelles, J. de A., Ayala, N. F. and Frank, A. G. (2022) ‘Smart Working in Industry 4.0: How digital technologies enhance manufacturing workers’ activities’, *Computers and Industrial Engineering*, 163(November 2021). doi: 10.1016/j.cie.2021.107804.
- Dossou, P.-E., Torregrossa, P. and Martinez, T. (2022) ‘Industry 4.0 concepts and lean manufacturing implementation for optimizing a company logistics flows’, *Procedia Computer Science*, 200(2019), pp. 358–367. doi: 10.1016/j.procs.2022.01.234.
- Ejsmont, K., Gladysz, B., Corti, D., Castaño, F., Mohammed, W. M. and Martinez, J. L. (2020) ‘Towards ‘Lean Industry 4.0’ – Current trends and future perspectives’, *Cogent Business & Management*. Edited by P. Foroudi, 7(1), p. 1781995. doi: 10.1080/23311975.2020.1781995.
- Eswaran, M. and Bahubalendruni, M. V. A. R. (2022) ‘Challenges and opportunities on AR/VR technologies for manufacturing systems in the context of industry 4.0: A state of the art review’, *Journal of Manufacturing Systems*, 65(February), pp. 260–278. doi: 10.1016/j.jmsy.2022.09.016.
- Feng, Z., Hu, G., Sun, Y. and Soon, J. (2020) ‘An overview of collaborative robotic manipulation in multi-robot systems’, *Annual Reviews in Control*, 49, pp. 113–127. doi: 10.1016/j.arcontrol.2020.02.002.
- Florescu, A. and Barabas, S. (2022) ‘Development Trends of Production Systems through the Integration of Lean Management and Industry 4.0’, *Applied Sciences*, 12(10), p. 4885. doi: 10.3390/app12104885.
- Ghobakhloo, M. (2020) ‘Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability’, *Journal of Cleaner Production*, 252, p. 119869. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119869.
- Van De Ginste, L., Aghezzaf, E. H. and Cottyn, J. (2022) ‘The role of equipment flexibility in Overall Equipment Effectiveness (OEE)-driven process improvement’, *Procedia CIRP*, 107(March), pp. 289–294. doi: 10.1016/j.procir.2022.04.047.
- Gualtieri, L., Rauch, E. and Vidoni, R. (2021) ‘Emerging research fields in safety and ergonomics in industrial collaborative robotics: A systematic literature review’, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67(May 2020), p. 101998. doi: 10.1016/j.rcim.2020.101998.
- Henao, R., Sarache, W. and Gómez, I. (2019) ‘Lean manufacturing and sustainable performance: Trends and future challenges’, *Journal of Cleaner Production*, 208, pp. 99–116. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.116.
- Horsthofer-Rauch, J., Schumann, M., Milde, M., Vernim, S. and Reinhart, G. (2022) ‘Digitalized value stream mapping: review and outlook’, *Procedia CIRP*, 112(March), pp. 244–249. doi: 10.1016/j.procir.2022.09.079.

- Hung, Y.-H., Li, L. Y. O. and Cheng, T. C. E. (2022) 'Uncovering hidden capacity in overall equipment effectiveness management', *International Journal of Production Economics*, 248(March), p. 108494. doi: 10.1016/j.ijpe.2022.108494.
- International Ergonomics and Human Factors Association (IEA) (2024) What is Ergonomics (HFE)? [online]. Available at: <https://iea.cc/about/what-is-ergonomics/> [Accessed: 23 July 2024].
- Iyer, S. V., Sangwan, K. S. and Dhiraj (2023) 'Digitalization: a tool for the successful long-term adoption of lean manufacturing', *Procedia CIRP*, 116, pp. 245–250. doi: 10.1016/j.procir.2023.02.042.
- Jahanmahin, R., Masoud, S., Rickli, J. and Djuric, A. (2022) 'Human-robot interactions in manufacturing: A survey of human behavior modeling', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 78, p. 102404. doi: 10.1016/j.rcim.2022.102404.
- Jonek, M., Niermann, D., Petzoldt, C., Manns, M. and Freitag, M. (2023) 'Automated Analysis of Assembly Processes in Human-Robot Collaboration: Research Approaches and Challenges', *Procedia CIRP*, 120, pp. 1203–1208. doi: 10.1016/j.procir.2023.09.149.
- Karagiannis, P., Kousi, N., Michalos, G., Dimoulas, K., Mparis, K., Dimosthenopoulos, D., Tokçalar, Ö., Guasch, T., Gerio, G. P. and Makris, S. (2022) 'Adaptive speed and separation monitoring based on switching of safety zones for effective human robot collaboration', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 77(May), p. 102361. doi: 10.1016/j.rcim.2022.102361.
- Klimecka-Tatar, D. and Ingaldi, M. (2022) 'Digitization of processes in manufacturing SMEs - Value stream mapping and OEE analysis', *Procedia Computer Science*, 200(2019), pp. 660–668. doi: 10.1016/j.procs.2022.01.264.
- Kopeinig, J., Woschank, M. and Olipp, N. (2024) 'Industry 4 . 0 Technologies and their Implications for Environmental Industry 4 . 0 Technologies and their Implications for Environmental Sustainability in the Manufacturing Industry Sustainability in the Manufacturing Industry', *Procedia Computer Science*, 232(2023), pp. 2777–2789. doi: 10.1016/j.procs.2024.02.095.
- Kumar, N., Shahzeb, H. S., Srivastava, K., Akhtar, R., Kumar, Y. R. and Choubey, V. K. (2022) 'Lean manufacturing techniques and its implementation: A review', *Materials Today: Proceedings*, 64, pp. 1188–1192. doi: 10.1016/j.matpr.2022.03.481.
- Langlotz, P. and Aurich, J. C. (2020) 'Causal and temporal relationships within the combination of Lean Production Systems and Industry 4.0', *Procedia CIRP*, 96(March), pp. 236–241. doi: 10.1016/j.procir.2021.01.080.
- Lu, L., Xie, Z., Wang, H., Li, L. and Xu, X. (2022) 'Mental stress and safety awareness during human-robot collaboration - Review', *Applied Ergonomics*, 105(June), p. 103832. doi: 10.1016/j.apergo.2022.103832.

- Marinelli, M. *et al.* (2021) 'Lean manufacturing and industry 4.0 combinative application: Practices and perceived benefits', *IFAC-PapersOnLine*, 54(1), pp. 288–293. doi: 10.1016/j.ifacol.2021.08.034.
- Mrugalska, B., Konieczna, M., Wyrwicka, M.K. (2020). How to Improve Manufacturing Process Implementing 5S Practices: A Case Study. In: Ahram, T., Karwowski, W., Vergnano, A., Leali, F., Taiar, R. (eds) *Intelligent Human Systems Integration 2020. IHSI 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1131. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39512-4_187.
- Mundaca-Lopez, C., Villar-Farfan, C., Quiroz-Flores, J. C. and García-Lopez, Y. J. (2023) 'Improving OEE in a Peruvian SME: A Case Study on the Application of Lean Manufacturing Tools in the Metalworking Sector', in *Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics*, pp. 162–175. doi: <https://doi.org/10.15488/15320>.
- Naciri, L., Mouhib, Z., Gallab, M., Nali, M., Abbou, R. and Kebe, A. (2022) 'Lean and industry 4.0: A leading harmony', *Procedia Computer Science*, 200(2021), pp. 394–406. doi: 10.1016/j.procs.2022.01.238.
- Naeemah, A. J. and Wong, K. Y. (2023) 'Sustainability metrics and a hybrid decision-making model for selecting lean manufacturing tools', *Resources, Environment and Sustainability*, 13(April), p. 100120. doi: 10.1016/j.resenv.2023.100120.
- Narke, M. M. and Jayadeva, C. T. (2020) 'Value Stream Mapping: Effective Lean Tool for SMEs', in *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd., pp. 1263–1272. doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.441.
- Oberc, H., Prinz, C., Glowoski, P., Lemmerz, K. and Kuhlenkötter, B. (2019) 'Human Robot Interaction – learning how to integrate collaborative robots into manual assembly lines', *Procedia Manufacturing*, 31, pp. 26–31. doi: 10.1016/j.promfg.2019.03.005.
- Omogbai, O. and Salonitis, K. (2017) 'The Implementation of 5S Lean Tool Using System Dynamics Approach', *Procedia CIRP*, 60, pp. 380–385. doi: 10.1016/j.procir.2017.01.057.
- Osei-Kyei, R. and Chan, A. P. C. (2017) 'Implementation constraints in public-private partnership', *Journal of Facilities Management*. 2a edn, 15(1), pp. 90–106. doi: 10.1108/JFM-07-2016-0032.
- Othman, U. and Yang, E. (2022) 'An Overview of Human-Robot Collaboration in Smart Manufacturing', in *2022 27th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICAC55051.2022.9911168.
- Padilla-Triveno, J. and Quiroz-Flores, J. C. (2022) 'Lean Production Model to Increase Equipment Availability in the Manufacturing Process of Gas Hose Connectors in Metalworking SMEs', in *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial and Business Engineering*. New York, NY, USA: ACM, pp. 275–281. doi:

10.1145/3568834.3568893.

- Pereira, A., Abreu, M. F., Silva, D., Alves, A. C., Oliveira, J. A., Lopes, I. and Figueiredo, M. C. (2016) 'Reconfigurable Standardized Work in a Lean Company – A Case Study', *Procedia CIRP*, 52, pp. 239–244. doi: 10.1016/j.procir.2016.07.019.
- Quenehen, A., Pocachard, J. and Klement, N. (2019) 'Process optimisation using collaborative robots - comparative case study', *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), pp. 60–65. doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.131.
- Rajab, S., Afy-Shararah, M. and Salonitis, K. (2022) 'Using Industry 4.0 Capabilities for Identifying and Eliminating Lean Wastes', *Procedia CIRP*, 107(March), pp. 21–27. doi: 10.1016/j.procir.2022.04.004.
- Rathi, R., Jagadeeswaran, M., Imran, G. M., Kumar, K. V., Eswar, K. V. R. and Sameerpasha, S. (2022) 'Investigation and implementation of VSM in water distillation plant', *Materials Today: Proceedings*, 50, pp. 751–758. doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.274.
- Rojas, M. and Huamanchahua, D. (2022) 'The Confluence of Lean Manufacturing and Industry 4.0: A Literature Review', in *2022 IEEE ANDESCON*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/ANDESCON56260.2022.9989655.
- Safavi, F., Olikkal, P., Pei, D., Kamal, S., Meyerson, H., Penumalee, V. and Vinjamuri, R. (2024) 'Emerging Frontiers in Human–Robot Interaction', *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 110(2), p. 45. doi: 10.1007/s10846-024-02074-7.
- Santos, D. M. C., Santos, B. K. and Santos, C. G. (2021) 'Implementation of a standard work routine using Lean Manufacturing tools: A case Study', *Gestão & Produção*, 28(1). doi: 10.1590/0104-530x4823-20.
- Shahriar, M. M., Parvez, M. S., Islam, M. A. and Talapatra, S. (2022) 'Implementation of 5S in a plastic bag manufacturing industry: A case study', *Cleaner Engineering and Technology*, 8(September 2021), p. 100488. doi: 10.1016/j.clet.2022.100488.
- Sherwani, F., Asad, M. M. and Ibrahim, B. S. K. K. (2020) 'Collaborative Robots and Industrial Revolution 4.0 (IR 4.0)', in *2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST)*. IEEE, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICETST49965.2020.9080724.
- Shook, J. (2022) *How Standardized Work Integrates People with Process, Lean Enterprise Institute* [online]. Available at: <https://www.lean.org/the-lean-post/articles/how-standardized-work-integrates-people-with-process/> [Accessed: 11 March 2024].
- Silvestri, L., Gallo, T. and Silvestri, C. (2022) 'Which tools are needed to implement Lean Production in an Industry 4.0 environment? A literature review', *Procedia Computer Science*, 200(2019), pp. 1766–1777. doi: 10.1016/j.procs.2022.01.377.
- Torre, N., Leo, C. and Bonamigo, A. (2023) 'Lean 4.0: An analytical approach for hydraulic system maintenance in a production line of steel making plant', *International Journal*

- of Industrial Engineering and Management*, 14(3), pp. 186–199. doi: 10.24867/IJIEM-2023-3-332.
- Velasco, L. S. F., Revilla, P. E. R., Rodríguez, L. V. R., Hincapié, M. P. S., Saavedra-Robinson, L. A. and Jiménez, J. F. (2022) ‘A human-centred workstation in industry 4.0 for balancing the industrial productivity and human well-being’, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 91(May 2022), p. 103355. doi: 10.1016/j.ergon.2022.103355.
- Veres, C., Marian, L., Moica, S. and Al-Akel, K. (2018) ‘Case study concerning 5S method impact in an automotive company’, *Procedia Manufacturing*, 22, pp. 900–905. doi: 10.1016/j.promfg.2018.03.127.
- Vogel, C., Lindner, F. and Kratzsch, A. (2023) ‘Practical Engineering Education: Use of collaborative robots in the context of Industry 5.0’, in *2023 World Engineering Education Forum - Global Engineering Deans Council (WEEF-GEDC)*. IEEE, pp. 1–11. doi: 10.1109/WEEF-GEDC59520.2023.10344213.
- Yağlı, E., Şencan, A. Ç., Koçak, M. R. and Şencan, C. (2024) ‘Investigation of the effect of 5s application on production efficiency in machining: A field study at an aviation company’, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39(2), pp. 1067–1082. doi: 10.17341/gazimmfd.1100151.

Anexo I

	INSTRUÇÃO DE TRABALHO
INSTRUÇÃO –	Utilização da máquina de Furar e Fresar aros – N°445

1 – OBJETIVO

Esta instrução de trabalho tem como objetivo definir procedimentos de trabalho padronizado para a operação de furar aros.

2 – APLICAÇÃO

Aplica-se a todos os colaboradores que realizem esta operação.

3 – DESCRIÇÃO

3.1. – Antes de iniciar a produção

3.1.1. – Abrir o ar.



3.1.2. – Ligar o geral.



3.1.3. – Verificar o depósito de água.

1 / 4

EDIÇÃO	ELABORAÇÃO	VERIFICAÇÃO	APROVAÇÃO	REVISÕES				PÁGINA
				0	1	2	3	
N.R				DATA				
DATA:				RUB.				

	INSTRUÇÃO DE TRABALHO
INSTRUÇÃO –	Utilização da máquina de Furar e Fresar aros – Nº445



3.1.4. – Colocar o botão bi-manual em automático.



3.1.5. – Pronta a produzir.



3.2. – Produção das peças

3.2.1. – Colocar aro na máquina com a marca virada para fora da máquina e acionar o botão bi-manual.

2 / 4

EDIÇÃO	ELABORAÇÃO	VERIFICAÇÃO	APROVAÇÃO	REVISÕES				PÁGINA
				DATA	0	1	2		3
N.º								
DATA:				RUB.				

	INSTRUÇÃO DE TRABALHO
INSTRUÇÃO –	Utilização da máquina de Furar e Fresar aros – Nº445



3.2.2. – Tirar o aro do suporte, inclinar e soprar com a pistola de ar por dentro para escorrer a água.



3.2.3. – Passar o aro furado para o cavalete de trabalho e colocar um novo aro na máquina.


3.2.4. – Enquanto a máquina está a trabalhar, limpar furos grandes, virar o aro ao contrário e remover rebarbas da meia cana*.



3.2.5. – Voltar a virar o aro e soprar por dentro para os dois lados.

3 / 4

EDIÇÃO	ELABORAÇÃO	VERIFICAÇÃO	APROVAÇÃO	REVISÕES				PÁGINA
				DATA	0	1	2		3
N.º								
DATA:				NU.				

	INSTRUÇÃO DE TRABALHO
INSTRUÇÃO –	Utilização da máquina de Furar e Fresar aros – Nº445

3.2.6. – Quando o cavalete estiver cheio de aros furados, passar o primeiro para o carro de transporte.

*Para os aros pequenos, tem também de lixar a aresta de fora do lado de dentro da meia cana.

4 – RESPONSABILIDADES

A responsabilidade da aplicação da presente instrução de trabalho é de todos os colaboradores que intervenham na área, responsáveis de linha e responsável de seção.

5 – SEGURANÇA

Uso obrigatório dos equipamentos de proteção individual (luvas, óculos de proteção, tampões de proteção).

Todas as operações de manutenção e mudança de ferramenta devem ser realizadas com a máquina desligada.

Em caso de emergência acionar o botão de paragem de segurança.

Em caso de avaria informar a manutenção.



Proteção Obrigatória das
Mãos



Proteção Obrigatória dos
Pés



Proteção Obrigatória do
Rosto



Proteção Obrigatória dos
Ouidos

4 / 4

EDIÇÃO	ELABORAÇÃO	VERIFICAÇÃO	APROVAÇÃO	REVISÕES				PÁGINA
				DATA	0	1	2		3
N.º								
DATA:								