



# Análise e melhoria de uma linha de produção de uma empresa industrial usando a simulação

ALBERTO SANT'AUBYN PINHO

Setembro de 2024

# **Análise e melhoria de uma linha de produção de uma empresa industrial usando a simulação**

**Alberto Sant'Aubyn Pinho**

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

**Orientador: Prof. Doutor Luís Pinto Ferreira**

**Júri:**

Presidente:

Professor Doutor Mónica Glória Cardoso, Professor Adjunto Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Vogais:

Professor Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira, Professor Coordenador Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Professor Doutor Ana Luísa Ferreira Andrade Ramos, Professora Auxiliar, Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e Turismo, Universidade de Aveiro

Porto, setembro 2024

página propositadamente em branco

# Agradecimentos

Gostaria de expressar a minha profunda gratidão a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização desta dissertação, ajudaram-me a ultrapassar desafios e a alcançar este marco.

Um agradecimento especial à empresa Körber Supply Chain PT, que me proporcionou a oportunidade de realizar este projeto e demonstraram total abertura para me acolher como um dos seus. Em particular, gostaria de agradecer ao João Ribeiro, pela sua orientação e partilha dos conhecimentos necessários para realizar este trabalho. À Sofia Faceira, que demonstrou o seu apoio incondicional, e a todos os colaboradores da equipa dos *conveyors*, pela paciência que demonstraram durante a recolha dos dados fundamentais para este trabalho.

Agradeço igualmente ao meu orientador Professor Doutor Luís Pinto Ferreira, do Instituto Superior de Engenharia do Porto, pelo seu constante apoio e disponibilidade. A sua orientação, sugestões valiosas e encorajamento ao longo de todo o projeto foram imprescindíveis para a conclusão deste trabalho.

Por fim, mas com o mais profundo carinho, agradeço à minha família e amigos, em especial à minha mãe, que sempre acreditou em mim e me apoiou através do seu sacrifício ao longo destes anos para me proporcionar todas as condições possíveis para conseguir alcançar os meus objetivos.

página propositadamente em branco

# Resumo

Nos dias de hoje, a competitividade e a eficiência são fatores cruciais para a sobrevivência e crescimento das empresas industriais, especialmente em relação à capacidade e flexibilidade de responder às necessidades impostas pelos clientes. Neste contexto, o uso de ferramentas tecnológicas e metodologias capazes de auxiliar na melhoria contínua das linhas de produção e eliminação de desperdícios tornaram-se estratégias fundamentais para garantir a sustentabilidade e o aumento da produtividade dos processos produtivos.

A presente dissertação foi desenvolvida na empresa Körber Supply Chain PT e focou-se na análise e melhoria da linha de produção onde transportadores de rolos e correntes são montados. Através do uso da simulação como ferramenta de apoio à decisão, aliada aos princípios e ferramentas da filosofia *Lean*, foi possível avaliar e colmatar problemas que ocorrem na realização de certas tarefas e melhorar o desempenho geral da linha, assim como providenciar melhores condições e métodos de trabalho.

O trabalho iniciou-se com uma análise detalhada da linha de produção existente, onde foram coletados dados temporais e realizadas observações para identificar desperdícios, ineficiências e gargalos no processo. A partir das informações recolhidas, foi construído um modelo de simulação que reproduz o comportamento da linha de produção e foram mapeados os fluxos de valor do processo, permitindo uma melhor compreensão da mesma. Através desta abordagem e das ferramentas utilizadas, foi possível identificar as áreas mais críticas e contribuiu para a conceção de novas sugestões e aperfeiçoamento de medidas de melhoria já aplicadas.

Com base nesta análise, foram propostas e implementadas várias medidas de melhoria na linha de produção baseadas na melhoria de processos, layout, reorganização dos espaços de trabalho e de material, gestão visual, entre outros. Os resultados foram positivos, tanto em termos qualitativos como quantitativos, com uma melhoria significativa na eficiência do processo e organização da linha de produção. Com o uso da simulação, previsões foram feitas para quantificar o impacto no ritmo de produção após a implementação destas medidas, foi possível verificar um aumento da capacidade de produção semanal até 4 unidades produzidas ou 13% comparando ao estado inicial da linha, comprovando a eficácia das medidas implementadas. Esses resultados sublinham a importância da simulação e das abordagens *Lean* como ferramentas poderosas para alcançar melhorias significativas para linhas de produção num ambiente industrial, demonstrando a aplicabilidade destas duas abordagens em conjunto.

**Palavras-chave:** Simulação, Melhoria de processo, Linha de produção, *Lean*, JaamSim

página propositadamente em branco

# Abstract

In today's world, competitiveness and efficiency are crucial factors for the survival and growth of industrial companies, especially concerning their ability and flexibility to meet customer demands. In this context, the use of technological tools and methodologies that can assist in the continuous improvement of production lines and waste elimination has become fundamental strategies to ensure the sustainability and increased productivity of production processes.

This dissertation was developed at the company Körber Supply Chain PT and focused on the analysis and improvement of the production line where roller and chain conveyors are assembled. By using simulation as a decision-support tool, combined with the principles and tools of Lean philosophy, it was possible to evaluate and address issues that occur during certain tasks and improve the overall performance of the line, as well as provide better working methods and conditions.

The project began with a detailed analysis of the existing production line, where time data was collected and observations were made to identify waste, inefficiencies, and bottlenecks in the process. Based on the collected information, a simulation model that replicates the behavior of the production line was built, and the value streams of the process were mapped, allowing for a better understanding of it. Through this approach and the tools used, it was possible to identify the most critical areas and contribute to the design of new suggestions and the refinement of already applied improvement measures.

Based on this analysis, several improvement measures were proposed and implemented on the production line, focusing on process improvement, layout, reorganization of workspaces and materials, visual management, among others. The results were positive, both qualitatively and quantitatively, with a significant improvement in process efficiency and production line organization. Using the simulation models, predictions were made to quantify the impact on the production rate after implementing these measures, revealing a weekly production capacity increase of up to 4 units or 13% compared to the initial state of the line, proving the effectiveness of the implemented measures. These results underline the importance of simulation and Lean approaches as powerful tools for achieving significant improvements in production lines within an industrial environment, demonstrating the applicability of these two approaches together.

**KEYWORDS:** Simulation, Process Improvement, Production Line, Lean, JaamSim

página propositadamente em branco

# Índice

Lista de Figuras.....	xii
Lista de Tabelas.....	xv
Lista de Acrónimos.....	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização da Dissertação.....	1
1.2. Objetivos da Dissertação.....	2
1.3. Metodologias de Investigação.....	2
1.4. Apresentação da Empresa.....	3
1.5. Estrutura da Dissertação.....	6
2. Revisão Bibliográfica.....	7
2.1. Simulação como Ferramenta de Apoio à Decisão.....	7
2.2. Otimização de Layouts de Linhas de Produção – Casos de Estudo.....	8
2.3. O Problema de Layouts de Instalações Industriais.....	15
2.3.1. Estado do Layout.....	16
2.3.2. Características da Fábrica.....	16
2.3.3. Formulação do Problema.....	17
2.3.4. Abordagens de Resolução.....	19
2.4. Modelos analíticos para a melhoria de layouts.....	19
2.4.1. Métodos exatos.....	20
2.4.2. Métodos heurísticos.....	20
2.4.3. Abordagem estocástica.....	25
2.5. Contributos da Indústria 4.0 para a melhoria de layouts.....	26
2.6. Perspetivas futuras.....	27
3. Análise e Melhoria de uma Linha de Produção.....	29
3.1. Descrição da Linha de Produção <i>Conveyors</i> .....	29
3.1.1. Pré-Montagens.....	31
3.1.2. Montagem do Conjunto Motriz (Posto 1).....	36
3.1.3. Montagem da Estrutura (Posto 2).....	37
3.1.4. Fecho do Equipamento (Posto 3).....	40
3.2. Estudo da Linha de Produção <i>Conveyors</i> .....	40
3.2.1. Levantamento de dados.....	40
3.2.2. Análise do estado inicial através da simulação.....	44
3.3. Identificação de Problemas.....	48
3.4. Propostas de Melhorias.....	50
3.4.1. Mudança do layout.....	51

3.4.2. Gestão Visual .....	52
3.4.3. Aplicação dos 5S's para estantes dos parafusos <i>Kanban</i> .....	54
3.4.4. Guias de Montagem.....	55
3.4.5. Gestão de defeitos e retrabalho .....	57
3.4.6. Melhoria do processo de montagem das correntes.....	58
4. Resultados e Discussão .....	61
4.1. Apresentação dos resultados.....	61
4.2. Análise das melhorias através do uso da simulação .....	63
4.3. Discussão dos resultados .....	65
5. Conclusão .....	69
5.1. Conclusões finais .....	69
5.2. Dificuldades Encontradas.....	70
5.3. Perspetivas de Trabalho Futuro .....	70
Referências.....	71
Declaração de Integridade .....	79
Apêndice A .....	81
Apêndice B .....	85

página propositadamente em branco

# Lista de Figuras

Figura 1 - Fábrica Körber Supply Chain PT .....	4
Figura 2 – Transportador de Correntes (CCV).....	5
Figura 3 – Transportador de Rolos (RCV).....	5
Figura 4 - Classificação do FLP (adaptado de: Hosseini-Nasab et al., 2018; Pérez-Gosende et al., 2021) .....	16
Figura 5 – Representação discreta (a) e contínua (b) do layout (Drira et al., 2007).....	18
Figura 6 - Exemplo de diagrama de relações de atividades (ARC) (Maulida Hakim & Istiyanti, 2015).....	22
Figura 7 - Exemplo de cálculos do valor TCR (Maulida Hakim & Istiyanti, 2015).....	22
Figura 8 - Abordagem para implementação de um estudo de simulação (adaptado de: Law, 2019).....	26
Figura 9 - Tendência da integração da simulação em estudos sobre layouts industriais (Al-Zubaidi et al., 2021) .....	28
Figura 10 – Exemplo CCV montado durante este projeto .....	29
Figura 11 – Exemplo RCV montado durante este projeto .....	29
Figura 12 - Layout inicial da linha de produção Conveyors .....	30
Figura 13 - Fluxograma processo de montagem CCV .....	31
Figura 14 - Fluxograma processo de montagem RCV .....	31
Figura 15 - Bancadas de trabalho para pré-montagens.....	32
Figura 16 - Conjunto Cabeceira.....	33
Figura 17 - Conjunto Patim .....	33
Figura 18 - Conjunto Longarina.....	33
Figura 19 - Conjunto Garfo.....	33
Figura 20 - Posto P.M. Pernas .....	34
Figura 21 - Gabari para montagem da perna quadro .....	34
Figura 22 - Conjunto Perna Quadro .....	34
Figura 23 - Conjunto Perna Central.....	34
Figura 24 - Conjunto Perna Batente.....	34
Figura 25 - Conjunto Perna RCV .....	35
Figura 26 - Conjunto Caixa Motor RCV.....	35
Figura 27 - Conjunto Motriz CCV.....	36
Figura 28 - Conjunto Motriz RCV.....	37
Figura 29 - Área designada para o Posto 2 .....	38
Figura 30 - Processo Montagem Posto 2 CCV.....	38
Figura 31 - Aspeto final do CCV à saída do posto 2.....	39
Figura 32 - Processo Montagem Posto 2 RCV.....	39
Figura 33 - Aspeto final do RCV à saída do posto 2.....	39
Figura 34 - VSM para CCV .....	42
Figura 35 - VSM para RCV .....	43
Figura 36 - Tempo de Ciclo vs Takt Time para CCV .....	43

Figura 37 - Interface do software JaamSim.....	45
Figura 38 - Modelo inicial da linha CCV.....	45
Figura 39 - Modelo inicial da linha RCV.....	46
Figura 40 - Exemplo do modelo de simulação em funcionamento .....	47
Figura 41 - Mudanças realizadas ao layout inicial.....	51
Figura 42 - Novo layout da linha .....	52
Figura 43 - Exemplo de identificação de material abastecido em carro Kit .....	52
Figura 44 - Exemplo de identificações de material pronto .....	53
Figura 45 - Exemplo de identificações das áreas do layout .....	53
Figura 46 - Exemplo da aplicação dos 5S's para as estantes Kanban.....	54
Figura 47 – Exemplo de guia para pré-montagem das longarinas.....	55
Figura 48 – Exemplo guia de montagem das blindagens para CCV's.....	56
Figura 49 - Guia de colocação das pernas para CCV's.....	56
Figura 50 - Guia de gestão de defeitos e retrabalho.....	57
Figura 51 - Elementos da ferramenta de melhoria do processo de montagem das correntes .	58
Figura 52 - Ferramenta de melhoria do processo de montagem das correntes .....	59
Figura 53 - Medida de melhoria complementada pelos colaboradores.....	67

página propositadamente em branco

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Casos de estudo sobre a otimização de layouts de linhas de produção .....	9
Tabela 2 - Escala de atribuição para ARC .....	21
Tabela 3 - Quantidades de conjuntos pré-montagem por CCV .....	32
Tabela 4 - Tempos retirados do estudo da linha Conveyors.....	41
Tabela 5 - Dados do modelo de simulação inicial para CCV .....	47
Tabela 6 - Validação dos modelos de simulação.....	48
Tabela 7 - Identificação de problemas por processo .....	49
Tabela 8 - Propostas de melhoria .....	50
Tabela 9 - Resultados qualitativos .....	61
Tabela 10 - Resultados quantitativos esperados após implementação das melhorias .....	64
Tabela 11 - Dados do modelo de simulação CCV após melhorias .....	65
Tabela 12 - Comparação entre estado inicial da linha e estado após melhorias.....	66

página propositadamente em branco

# Lista de Acrónimos

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
5S	<i>Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke</i>
ABS	<i>Agent-Based Simulation</i>
ADLEP	<i>Automated Layout Design Program</i>
ARC	<i>Activity Relationship Chart</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CCV	<i>Chain Conveyor</i>
CORELAP	<i>Computerized Relationship Layout Planning</i>
CRAFT	<i>Computerized Relative Allocation of Facilities Technique</i>
DES	<i>Discrete Event Simulation</i>
DFLP	<i>Dynamic Facility Layout Problem</i>
FLP	<i>Facility Layout Problem</i>
GT	<i>Graph Theoretic Problem</i>
MIP	<i>Mixed Integer Programming</i>
PM	Pré-montagem
QAP	<i>Quadratic Assignment Problem</i>
QSP	<i>Quadratic Set Problem</i>
RCV	<i>Roller Conveyor</i>
SFLP	<i>Static Facility Layout Problem</i>
TCR	<i>Total Closeness Rating</i>
VSM	<i>Value Stream Mapping</i>

página propositadamente em branco

# 1. Introdução

Neste capítulo é realizada a introdução da presente dissertação, apresentando a contextualização do tema em questão. De seguida, é ainda abordado os objetivos a alcançar, assim como as metodologias utilizadas, e também é feita uma breve apresentação da empresa. Por último, é apresentado a estrutura do trabalho desenvolvido.

## 1.1. Contextualização da Dissertação

Com o aumento da competitividade industrial nas últimas décadas, por consequência do desenvolvimento de novas tecnologias e aumento das exigências dos consumidores para produtos e serviços com maior qualidade e menor custo, as empresas procuram cada vez mais ferramentas e estratégias para terem uma vantagem competitiva sobre a concorrência, através da melhoria da eficiência das suas linhas de produção (Rashid et al., 2018).

Segundo Silva et al., 2021, a eficiência das fábricas pode ser melhorada abordando questões operacionais como o fluxo dos materiais no processo, trabalhos em curso ou a informação transportada na rede de produção.

Com o efeito das novas tecnologias e modelos de negócio, o foco das empresas deverá ser na inovação, fatores de produção adaptáveis, alterações das condições da procura, e novas relações comerciais são todos fatores que influenciam a produtividade das empresas perante a mudança atual da competitividade no mundo industrial (C. Liu, 2017).

Segundo Oztemel & Gursev, 2020, estes desenvolvimentos fazem parte da 'Quarta Revolução Industrial', também conhecida como a Indústria 4.0, sendo descritos como a fusão entre o mundo físico e digital, que terá impacto em todas as economias, disciplinas e indústrias. O mesmo autor também indica que os principais fatores para esta revolução são causados pelos avanços tecnológicos em áreas como a inteligência artificial, Internet das Coisas, grandes volumes de dados, robótica, automação, fabrico virtual e a impressão 3D.

De modo a adaptar a estas mudanças no ambiente industrial, tem existido um aumento na necessidade do uso de ferramentas para auxiliar os responsáveis das tomadas-de-decisão na visualização e testagem de dados e diferentes cenários a aplicar para melhorar os sistemas produtivos, sendo a simulação um exemplo disso (Dimara et al., 2022).

Segundo Ares et al., 2012, a simulação é uma das ferramentas de apoio à decisão mais valiosas para resolver problemas de produção, possibilitando a quantificação do desempenho esperado de alterações realizadas ao sistema de fabrico. O uso da simulação também permite a análise

## Introdução

do fluxo de materiais, auxiliando o planeamento e avaliação dos parâmetros necessários para melhorar o fluxo do sistema (Duplakova et al., 2020).

O layout de uma linha de produção envolve a configuração física e sistemática das diferentes instalações, postos de trabalho, máquinas, equipamentos, e outras áreas comuns que compõem o sistema produtivo. A projeção de um layout ótimo é uma ferramenta eficaz para a redução dos custos e aumento da produtividade total da linha de produção, tornando-se essencial a adequada disposição das diversas instalações, a fim de obter o máximo rendimento dos recursos disponíveis (Naik & Kallurkar, 2016).

Um layout robusto e sustentável é capaz de lidar com variações e é visto como uma necessidade para manter a precisão e qualidade no fabrico de produtos no devido tempo imposto. Uma má conceção do layout contribui para o aumento nos tempos de produção, diminuindo a exatidão e rigor no processo produtivo (Kumar et al., 2018).

Posto isto, é importante realçar a forma como os layouts indústrias são construídos de forma a garantir o melhor desempenho do sistema produtivo, como também obter um conhecimento profundo das ferramentas utilizadas para auxiliar na conceção e otimização das linhas de produção, nomeadamente o papel e contributos que a simulação tem nesta área de utilização.

### **1.2. Objetivos da Dissertação**

Esta dissertação tem como objetivo a análise e melhoria de uma linha de produção de uma empresa industrial através da identificação de ineficiências e desperdícios presentes, como por exemplo o layout da linha. Para tal, é necessário realizar um estudo profundo sobre a linha e processos em questão, de modo a estipular o estado atual de produção e alcançar medidas apropriadas de melhoria aquém das necessidades atuais e futuras da empresa.

Esta abordagem vem suportada pelo uso da simulação como ferramenta de apoio à decisão e análise dos processos, em conjunto com metodologias e ferramentas *Lean* no que toca à deteção de pontos críticos e implementação de melhorias. As medidas aplicadas serão posteriormente avaliadas esperando contribuir para uma redução de custos associados ao processo e desperdícios laborais, melhorar a gestão de recursos e materiais em stock, e aumentar a eficiência dos processos.

### **1.3. Metodologias de Investigação**

No que diz respeito aos métodos de investigação, a metodologia utilizada para esta dissertação começa por realizar uma revisão bibliográfica do tema em questão, utilizando o método do estudo do caso. Esta metodologia é geralmente definida como o estudo de um fenómeno contemporâneo e em contexto real, que envolve uma descrição profunda através de múltiplas fontes de dados e métodos de pesquisa (Cheek et al., 2018). O estudo de casos possibilita uma abordagem de investigação pragmática e flexível, capaz de proporcionar uma compreensão aprofundada de diversas questões em várias áreas de estudo (Harrison et al., 2017).

Segundo Priya, 2021, os principais elementos para a conceção de um estudo do caso são:

- 1) Propósito do estudo;
- 2) Tipo de investigação efetuada em função do objetivo pretendido, podendo ser exploratório, explicativo ou descritivo;
- 3) Questões de investigação;
- 4) Estudo de um único caso ou de casos múltiplos, consoante o objetivo, questões de investigação e a disponibilidade dos recursos associados;
- 5) Fundamentos epistemológicos que determinam a direção do estudo;
- 6) Revisão da literatura;
- 7) Amostragem;
- 8) Métodos adotados de recolha de dados;
- 9) Análise dos dados;
- 10) Apresentação dos dados analisados de forma eficaz e coerente.

Crowe et al. (2011) também apontam que através da forma intrínseca de como esta abordagem é utilizada, sendo o caso analisado profundamente no seu contexto real e natural, é por vezes considerada uma abordagem 'naturalística', o contraste sendo uma conceção 'experimental', que pode não ser apropriada para responder a certas questões de investigação. A análise e interpretação dos resultados obtidos em diversos casos de estudo sobre como a simulação é utilizada na melhoria de layouts industriais foi feito com o objetivo de obter um melhor conhecimento do tópico em questão, metodologias utilizadas, e formas de resolver o problema.

De seguida, deu-se início à análise e recolha de dados para a linha de produção em questão. Através do mapeamento e estudo realizado para recolher os tempos de ciclo dos diferentes processos, foram obtidos os dados necessários para a posterior criação dos modelos de simulação e uso de ferramentas *Lean* para avaliar os possíveis pontos de melhoria presentes na linha.

Com base nos dados obtidos, foram concebidas várias propostas de melhoria para mitigar os problemas detetados. Após a implementação destas medidas, os ganhos alcançados foram identificados e a simulação foi utilizada para medir o resultado que tiveram no ritmo de produção, de modo a quantificar o impacto das melhorias nos processos.

## **1.4. Apresentação da Empresa**

O presente projeto de dissertação é realizado na Körber Supply Chain PT, localizado em Vilar e conta com mais de 40 anos de experiência no desenvolvimento e conceção de soluções para sistemas automatizados de armazenamento e distribuição de produtos, nomeadamente para armazéns logísticos. Até 2015, fazia parte do grupo EFACEC até se tornar membro do grupo alemão Körber AG, com mais de 10.000 trabalhadores por todo o mundo, especializando-se na produção de equipamentos industriais para vários setores, nomeadamente as indústrias farmacêuticas, tecidos e tabaco. A vertente *Supply Chain* é sediada em Portugal, e conta com a representação em 19 países e clientes por todas as partes do mundo. Na figura 1 encontra-se as instalações da fábrica da empresa.

## Introdução



Figura 1 - Fábrica Körber Supply Chain PT

A empresa apresenta um conjunto diversificado de produtos e equipamentos que abrangem vários pontos do percurso, desde a entrada do produto no armazém (habitualmente transportado em paletes), ao armazenamento destes produtos em estantes, até ao instante da expedição para o cliente final. Para além da montagem e desenvolvimento dos equipamentos para os clientes, a Körber integra também os sistemas de software de controlo, assim como a implementação e manutenção dos mesmos. Os clientes da Körber Supply Chain são por norma empresas que precisam de aumentar a rentabilidade e eficiência de um armazém novo ou já existente, assim tornado-se justificável o investimento e implementação de um sistema automatizado para diminuição dos tempos de transporte de produtos.

As propostas de novos clientes são tratadas como projetos, sendo estudadas individualmente de forma a conseguir desenvolver soluções que vão ao encontro das necessidades dos clientes. O projeto começa pelo desenho do layout do armazém do cliente, que será constituído pelos produtos desenvolvidos pela Körber. A seguir, os equipamentos que serão produzidos são desenvolvidos no departamento de engenharia e só após os produtos estarem definidos é que as equipas de montagem mecânica e elétrica poderão dar início à produção dos equipamentos.

Posto isto, face à variabilidade das características impostas por cada cliente, como por exemplo o espaço, produtos a transportar, entre outros requisitos, a Körber desenvolve soluções únicas para cada cliente, sendo considerada uma empresa *engineer-to-order*. Este tipo de modelo empresarial traz dificuldades para a produção, como a impossibilidade de produzir equipamentos para stock sem um cliente definido, alta variabilidade nos processos de fabrico e dificuldade de implementar procedimentos standard de montagem dos equipamentos. Por estes motivos, a flexibilidade e inovação são pontos fulcrais na Körber, tentando combater estas restrições através da aplicação de metodologias de melhoria contínua e *Lean* de maneira a reduzir custos e minimizar desperdícios para manter a qualidade e exigência ao mais alto nível.

Os produtos de referência da Körber Supply Chain são os *Stacker Cranes* e *Rail Guided Vehicles*, no entanto a lista de equipamentos estende-se para os *Automated Guided Vehicles*, *Conveyors*, entre outros.

Os *conveyors*, ou transportadores, serão o principal foco deste projeto, sendo o equipamento com maior volume de produção na Körber e, com este alto-nível de produção, mesmo pequenas melhorias ao processo podem ter um impacto considerável não só em termos de equipamentos produzidos, como também na redução ou eliminação da percentagem de atividades que não acrescentam valor ao processo. Estes equipamentos estão categorizados em dois tipos distintos, os de correntes – *Chain Conveyors (CCV)*, e os de rolos – *Roller Conveyors (RCV)*. Nas figuras 2 e 3 encontram-se respetivamente representados exemplos destes transportadores de correntes e rolos. As características destes equipamentos variam consoante as necessidades do cliente, nomeadamente o comprimento, que pode variar entre 1 a 4 metros, e a largura, que depende do tipo de carga a transportar (em palete ou não *standard*). Os CCV's por exemplo, podem ter mais ou menos número de longarinas (perfis que suportam as correntes e outros elementos do equipamento), sendo que o transportador com duas longarinas é o mais comum. Também podem existir equipamentos com funcionalidades adicionais, como sensores, passadiços, entre outros.

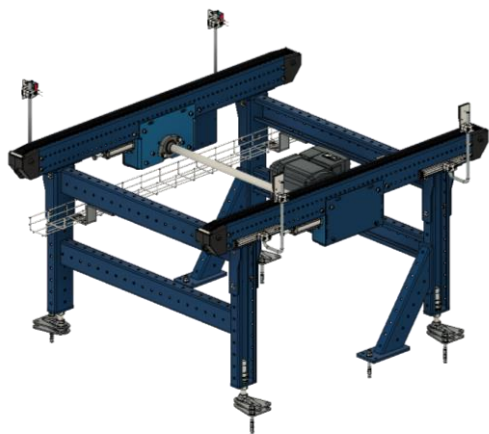


Figura 2 – Transportador de Correntes (CCV)



Figura 3 – Transportador de Rolos (RCV)

Apesar da empresa ter capacidade de fabricar internamente certos componentes para alguns equipamentos, maior parte do material é fornecido por fornecedores externos. Antes de começar o processo de montagem dos equipamentos, é efetuado o pedido do material que será utilizado no projeto, sendo armazenado num armazém logístico. Quando a data definida para o início de montagem dos equipamentos se aproxima, a ordem de produção é iniciada e os materiais são enviados para a fábrica, situado noutra local. Assim que o material chega, as equipas podem começar o processo de montagem dos equipamentos. Quando a montagem e eletrificação dos equipamentos é finalizada, estes são guardados até à data de expedição para o cliente final.

## **1.5. Estrutura da Dissertação**

A seguinte dissertação está dividida em cinco capítulos distintos, começando pelo capítulo 1, onde é abordado a introdução ao trabalho, incluindo a contextualização do tema em questão, os objetivos da investigação, metodologias utilizadas e é dada uma breve apresentação da empresa onde foi realizado este projeto.

No capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica dos tópicos referentes a esta dissertação, passando pelo enquadramento da simulação como ferramenta de apoio à decisão, a revisão de casos de estudo sobre a utilização da simulação para a melhoria de layouts de linhas de produção, o problema dos layouts industriais também é abordado, depois é introduzido diferentes tipos de modelos analíticos para a melhoria de layouts. Os contributos da Indústria 4.0 para a melhoria de layouts também são descritos, por fim sendo abordado as perspetivas futuras dos tópicos discutidos.

No capítulo 3, dá-se início à parte prática deste projeto, contextualizando os vários processos abordados e a linha de produção que os engloba, abordando também o estudo realizado à linha, problemas identificados e propostas de melhorias apresentados.

O capítulo 4 aborda os resultados e discussão dos mesmos, onde serão apresentados os resultados qualitativos alcançados, assim como a quantificação dos resultados quantitativos através de previsões utilizando a simulação.

O quinto e último capítulo é destinado à conclusão do trabalho, identificação das dificuldades encontradas e serão indicadas sugestões para futuros trabalhos neste contexto.

## **2. Revisão Bibliográfica**

No presente capítulo, é realizada uma revisão bibliográfica profunda, abordado o tema da simulação como ferramenta para otimização de layouts, avaliando diversos casos de estudo relevantes ao tópico, os seus conceitos e objetivos, empresas onde foram realizados, ferramentas utilizadas e resultados obtidos. Depois, o problema dos layouts indústrias é introduzido, realçando os pontos mais importantes, como classificá-los e de seguida as diferentes metodologias que podem ser utilizadas para o resolver. Por fim, os contributos da Indústria 4.0 são referidos e as perspectivas futuras sobre o tema são abordados.

### **2.1. Simulação como Ferramenta de Apoio à Decisão**

A simulação possibilita a previsão dos resultados de um sistema ou processo complexo e real, através da implementação e análise dos parâmetros históricos desse sistema num modelo de simulação, que pode ser estudado com o objetivo de compreender o comportamento do sistema e/ou avaliar possíveis estratégias de melhoria, sem ter de alterar o sistema real. Sendo uma ferramenta extremamente poderosa, permitindo o estudo, análise, e avaliação de situações onde, no mundo real, seriam impossíveis de recrear sem ter que interromper o bom funcionamento do sistema real (Sharma, 2015).

Segundo Schubert et al., 2015, ferramentas de apoio à decisão baseadas na simulação podem avaliar eficazmente milhares de planos operacionais alternativos, auxiliando na compreensão da melhor sequência de ações a tomar para alcançar o objetivo definido para o sistema produtivo.

De acordo com (Dantas et al., 2016), a simulação é usada como uma ferramenta de apoio à decisão, sendo mais barato e rápido criar um sistema virtual de forma a testar vários cenários e decisões antes de serem implementados na realidade.

Com o aumento da complexidade dos sistemas produtivos, por causa da redução nos ciclos de vida dos produtos, constantes inovações no mercado e aumento da concorrência resulta com que as empresas apontem para uma melhoria constante dos seus processos. A modelação e análise através da simulação possibilita o estudo destes sistemas complexos, onde por vezes a análise por métodos matemáticos torna-se inadequado, estes modelos podendo ser testados através da simulação (Mourtzis, 2020).

Segundo Ferreira et al., 2012, a simulação é uma das ferramentas mais utilizadas para a previsão do comportamento dinâmico de um sistema produtivo, sendo capaz de reproduzir o comportamento e interações entre os subsistemas num modelo computacional.

A simulação tem sido utilizada nos mais diversos setores, incluindo na manufatura, hospitais, logística, militar, entre outros, contribuindo para o desenvolvimento e melhoria de produtos, processos e serviços (Negahban & Smith, 2014; Rodič, 2017).

Segundo dos Santos et al., 2022, a escolha do melhor tipo de simulação a utilizar depende da natureza e objetivos do sistema modelado, onde cada tipo de simulação é diferenciado pelos métodos e características de cada um, tendo mais vantagens ou desvantagens dependendo do ambiente onde será aplicado.

Os dois tipos de simulação mais utilizados neste contexto são a simulação de eventos discretos, ou *Discrete Event Simulation* (DES) e a simulação baseada em agentes, ou *Agent-Based Simulation* (ABS). A DES baseia-se na modelação de sistemas que alteram os seus estados com base na ocorrência de eventos, que acontecem em intervalos de tempos discretos (Montevecchi et al., 2015). A ABS é baseado na modelação do comportamento dos chamados agentes, que podem representar pessoas e grupos de processos ou máquinas, que interagem entre si e com o ambiente em que operam (Abar et al., 2017).

Segundo Law, 2019, se o modelo de simulação for mal concebido e não representar aproximadamente o sistema real, quaisquer conclusões derivadas do modelo podem induzir em erro e resultarem em más e dispendiosas tomadas de decisão. O uso da simulação pode apresentar custos superiores aos potenciais benefícios, uma vez que os projetos tradicionais envolvem geralmente um âmbito limitado, a necessidade de profissionais qualificados e longos períodos de projeto (Lu et al., 2019).

## **2.2. Otimização de Layouts de Linhas de Produção – Casos de Estudo**

De modo a melhor compreender a utilização da simulação como ferramenta de apoio à melhoria e otimização de layouts de linhas de produção, estão presentes na tabela 1 diversos casos de estudo relevantes para o estudo do tema em questão.

Tabela 1 – Casos de estudo sobre a otimização de layouts de linhas de produção

REFERÊNCIAS	DESCRIÇÃO
(Kurkin & Šimon, 2011)	<p>Este estudo foi realizado com o âmbito de otimizar o layout de duas linhas de produção para produtos da Daimler e Grupo VW (Volkswagen) produzidos pela companhia BOS Automotive Products Ltd., baseada na Chéquia. O objetivo desta otimização é melhorar o espaço utilizado no chão de fábrica, permitindo assim a realização de novos projetos no novo espaço adquirido. Para alcançar este objetivo, foram projetadas várias variantes do layout da linha de produção, utilizando uma tabela multi-critério para analisar vários parâmetros pertinentes, de forma a poder decidir qual a melhor solução. O resultado do estudo foi depois comprovado utilizando o software de simulação discreta <i>Tecnomatix Plant Simulation 9</i> (da Siemens), onde a melhor variante demonstrou uma redução de 30,6% do espaço utilizado, mantendo todos os parâmetros do processo, como também inúmeras outras vantagens.</p>
(Kanduč, 2015)	<p>O estudo realizado na Podgorje Ltd., uma empresa de móveis eslovena, tem como objetivo a otimização dos processos de fabrico, analisando o layout das máquinas no chão de fábrica, de forma a tentar reduzir a distância total percorrida pelos produtos. Para alcançar este objetivo, foi utilizado o software de simulação discreta <i>Anylogic</i> para criar um modelo da fábrica, de forma a poder fazer a projeção da melhoria através de novos layouts gerados manualmente ou algoritmicamente (algoritmo de otimização heurística), e analisar todos os pontos do processo envolvido. Posto isto, o layout melhorado proposto à empresa consegue reduzir em 28% a distância total percorrida pelos produtos ao longo do processo, que por consequência também reduz os tempos totais de transportes, transportes esses realizados por trabalhadores que com esta melhoria, poderão ser realocados para outros postos de trabalho.</p>
(Rizqi & Aulia, 2019)	<p>Para o seguinte caso de estudo, foi utilizado a ferramenta de simulação <i>Flexsim 6.0</i> com o intuito de fazer uma melhoria ao layout da empresa KM ALUMINIUM. Após ter sido feito uma análise do processo, inquerindo aos funcionários e diretores da empresa e utilizando o modelo de simulação do layout atual da empresa, chegou-se à conclusão que a maior causa de ineficiência e falta de produtividade é em relação a atividades de manuseamento de material pelo chão de fábrica, tendo vários pontos do processo não alinhados com o fluxo de produção. Com estes dados adquiridos, utilizou-se o software de simulação para fazer as mudanças e melhorias do processo, propondo um novo layout, onde se encontrou uma redução dos custos de manuseamento do material de 55,22% e a produção aumentada em 25 unidades (de 515 para 540), num dia de trabalho.</p>

Tabela 1 – Casos de estudo sobre a otimização de layouts de linhas de produção (cont.)

<p>(Zuniga et al., 2020)</p>	<p>O presente caso de estudo veio apresentar uma metodologia de forma a integrar a simulação e otimização para a conceção e melhoria dos layouts de empresas industriais, passando pela consciencialização, diagnóstico, desenvolvimento, avaliação e conclusão. Esta metodologia foi implementada em duas empresas, onde também foram realizadas várias entrevistas a responsáveis do chão de fábrica para determinar as causas de maior ineficiência durante o processo produtivo. Estes pontos foram depois implementados para realizar um modelo pelo método de análise de ressonância funcional, onde é possível ver exemplificar e demonstrar pelo modelo a forma como estas causas afetam o processo. Posto isto, utilizando os métodos anteriormente discutidos, foram elaborados vários layouts otimizados, apresentados aos gerentes e stakeholders das empresas, permitido terem várias opções de escolha.</p>
<p>(Prajapat et al., 2016)</p>	<p>O seguinte caso de estudo visa desenvolver um modelo de simulação discreta no software WITNESS para a análise e otimização do layout de uma oficina de reparação periódica de componentes. O objetivo deste modelo é permitir aos gestores de fábrica avaliar vários layouts e configurações para otimizar a produção, sendo necessário a alteração do layout para cada ciclo de reparação principal, permitindo assim não só facilitar a alteração do layout para cada ciclo, como também otimizá-lo para cada processo. O resultado foi alcançado, criando o modelo de simulação com uma ligação a uma folha de cálculo em Excel com vários indicadores-chaves de desempenho, como a distância percorrida ou tempos de ciclo, que permite a fácil configuração e identificação do layout otimizado.</p>
<p>(Antonelli et al., 2018)</p>	<p>Este estudo analisa a combinação de dois métodos de simulação (Simulação da dinâmica de sistemas (SDS) e simulação de eventos discretos (DES)), utilizados para estudar o funcionamento de um processo produtivo de uma empresa. O modelo SDS é usado para simular o comportamento dinâmico do sistema, nomeadamente para o trabalho manual e estudo dos operadores, enquanto o modelo DES utiliza vários senários para simular a operação dos sistemas de manufatura, principalmente as máquinas autónomas. Juntos permitiram avaliar o desempenho global do processo produtivo. Após a implementação da proposta apresentada, foram utilizados os softwares de simulação <i>Vensim</i> (para o modelo SDS) e <i>FlexSim</i> (para o modelo DES), onde foi possível visualizar o processo em questão em maior detalhe, permitindo a criação de vários senários melhorados, alterando diversos parâmetros do sistema no modelo, sendo possível também avaliar os resultados das alterações realizadas para ser tomadas decisões a implementar no processo real.</p>

Tabela 1 – Casos de estudo sobre a otimização de layouts de linhas de produção (cont.)

(Fousek et al., 2017)	<p>Estudo baseado na análise do processo produtivo de ventoinhas ventiladores radiais da empresa Alteko, Inc. utilizando o programa de simulação SIMUL8. Primeiramente foi criado um modelo conceptual do processo, para depois poder ser aplicado no modelo de simulação utilizando o software referido, para cumprir com uma encomenda de 50 produtos num período de 15 dias. Através da análise deste modelo, monitorizando a carga nos vários recursos e operadores durante todo o processo, foi possível confirmar que os produtos poderão ser fabricados até ao período de 15 dias estipulado, caso o operador responsável pelo posto de trabalho considerado gargalo (montagem), manter-se em operação no mínimo até 60% do tempo de trabalho.</p>
(Navarra et al., 2017)	<p>Este trabalho apresenta a análise de uma fábrica de fundição de cobre utilizando a simulação de eventos discretos, de forma a mais facilmente avaliar o desempenho dos sistemas dinâmicos dos fornos individuais utilizados na produção de cobre. Ao usar os parâmetros do balanço de massa e temperatura no modelo de simulação, foi possível fazer uma avaliação do equilíbrio entre a produção do cobre e o respetivo impacto ambiental. Esta metodologia pode ser aplicada não só a outras fábricas de fundição de cobre, como também pode ser adaptada para outros sistemas metalúrgicos.</p>
(Piccinini et al., 2018)	<p>O seguinte caso de estudo tem como objetivo propor uma metodologia utilizando a simulação de eventos discretos, para reconfigurar e melhorar o agendamento de um sistema de fabrico complexo. Para validar a viabilidade desta metodologia, esta foi implementada numa empresa italiana do setor automóvel, nomeadamente na linha de produção de pinças de travões. Os resultados obtidos provam a utilidade desta metodologia, no que consta aa melhoria e avaliação de mudanças no layout da linha de produção, como também o cumprimento de ordens de fabrico.</p>
(Rybicka et al., 2016)	<p>Este estudo utiliza a simulação de eventos discretos para melhorar o setup de um sistema de fabrico flexível. Com o auxílio da ferramenta de simulação WITNESS, foi possível criar um modelo de simulação da linha de produção de uma empresa no setor automóvel, que implementa este sistema flexível, incluindo a parte logística do processo. Este modelo de simulação permitiu analisar os parâmetros com o maior impacto no sistema, facilitando assim a melhoria e otimização do setup e por consequência, a flexibilidade do sistema em questão.</p>
(Neeraj et al., 2018)	<p>O presente caso de estudo visa utilizar o software de simulação Arena para estudar uma linha de produção de suportes para travões em alumínio, de uma empresa industrial. Um modelo de simulação do sistema original foi realizado com o objetivo de identificar os gargalos e determinar a produtividade do sistema, de forma a poder ser melhorado. Para encontrar uma solução ótima do sistema, foram utilizadas outras ferramentas disponíveis no Arena (como o OptQuest), que possibilitam esta resolução. Após a realização de ambos os modelos, foi possível conferir um aumento de 6% na produtividade total do sistema, e uma redução de 8,33% nas necessidades de mão-de-obra, entre o modelo original e o novo modelo sugerido.</p>

Tabela 1 – Casos de estudo sobre a otimização de layouts de linhas de produção (cont.)

(Pierreval, 2018)	Este estudo apresenta uma abordagem para combater a complexidade na conceção de layouts de sistema de fabrico, utilizando a otimização e simulação. Estes sistemas apresentam comportamentos dinâmicos, que por sua vez podem ser negligenciados ao utilizar modelos matemáticos determinísticos. Assim, ao utilizar softwares de simulação, em conjunto com uma ferramenta de otimização, é possível utilizar o modelo para analisar e definir os parâmetros relacionados ao sistema, e a otimização para melhorar os valores das variáveis escolhidas (como a distância ou tempos), fornecendo assim uma solução ótima. Para comprovar a metodologia apresentada, esta foi exemplificada utilizando um caso de estudo para a melhoria do layout de uma linha de produção, onde com o software de simulação Arena, e o módulo de otimização OptQuest, foi possível alcançar uma solução ótima.
(Bon & Shahrin, 2016)	Este trabalho descreve uma proposta de melhoria de uma linha de montagem da empresa de motociclos MODENAS, baseada na Malásia, através do uso do software de simulação Arena. O principal objetivo é tentar reduzir o número total de operações em diversos postos de trabalho, de forma a aumentar a produtividade do processo. Para conseguir atingir este objetivo, foram realizados dois modelos, sendo o primeiro baseado na linha de produção original da fábrica, onde foi possível retirar os tempos de espera em etapas separadas do processo, para que fosse possível identificar os pontos de gargalho. O segundo modelo proposto foi concebido através dos dados retirados do primeiro, tendo reduzido o número total de operações de 42 para 36 sem alterar a funcionalidade do sistema, mas aumentando a produtividade total e reduzindo os tempos totais de espera em diversas etapas do processo.
(Emmanuel Lorou et al., 2021)	Este estudo pretende estimar o desempenho de um sistema de produção de camiões, avaliado os engarrafamentos em diferentes partes do processo, tal como as respetivas capacidades e constrangimentos. Com o intuito de criar diversos cenários para a melhoria do sistema, foi utilizado o software de simulação Arena, para possibilitar esta análise. Um modelo conceptual inicial foi concebido, sendo possível identificar os pontos de gargalho e respetivas filas de espera em cada estação de trabalho. Após a realização de 3 cenários distintos, adicionando mais recursos ao processo, o melhor foi escolhido, apresentando um acréscimo de 110% na produtividade total do processo, onde 16 camiões eram produzidos, e após a implementação da melhoria passou a produzir 36.
(Naranje et al., 2019)	Este estudo realizado em junção com a empresa Eagle Industries Inc., localizado nos EAU, tem como objetivo melhorar a gestão de inventário e o layout da fábrica, sendo esses os problemas principais na empresa. Para efetuar a análise do chão de fábrica, foi utilizado o método de planeamento sistemático do layout, onde uma proposta de melhoria foi apresentada à empresa, após esta ser validada utilizando o software de simulação Technomatrix. Os resultados desta melhoria apresentam um decréscimo de 34% nos custos para a empresa, onde durante o processo, foi possível reduzir o tempo total de produção, como também a distância total percorrida pelos materiais e componentes utilizados.

Tabela 1 – Casos de estudo sobre a otimização de layouts de linhas de produção (cont.)

<p>(Zhang et al., 2019)</p>	<p>No seguinte caso de estudo, é proposto uma estrutura para a conceção do layout de fábricas utilizando a simulação. Ao mesmo tempo, é feita uma comparação e junção entre a utilização de algoritmos matemáticos, métodos heurísticos, e a simulação, de forma a identificar as situações onde estas metodologias seriam mais bem implementadas. Apesar dos algoritmos apresentarem soluções otimizadas aos problemas que são propostos, estes têm dificuldade a lidar com situações complexas e reais num tempo adequado, onde as heurísticas e a simulação tem uma melhor aplicação. No entanto, caso o tempo não seja um fator decisivo na tomada de decisão, os algoritmos podem ser utilizados em conjunto com a simulação, de forma a otimizar e visualizar o problema em questão. Caso contrário, o uso das heurísticas em junção com a simulação fornece uma solução mais adequada. Um caso de estudo ilustrativo foi realizado para implementar e validar a metodologia proposta, tendo sido alcançado o objetivo de melhorar e otimizar o layout de fábrica, consoante os seus parâmetros e restrições.</p>
<p>(Kampa et al., 2017)</p>	<p>Neste trabalho foi abordado o problema de fluxo de produção em sistemas de manufatura, nomeadamente a comparação entre utilizar trabalhadores ou robôs para operar as máquinas nas linhas de produção. Para ser possível efetuar este estudo, foi utilizado a simulação de eventos discretos para analisar as mudanças criadas no processo, e indicadores como o OEE (Eficácia Global do Equipamento) de forma a comparar os resultados obtidos antes e após a automatização do processo. Para verificar este problema, foi utilizado o software Enterprise Dynamics para fazer o modelo de uma linha de prensas mecânicas de uma empresa do setor automóvel. Os resultados obtidos demonstram a pertinência da automatização de linhas produtivas através da robotização, aumentando o valor do OEE em cerca de 48% em relação à linha manualmente operada. Os modelos de simulação permitiram a representação e compreensão do processo produtivo real.</p>
<p>(Leiber et al., 2022)</p>	<p>Este artigo apresenta uma abordagem para o planeamento automatizado de linhas de montagem com múltiplas estações em 3-D, utilizando algoritmos genéticos e simulação para avaliar e otimizar vários layouts possíveis. A otimização tem como finalidade diminuir a área ocupada e o custo de montagem da linha, e ao mesmo tempo melhorando a alocação dos recursos para melhor realizarem as tarefas. Para demonstrar a aptidão deste sistema, vários exemplos foram utilizados de linhas de montagem automatizadas, onde através do algoritmo e diversas gerações criadas, cada vez mais próximas da solução ótima, o melhor resultado foi obtido com os recursos disponíveis.</p>

Tabela 1 – Casos de estudo sobre a otimização de layouts de linhas de produção (cont.)

(Ojstersek & Buchmeister, 2017)	Este caso de estudo aplica a simulação de eventos discretos, comparando o uso de dois softwares (Autodesk Process Analysis 360 e Simio) para obter o melhor resultado para a melhoria de uma linha de produção. Para justificar o uso destes ambientes de simulação na indústria, um exemplo de uma linha produtiva foi utilizado. Para este caso, foram realizados dois modelos de simulação, um da linha original e o segundo após terem sido implementadas medidas para a melhoria do processo, usando ambos os softwares. A comparação entre os dois programas permite validar a projeção da nova linha de produção, onde os resultados obtidos demonstram a aplicabilidade da simulação de forma a ter um processo mais financeiramente e produtivamente rentável e viável, antes de implementar tais mudanças no processo real.
(Jiang et al., 2022)	Este estudo baseia-se na simulação de eventos discretos para modelar uma linha de produção de eixos de cames, utilizando o software Plant Simulation, com o objetivo da melhoria do processo. Este modelo possibilita a análise do processo e parâmetros necessários para melhor compreender os ritmos de trabalho dos equipamentos. Para combater o problema de agendamento das tarefas, um algoritmo genético é usado para chegar à solução ótima. De acordo com a análise do modelo inicial, várias iterações foram posteriormente efetuadas de modo a incrementalmente melhorar o desempenho do sistema. No final, obteve-se um aumento na taxa de utilização dos recursos, que por consequência levou ao acréscimo da produtividade do sistema.

Após a análise dos presentes casos de estudo, é possível constatar a vasta utilidade que a simulação tem, no contexto da melhoria e otimização de layouts industriais. A grande variedade de setores de produção que utilizaram a simulação como ferramenta de apoio à decisão, demonstra uma vasta versatilidade e aplicabilidade para resolver diversos problemas presentes no chão de fábrica, não só relativamente ao layout da fábrica, como também para o aumento da rentabilidade dos próprios recursos utilizados nas linhas de produção.

Através dos resultados alcançados nos diversos casos de estudo, é possível verificar como a simulação e conceção do modelo computacional do sistema possibilita a análise dos parâmetros que influenciam o desempenho, as taxas de utilidade dos recursos, os pontos de engarrafamento e tempos de processamento do sistema. Todos estes fatores são de extrema importância para a melhoria de qualquer sistema, no entanto, a forma como a simulação permite a análise e alteração de qualquer processo sem ter de fazer mudanças no processo real, isto possibilita a projeção de mudanças para uma linha de produção sem custos e tempos de implementação.

### 2.3. O Problema de Layouts de Instalações Industriais

Após a realização da análise dos casos de estudo apresentados anteriormente, foi possível entender como a simulação tem um papel prevalente para a melhoria de layouts industriais. No entanto, é importante realizar um estudo detalhado da aplicabilidade da simulação na resolução do problema do layout de instalações industriais, geralmente conhecido na indústria como o *Facility Layout Problem* (FLP). Este tópico é de extrema profundidade, tendo não só aplicações em diversos ramos e indústrias, nomeadamente em hospitais, instalações logísticas e planeamento de zonas de construção, como também diversas formas de o abordar e resolver (Safarzadeh & Koosha, 2017).

O FLP é um problema fundamental para o planeamento e melhoria dos layouts industriais, sendo um problema extremamente conhecido na área da otimização, que por consequência, tem sido alvo de um elevado número de estudos e revisões por parte de investigadores da área.

De acordo com (Azadivar & Wang, 2000), o FLP associado ao setor industrial é designado pela determinação das localizações relativas e a atribuição do espaço disponível no chão de fábrica a um determinado número de postos de trabalho. Embora, no passado, a maioria das soluções para o FLP concentrassem-se na minimização das quantidades transportadas, o efeito de um determinado layout é muito mais do que apenas o custo de manuseamento de materiais. Apesar de ser importante considerar estes custos na projeção de um novo layout, os tempos de ciclo mais curtos tornaram-se mais importantes nos sistemas de fabrico atuais (J. Liu et al., 2020).

O desempenho de um layout é significativamente afetado por diversos e múltiplos fatores. Segundo Tompkins et al., 2010, os custos de manuseamento de materiais contribuem entre 20% a 50% dos custos operacionais de um produto, pelo que pode ser utilizado para avaliar a eficácia de um layout, este podendo ser considerado como um dos fatores quantitativo mais utilizados para solucionar o FLP.

No entanto, fatores qualitativos também deverão ser considerados na conceção de um layout industrial, caso contrário certos aspetos importantes como a segurança e flexibilidade do processo serão ignorados (Altuntas et al., 2014; Hadi-Vencheh & Mohamadghasemi, 2013).

Na figura 4 é demonstrado as diferentes etapas que classificam o FLP, que serão abordados nos seguintes capítulos. Cada um destes passos são dependentes uns dos outros, já que as propriedades do sistema, ou os objetivos a alcançar podem influenciar a abordagem mais adequada para resolver o problema. Apesar desta classificação ser baseada numa revisão detalhada da literatura nos últimos anos, é importante realçar que não existe apenas um método específico para abordar o FLP, já que este depende de inúmeros fatores e condições que afetam a tomada de decisão, sendo necessário fazer a análise apropriada a cada caso para alcançar o melhor resultado possível (Tayal & Singh, 2018).

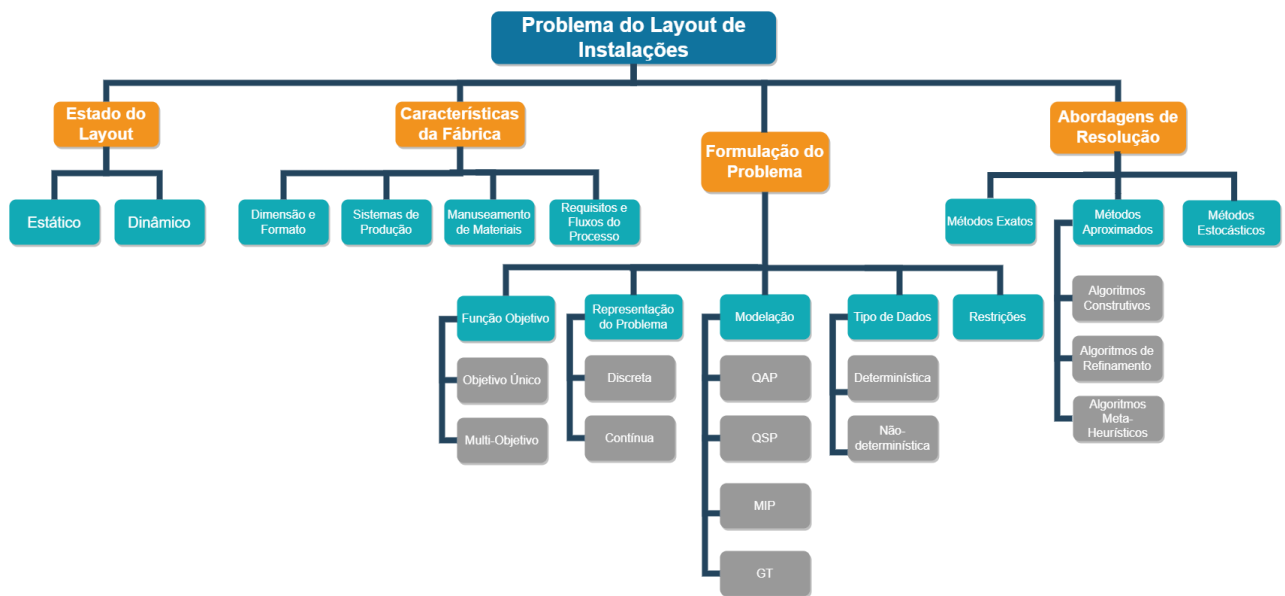


Figura 4 - Classificação do FLP (adaptado de: Hosseini-Nasab et al., 2018; Pérez-Gosende et al., 2021)

### 2.3.1. Estado do Layout

O estado do layout é dividido entre os layouts estáticos e dinâmicos. Quando o fluxo do material entre as diferentes instalações é constante ao longo do tempo, este é considerado um problema de layouts de instalações estático, ou *Static Facility Layout Problem* (SFLP). Portanto, o SFLP é o mapeamento de forma a minimizar os custos de manuseamento de material entre duas instalações adjacentes (Hasda et al., 2017). Como maioria dos sistemas de fabrico não apresentam um fluxo constante de materiais entre instalações durante um longo espaço de tempo, este cenário torna-se pouco realista, reduzindo a sua aplicabilidade para resolução do problema em casos reais, já que as empresas requerem cada vez mais sistemas flexíveis para acompanhar os requisitos e demandas do mercado (Bozorgi et al., 2015).

O problema de layouts de instalações dinâmico, ou *Dynamic Facility Layout Problem* (DFLP), é aplicado quando o fluxo do material muda ao longo do tempo. É normalmente reputado que o DFLP inclui a seleção de um layout estático para cada período de tempo onde existe mudança do fluxo, tomando as decisões necessárias para acomodar essa mudança. Por isso, a forma de resolver o DFLP é determinado através da minimização da soma dos custos de manuseamento e reorganização das instalações, nos períodos sucessivos considerados (McKendall & Hakobyan, 2010).

### 2.3.2. Características da Fábrica

Visto que existem inúmeras formas de classificar e solucionar o FLP, é necessário realçar quais são as características e parâmetros mais importantes para definir o sistema em análise, sendo este um ponto de partida para depois facilitar a conceção de uma solução. Segundo Hosseini-Nasab et al., 2018 e Pérez-Gosende et al., 2021, é necessário ter sempre em consideração:

- 1) **Constrangimentos de espaço e dimensão:** Determinar a área, formato e dimensão que as diferentes instalações possuem;
- 2) **Requisitos e fluxos do processo:** Compreender a sequência do processo, fluxos de material e dependências entre postos de trabalho e departamentos;
- 3) **Manuseamento de materiais:** É importante determinar a rota, tipo de materiais e métodos de transporte entre cada etapa do processo;
- 4) **Especificações do processo produtivo:** A variedade e quantidade dos produtos produzidos pode influenciar na projeção de um layout.

Após ser feita esta análise, tendo sido identificados os principais parâmetros do sistema, segue-se para a definição dos objetivos e metas a alcançar com o projeto de um novo layout. Estes podem incluir a redução dos custos do manuseamento de materiais, minimizar as distâncias e tempos de transporte, acomodar futuras expansões ou apenas melhorar a eficiência do processo. É essencial ter os objetivos bem definidos, já que a implementação e geração de um novo layout representa um alto risco e compromisso a longo-prazo (Nazif et al., 2016).

### 2.3.3. Formulação do Problema

A seguir à determinação do objetivo a alcançar com o novo layout, introduz-se a formulação do problema como a forma de melhor interpretar e visualizar as condições de trabalho, restrições aplicáveis e formas de alcançar uma solução viável. Esta etapa refere-se principalmente aos métodos de resolução por modelação matemática, sendo este tipo de metodologia a mais abrangida pela literatura como forma de gerar layouts alternativos (Pérez-Gosende et al., 2021).

A formulação do problema passa pela representação do problema, definição da função objetivo, restrições, tipo de dados e modelo matemático a utilizar. A formulação do problema de layouts pode ser baseado em diversos tipos de modelos, que ajudam a expressar a complexa relação entre os vários elementos envolvidos, ao mesmo tempo possibilitando a sugestão de soluções para o problema, que maioria dos investigadores consideram um problema de otimização (Vázquez-Román et al., 2019).

Segundo Driira et al., 2007, existem duas maneiras de representar o FLP, através da representação discreta ou contínua, onde:

- **Representação discreta (figura 5.a):** O chão de fábrica é dividido em blocos retangulares com a mesma área e formato, onde cada bloco é atribuído uma instalação. No caso de as instalações possuírem diferentes áreas, estas podem ser atribuídas a vários blocos;
- **Representação contínua (figura 5.b):** Todas as instalações são colocadas em qualquer ponto dentro do chão de fábrica, seguindo as suposições que nenhuma das instalações pode sobrepor outra, e que o número de instalações, a área de cada uma e o custo e valores associados ao fluxo entre instalações é conhecido previamente.

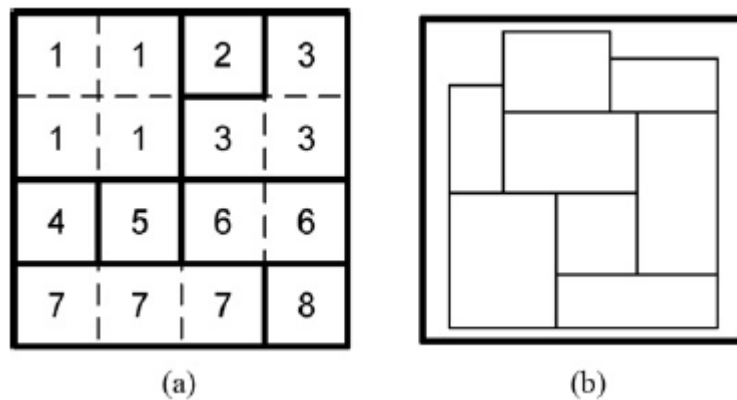


Figura 5 – Representação discreta (a) e contínua (b) do layout (Drira et al., 2007)

Em relação à função objetivo, esta descreve matematicamente o objetivo a ser maximizado ou minimizado, sujeito a uma série de restrições do problema. A função é definida como sendo de objetivo-único, podendo seguir objetivos quantitativos ou qualitativos, ou multi-objetivo. Para o caso do FLP, um exemplo do objetivo quantitativo mais utilizado na literatura é a minimização do custo de manuseamento do material (Hosseini-Nasab et al., 2018).

Apesar da formulação de objetivo-único e quantitativo ser o mais utilizado para solucionar o FLP, não considerar fatores qualitativos, como por exemplo a avaliação de proximidade entre instalações ou fatores de segurança, pode providenciar soluções pouco exequíveis em casos práticos, já que estes fatores podem ser mais relevantes em certos contextos industriais (D. Singh & Ingole, 2019).

Utilizando ambos os fatores, ou seja, usar uma formulação multi-objetivo, pode dificultar a resolução do FLP, como estes objetivos podem ser contraditórios e melhorando um poderá piorar outro, por isso é necessário chegar a um compromisso, onde a solução final chega a estar dentro das limitações impostas pelo responsável da tomada de decisão (Le et al., 2019).

Ao resolver modelos matemáticos de otimização do FLP, certo tipo de dados utilizados, relacionados com pontos referidos anteriormente como as dimensões das instalações, distâncias percorridas pelos produtos, custos de transporte, fluxo de materiais, entre outros, podem não ser conhecidos inicialmente. Sendo assim, a natureza dos dados tem de ser estimados através de formas não-determinísticas (Pérez-Gosende et al., 2021). São utilizados métodos estocásticos e de formulação ‘difusa’, ou *fuzzy*, para solucionar este tipo de problema, incluindo a simulação dos dados para combater esta incerteza (Peng et al., 2018).

Desde que o FLP foi abordado, vários modelos matemáticos foram desenvolvidos para formular o FLP. Segundo Moslemipour et al., 2012, os principais modelos utilizados são:

- **Quadratic Assignment Problem (QAP):** O Problema de Atribuição Quadrática, ou QAP, é o modelo utilizado para formular o FLP quando este apresenta uma representação discreta, tendo sido primeiramente abordado pelos autores Koopmans & Beckmann, 1957, onde a planta da fábrica é dividida em blocos de áreas iguais, sendo o objetivo a atribuição de  $n$  instalações de áreas iguais para  $n$  locais independentes;

- **Quadratic Set Problem (QSP):** Quando se trata de um FLP com representação discreta e instalações de áreas diferentes, pode ser utilizado o modelo do Problema do Conjunto Quadrático, ou QSP. Neste modelo, a área total da fábrica, ocupada por todas as instalações, é dividida em blocos mais pequenos assim é alocado uma localização para cada instalação, e considera-se que cada bloco também terá apenas uma instalação;
- **Mixed Integer Programming (MIP):** O modelo de Programação Inteira Mista, ou MIP, consiste na formulação de uma função objetivo linear da mistura de variáveis de decisão inteiras e não-inteiras sujeitas a um conjunto de restrições lineares de igualdade e desigualdade. Este modelo é apropriado ao FLP de instalações de áreas diferentes e representação contínua, onde também é possível conceber um layout detalhado onde a localização de corredores e pontos de recolha/entrega são determinados;
- **Graph Theoretic Problem (GT):** No Problema de Teoria de Grafos, ou GT, o FLP é modelado como um grafo. Este grafo é formado por nós e arcos, que representam uma instalação e a adjacência entre um par de instalações, respetivamente. Esta adjacência é classificada utilizando o peso do arco, onde são dados como uma matriz, referida como ‘gráfico de relatividade’. O peso pode representar tanto o benefício como o custo da proximidade entre duas instalações. No caso de este representar benefício, então o objetivo será encontrar uma disposição das instalações de forma a maximizar este peso, caso contrário será necessário minimizar o custo.

#### 2.3.4. Abordagens de Resolução

Desde que o FLP foi abordado, investigadores trabalharam para propor inúmeras metodologias para solucionar o problema dos layouts industriais. Muitas destas abordagens baseiam-se na modelação matemática do problema, utilizando algoritmos para encontrar soluções ao FLP. No entanto, com o desenvolvimento de novas tecnologias e o estudo contínuo sobre o tópico, novas abordagens tem sido descobertas para resolver o FLP, incluindo o uso de ferramentas e pacotes de software para auxiliar na resolução. Estas metodologias são abordadas em melhor detalhe no seguinte capítulo.

### 2.4. Modelos analíticos para a melhoria de layouts

Para resolver o problema do projeto de layout de instalações, existem inúmeros métodos que podem ser utilizados para a melhoria e otimização dos layouts. Estes métodos estão categoricamente divididos entre modelos matemáticos e algoritmos para a resolução do problema de layout (Pérez-Gosende et al., 2021).

No âmbito desta dissertação, serão abordados em mais detalhe os pacotes de software especializados para a resolução do problema de layout, já que os modelos matemáticos, apesar de aplicáveis à resolução de problemas de layout, tornam-se pouco eficazes ou quase inutilizáveis quando se trata de um problema complexo ou com elevado número de instalações.

Estes métodos estão divididos em três categorias distintas, nomeadamente os métodos exatos, métodos heurísticos e métodos estocásticos.

### 2.4.1. Métodos exatos

Os métodos exatos são utilizados para fornecer a melhor solução, ou as melhores soluções, caso existam, para um determinado problema. Estes algoritmos são maioritariamente utilizados para resolver problemas do QAP, sendo utilizados para solucionar os FLP de pequenas dimensões (Hosseini-Nasab et al., 2018). Como se trata de um problema de otimização, o principal foco é minimizar o custo total do sistema, através da atribuição das instalações nos locais que irá resultar numa redução do custo. Este custo é determinado através do fluxo de materiais entre pares de instalações, como também a distância e custo de transportes entre ambas.

Segundo Tavares, 2000, a formulação do QAP não pode ser utilizado diretamente para solucionar problemas de layout com um elevado número de instalações ou instalações de áreas diferentes. Para tal, é necessário utilizar um QAP modificado, ou usar métodos diferentes para a resolução do problema do layout. Um exemplo de um método algorítmico ótimo é o método *Branch and Bound*.

Os algoritmos *Branch and Bound* já foram bem-sucedidamente implementados para solucionar problemas complexos de otimização, nomeadamente aplicando, em conjunto com o algoritmo, o método conhecido por *Gilmore-Lawler Bound* (Gilmore, 1962; Lawler, 1963), este sendo considerado um dos métodos mais eficazes para solucionar o problema do QAP, por aplicar o procedimento computacional relativamente mais rápido comparado com outros métodos similares (Burkard et al., 1998).

No entanto, como referido anteriormente, este método tem alguns constrangimentos quando aplicado para um caso com elevado número de instalações, pela natureza do crescimento ramificado deste tipo de algoritmos. Através do caso de estudo realizado por Palubeckis (2012), foi desenvolvido um algoritmo *Branch and Bound* utilizando a técnica Gilmore-Lawler Bound para solucionar o problema de projeto para layouts de instalações de fila-única equidistantes, onde o resultado computacional obtido foi sucedido para instantes com tamanho até 35 instalações. Isto demonstra como para casos reais, a aplicabilidade de algoritmos ótimos utilizados no contexto da melhoria de layouts industriais torna-se inadequada, apesar de possível, por causa da grande complexidade e dimensão habitual deste tipo de problemas.

Para combater esta incapacidade inerente da resolução de problemas de layouts de instalações utilizando algoritmos ótimos, foram ainda desenvolvidos algoritmos sub-ótimos ou heurísticos, de forma a obter eficazmente soluções perto das pretendidas, embora estas por vezes não apresentem a melhor solução possível (Asl & Wong, 2015).

### 2.4.2. Métodos heurísticos

Os métodos heurísticos ou aproximados, como o nome indica, utilizam heurísticas para alcançar soluções perto das soluções ótimas, sem requerer a altos tempos de processamento. Estes podem ser divididos em 3 principais categorias, algoritmos construtivos, de refinamento e meta-heurísticos.

Por causa do vasto uso destes algoritmos no contexto dos layouts industriais, alguns pacotes de software especializados foram desenvolvidos para auxiliar e facilitar o uso destes algoritmos (S. P. Singh & Sharma, 2006).

### Algoritmos Construtivos

Os algoritmos construtivos são utilizados para criar soluções do zero, onde as instalações são selecionadas e posicionadas iterativamente, até que um layout completo tenha sido obtido passado apenas por uma iteração. Os algoritmos construtivos são considerados como a abordagem heurística mais simples e antiga para solucionar o QAP de um ponto de vista conceptual e de implementação (S. P. Singh & Sharma, 2006). No entanto, a qualidade das soluções prestadas através deste método são geralmente consideradas insatisfatórias, já que apenas uma solução é apresentada e pode ser longe da solução ótima (Hosseini-Nasab et al., 2018).

Alguns exemplos de algoritmos construtivos são:

- **CORELAP** (*Computerized Relationship Layout Planning*) (Lee & Moore, 1967)
- **ALDEP** (*Automated Layout Design Program*) (Seehof & Evans, 1967)
- **PLANET** (*Programming Layout Analysis and Evaluation Technique*) (Deisenroth & Apple, 1972)

O método CORELAP, primeiro introduzido por Lee & Moore (1967), utiliza um diagrama de relações de atividades, ou *Activity Relationship Chart* (ARC), onde é atribuído qualitativamente os dados da relação/proximidade entre as instalações, habitualmente usando a escala presente na tabela 2, onde para cada instalação é atribuído um valor que será depois utilizado para calcular o grau de proximidade total, ou *Total Closeness Rating* (TCR) (Tarigan et al., 2019). A instalação que tiver o maior valor de TCR será a primeira a ser alocada. O processo dá continuidade atendendo ao processo iterativo de escolha e posicionamento das instalações no layout, onde a instalação que possuir a melhor relação com a instalação colocada anteriormente, sendo 'A' a relação mais forte e 'X' a menos forte, esta será posicionada junto à anterior. No caso de mais de uma instalação possuir a mesma relação com a instalação anteriormente alocada, então a instalação escolhida será a que tiver o valor de TCR mais alto (Maulida Hakim & Istiyanti, 2015).

Tabela 2 - Escala de atribuição para ARC

Símbolo	Relação	Valor TCR
A	Absolutamente necessário estar próximo	5
E	Muito importante estar próximo	4
I	Importante estar próximo	3
O	Proximidade normal	2
U	Sem importância de proximidade	1
X	Indesejável estar próximo	0



Como os métodos construtivos normalmente tratam apenas de parâmetros qualitativos, baseados na relação e proximidade das instalações para criar uma solução, esta pode ser insuficiente, ou apresentar resultados longe dos pretendidos (Lufika et al., 2021). Para combater esta limitação, foram também criados algoritmos e métodos de refinamento, que podem ser utilizados em conjunto com os algoritmos construtivos para obter uma melhor solução.

### **Algoritmos de Refinamento**

Os algoritmos de refinamento precisam de ter um plano inicial do layout, que pode ser gerado aleatoriamente ou através dos métodos construtivos referidos anteriormente. Com esta solução inicial, o algoritmo irá aplicar operações com o objetivo de melhorá-lo, que consistem em trocar a localização de 2 ou 3 instalações simultaneamente. Caso o resultado desta troca produza uma solução melhor, então esta será escolhida. Este procedimento será repetido até que não existam mais soluções possíveis.

Os algoritmos de refinamento mais utilizados para solucionar o FLP são:

- **CRAFT** (*Computerized Relative Allocation of Facilities Technique*) (Armour & Buffa, 1963)
- **COFAD** (*Computerized Facility Aided Design*) (Tompkins & Reed, 1976)

O CRAFT é a abordagem de refinamento predominante para resolver os FLP's, tendo sido criado por Armour & Buffa (1963). Como referido anteriormente, este programa utiliza um layout já fornecido para efetuar melhorias graduais ao layout, avaliando as instalações com locais permutáveis, com o objetivo de minimizar os custos de transporte e manuseamento dos materiais do processo (Prasad et al., 2014). Para tomar em consideração parâmetros qualitativos, o ARC pode também ser utilizado como forma de representar e facilitar a escolha e troca dos departamentos através da relação e interdependência entre as instalações (J Tampubolon et al., 2020). A troca entre departamentos é feita através do centroide de cada instalação, sendo normalmente feita a representação dos layouts e instalações em blocos retangulares, e no caso onde a instalação possua área não-retangular, esta é separado em divisões retangulares (Nabila et al., 2022).

Segundo Deshpande et al., 2016, o método CRAFT é implementado, começando pela troca dos departamentos com fronteiras comuns ou áreas iguais, sendo calculado a distância entre os centros de forma a determinar o custo do movimento dos departamentos, onde as trocas com os menores custos serão escolhidos. O custo total pode ser formulado matematicamente, que será igual ao somatório da multiplicação dos fluxos, distâncias, e custos de deslocação entre os departamentos.

Através do caso de estudo analisado, foi possível verificar que o uso de apenas uma só abordagem pode apresentar soluções pouco satisfatórias, sendo também utilizado a metodologia ALDEP para alcançar uma melhor solução.

Com base nesta afirmação, o uso de abordagens híbridas, utilizando vários dos métodos anteriormente discutidos em conjunto, para suportar a resolução do FLP, pode ser vantajoso para certos tipos de casos onde o uso de apenas uma abordagem pode ser insuficiente para providenciar uma solução aceitável (Zha et al., 2020).

## Algoritmos Meta-Heurísticos

Ultimamente, tem surgido cada vez mais algoritmos meta-heurísticos para solucionar o FLP, como este tipo de metodologia é utilizado para obter soluções aproximadas para problemas complexos de otimização combinatória, que não podem ser eficazmente resolvidos através de outros métodos heurísticos (Pérez-Gosende et al., 2021).

Alguns exemplos destes algoritmos são:

- **Algoritmos Genéticos**
- **Pesquisa Tabu**
- ***Simulated Annealing*** (Recozimento Simulado)
- **Otimização por colónia de formigas**

Segundo Palomo-Romero et al., 2017, os métodos meta-heurísticos mais revisados pela literatura são baseados na pesquisa local, onde uma desvantagem notável é a possibilidade de o método ficar preso num local ótimo, ou seja, não solucionar a restante parte do problema. Processos de pesquisa iterativos foram implementados para contrariar este problema, no entanto, estes algoritmos podem exigir muito tempo de computação para produzir soluções suficientemente boas.

Utilizando técnicas com o apoio de inteligência artificial, como é o exemplo do recozimento simulado (*simulated annealing*) e os algoritmos genéticos, estes possibilitam a solução do FLP sem necessitar de uma solução inicial, resolvendo um dos principais problemas causados pelo uso das abordagens anteriormente descritas.

O recozimento simulado é baseada na analogia entre o recozimento de sólidos e a resolução de problemas de otimização, podendo ser visto como uma variante de uma estratégia iterativa de melhoria (Nordin & Lee, 2016). Esta metodologia pode ser aplicada a problemas com um número baixo de instalações, uma vez que a capacidade de alcançar soluções ótimas é definida pela ‘taxa de arrefecimento’. Para reduzir esta taxa, o tempo de solução terá de aumentar, tornando-se pouco viável para a solução de problemas maiores (Matai, 2015).

O algoritmo genético é um algoritmo de pesquisa probabilística baseado na seleção e genética natural. Dá-se início à resolução com um conjunto de indivíduos (designados de população), cada um representando uma solução viável para o problema, onde para cada geração, a aptidão de cada indivíduo é medida. Quanto mais aptos forem os indivíduos, maior é a probabilidade de ser escolhidos para a população através de um mecanismo de seleção, produzindo descendentes para a geração seguinte. Após muitas gerações, é esperado que a população criada seja mais apta que a original (Paes et al., 2017).

Segundo Islier, 1998, os algoritmos genéticos são capazes de encontrar numa pequena fração de espaço de soluções, uma boa quantidade de soluções adequadas através da pesquisa guiada, intrínseca no processo de funcionamento do algoritmo. Ainda mais, o facto de ser possível utilizar processamento em paralelo para aumentar a velocidade do processo, é uma grande vantagem comparativamente a outros métodos similares.

### 2.4.3. Abordagem estocástica

As abordagens estocásticas são métodos que produzem soluções quase-ótimas para solucionar o FLP. A simulação é um exemplo desta abordagem, nomeadamente a simulação de eventos discretos, que proporciona uma forma de análise através da criação de diversos cenários, que podem ser utilizados como suplemento a outras formas de resolução, para obter a melhor solução (Hosseini-Nasab et al., 2018).

Segundo Ferreira et al., 2011, a simulação de eventos discretos é uma ferramenta de apoio no processo de tomada de decisão, que permite a projeção e análise do desempenho de sistemas e processos complexos, podendo ser visto como o processo de construção de um modelo representativo de um sistema real e onde são realizados testes para melhor compreender o comportamento do sistema e avaliar o impacto de estratégias operacionais alternativas.

Com os recentes avanços na capacidade de computação e armazenamento de dados, estes permitem a realização de conjuntos de simulação em grande escala e estudos de sistemas progressivamente mais complexos. Esta ferramenta sendo uma metodologia de suporte omnipresente para inúmeras áreas de estudo, incluindo para a melhoria dos layouts industriais (Matkovic et al., 2015).

A simulação de eventos discretos permite modelar a natureza estocástica de um dado processo, onde certas variáveis podem ser dados como aleatórias ou seguindo distribuições probabilísticas. Isto sendo uma vantagem clara para o uso desta metodologia em casos reais, por exemplo, para o FLP, parâmetros como os tempos de chegada dos materiais ou o tempo de realização de uma tarefa pode seguir um valor indeterminável (Viteri-Viteri et al., 2021).

A visualização pode ser utilizada na validação e compreensão do modelo de simulação, sendo uma ferramenta importante para interpretar qualquer tipo de dados e para auxiliar as tomadas de decisão do sistema (Lather & Messner, 2018). Algumas das técnicas de visualização utilizadas no contexto da simulação de eventos discretos incluem a animação, gráficos temporais dos resultados, gráficos comerciais, ou gráficos de indicadores de desempenho, sendo parte da análise tradicional dos resultados de simulações (Feldkamp et al., 2016).

O uso da simulação em conjunto com outros métodos de solução, por exemplo com os métodos matemáticos, tem surgido cada vez mais na literatura, onde a simulação apresenta uma utilidade única e indiscreta para auxiliar na validação e verificação de diferentes soluções apresentadas (Turner et al., 2016).

Segundo Montevechi et al., 2015, as principais etapas que constituem um projeto de simulação passam pela:

- 1) Formulação do problema;
- 2) Construção e validação do modelo conceptual;
- 3) Recolha e modelação dos dados de entrada;
- 4) Construção, verificação e validação do modelo computacional;
- 5) Conceção, realização e análise de testes;
- 6) Apresentação dos resultados e implementação da solução proposta.

Diversos métodos foram desenvolvidos para simplificar e garantir a correta aplicação da simulação para a resolução dos mais diversos problemas. Um exemplo desta abordagem foi realizado por Law (2019), exposto na figura 8.

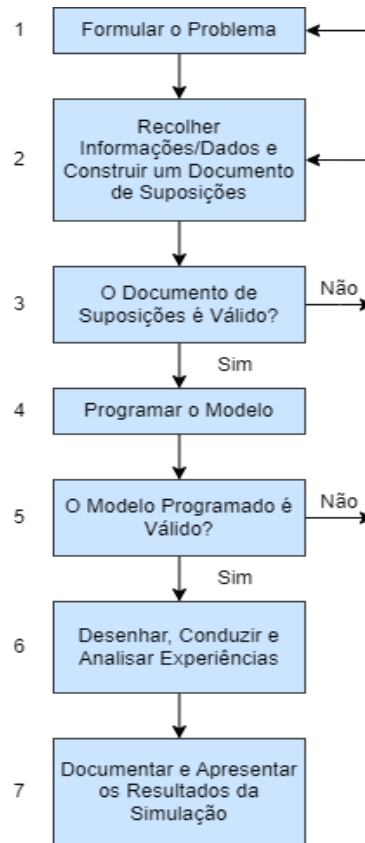


Figura 8 - Abordagem para implementação de um estudo de simulação (adaptado de: Law, 2019)

## 2.5. Contributos da Indústria 4.0 para a melhoria de layouts

A Indústria 4.0 é considerada a nova revolução industrial do século XXI, onde a implementação de novas tecnologias de informação e comunicação, como a Internet das Coisas (IoT), *Big Data*, sistemas ciber-físicos e fabrico inteligente, possibilitam a criação de sistemas de automação integrada, não só para a conceção dos sistemas produtivos, como também na operação e otimização destes sistemas (Choi et al., 2015).

Segundo Alpala et al., 2018, os novos layouts industriais no contexto da Indústria 4.0 devem ser modulares, flexíveis, e a configuração dos sistemas produtivos tem de ser adaptáveis a mudanças em tempo real sem incorrer em custos adicionais, de forma a cumprir com as exigências atuais na indústria.

O uso de ferramentas computacionais torna-se cada vez mais uma necessidade para as empresas que queiram implementar uma abordagem da Indústria 4.0, especialmente durante as fases iniciais do projeto do layout industrial e dos sistemas de produção. Três tipos ferramentas de software especializadas são utilizadas para alcançar este fim, nomeadamente as ferramentas CAD (*Computer Aided Design*), os sistemas de informação ligados a ferramentas

informáticas colaborativas na nuvem, e a aplicação da simulação para otimização do processo de produção (Dias et al., 2014; Vik et al., 2010).

Segundo Gong et al., 2019, muitos aspetos ligados à Indústria 4.0, designadamente *Big Data*, sistemas ciber-físicos e a Internet das Coisas aplicado ao contexto industrial podem ser utilizados e integrados no processo de conceção para alcançar um layout sustentável.

A tecnologia de *Big Data* é especialmente importante para resolver problemas do mundo real, em particular, os relacionados com a indústria e computação inteligente, uma vez que os dados a serem analisados são de vasta dimensão e requerem um longo tempo de processamento (Tayal et al., 2020). Ao utilizar esta tecnologia, esta torna o processo de resolução do FLP mais eficaz e fiável, com a finalidade de reduzir os tempos de produção e aumentar a exatidão e precisão do sistema produtivo, sendo capaz de lidar com a grande escala de dados utilizados para este processo (Kumar et al., 2018).

## 2.6. Perspetivas futuras

No ambiente industrial atual, considerando todos os fatores anteriormente referidos, como é o caso do aumento da competitividade, necessidade de inovar e criar processos flexíveis e adaptáveis às mudanças dos requisitos no mercado e a tentativa da melhoria e otimização contínua dos processos produtivos de forma a reduzir os custos de fabrico, torna a procura de ferramentas e metodologias inovadoras um ponto extremamente importante para combater estes problemas e auxiliar as empresas a alcançar a melhoria contínua.

No que toca à otimização dos layouts industriais, as metodologias de resolução deste problema continuam a ser amplamente abordados pela literatura, onde cada vez mais encontram-se formas inovadoras de resolver este problema, ou mesmo propostas de melhorias para métodos anteriormente utilizados.

Segundo S. P. Singh & Sharma, 2006, o uso da inteligência artificial e métodos meta-heurísticos tem demonstrado cada vez mais utilidade na resolução do FLP de grandes dimensões, à parte dos métodos heurísticos clássicos utilizados no passado. Como o tamanho do problema é diretamente correlacionado com o tempo de processamento computacional utilizado para a resolução do problema, estes métodos aproximados demonstram uma aplicabilidade mais atrativa em casos reais, apresentando soluções suficientemente boas (Vitayasak et al., 2017).

De acordo com (Hosseini-Nasab et al., 2018), um dos objetivos mais comuns nos modelos de resolução do FLP é a minimização dos custos de manuseamento de materiais, entre outros fatores quantitativos, e estes são habitualmente utilizados como fator decisivo para a viabilidade do resultado obtido. No entanto, fatores qualitativos como a segurança no chão de fábrica, flexibilidade do layout e interação entre as instalações devem ser considerados para a criação de novos layouts.

## Revisão Bibliográfica

Em relação à simulação, esta tem sido uma tecnologia de extrema importância para melhorar os projetos e soluções dos layouts. Isto pode ser verificado pela figura 9, através da revisão da literatura realizado por Al-Zubaidi et al. (2021). O mesmo autor indica que o uso de tecnologias facilitadoras, como a simulação, possibilita a obtenção de layouts mais viáveis, robustos, sustentáveis e compreensíveis, especialmente incluindo elementos da Indústria 4.0, sendo esta uma das razões para a contínua tendência crescente do uso da simulação nesta área.

Documents by year Up to April/2020

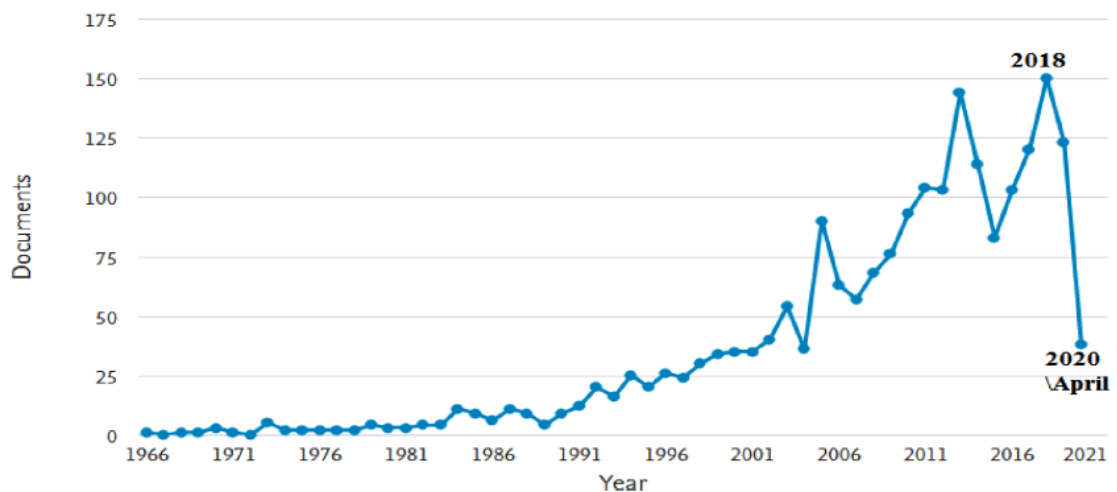


Figura 9 - Tendência da integração da simulação em estudos sobre layouts industriais (Al-Zubaidi et al., 2021)

## 3. Análise e Melhoria de uma Linha de Produção

Neste capítulo é feita a descrição da linha de produção em estudo, sendo realizada a contextualização da mesma, processos realizados e equipamentos produzidos. A seguir é apresentado o estudo realizado à linha, incluindo os dados temporais recolhidos. Para facilitar a análise destes dados, foram utilizados as ferramentas da simulação e mapeamento do fluxo de valores, que possibilitaram a identificação de problemas presentes nos diversos processos. Posteriormente, serão discutidas as várias iniciativas de melhoria propostas para implementação, de modo a combater os problemas identificados.

### 3.1. Descrição da Linha de Produção *Conveyors*

A linha de produção escolhida para análise e posterior implementação de melhorias foi a dos *conveyors*, ou transportadores. Durante o decorrer desta dissertação, estes equipamentos produzidos na linha de produção fazem parte de um projeto para um cliente do grupo, com um standard próprio e características diferentes aos equipamentos geralmente montados pela Körber Supply Chain PT. Apesar das diferenças serem visíveis, não existem diferenças significativas no funcionamento e processo geral da montagem dos equipamentos. Nas figuras 10 e 11 estão demonstrados exemplos de CCV e RCV em questão.

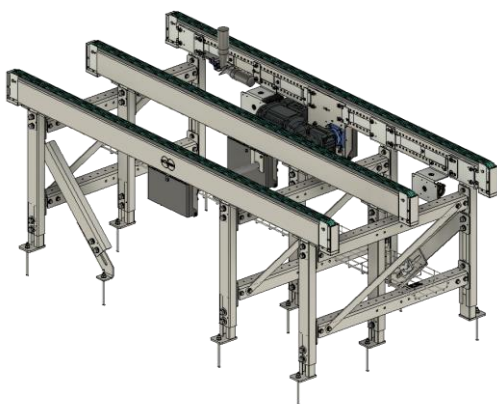


Figura 10 – Exemplo CCV montado durante este projeto



Figura 11 – Exemplo RCV montado durante este projeto

## Análise e Melhoria de uma Linha de Produção

Inicialmente, estes equipamentos eram montados num layout em célula, ou seja, um grupo de dois funcionários em cada posto de trabalho eram responsáveis pela montagem do início ao fim do equipamento. Desde o ano passado foi implementado o conceito de linha, onde o fluxo de materiais e equipamentos segue de posto a posto até à montagem do equipamento ser finalizado. Na figura 12 o layout da linha é demonstrado.

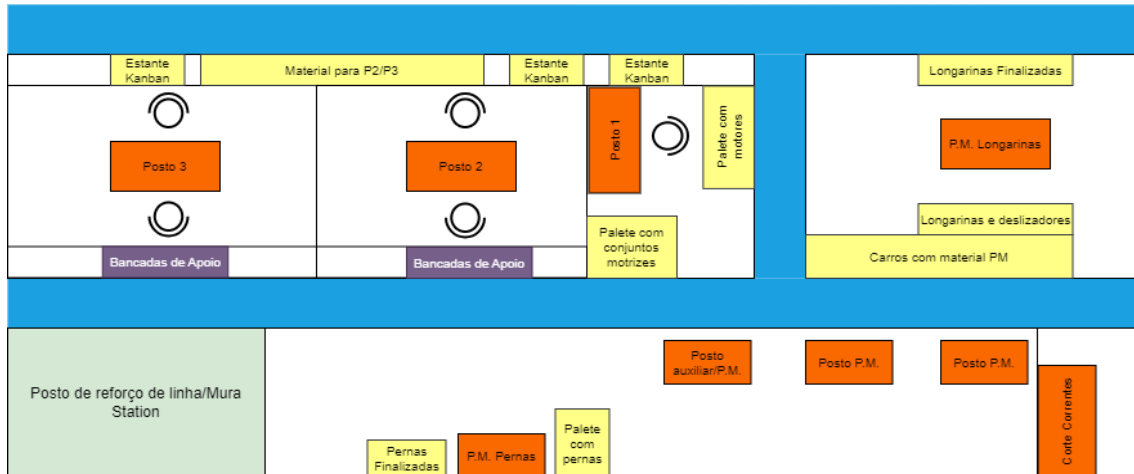


Figura 12 - Layout inicial da linha de produção Conveyors

As zonas designadas a laranja são áreas utilizadas para a realização de tarefas, enquanto as zonas a amarelo são destacadas para material consumível ou finalizado. Existem corredores a separar as várias áreas da linha (em azul), que facilitam o abastecimento e manuseamento de materiais pela linha. Ainda existe uma zona de eletrificação e testes dos equipamentos a seguir ao posto 3, no entanto esta zona não será considerada para o estudo da linha, já que esta atividade apesar de necessária, é realizada pela equipa da qualidade e testes e não faz parte do processo produtivo e montagem dos equipamentos.

Para melhor compreender e simplificar as várias etapas do processo de montagem destes equipamentos e os respetivos postos onde são realizadas estas atividades, é necessário fazer um estudo compreensivo e mapeamento dos processos em questão. Nas figuras 13 e 14 estão representados os fluxogramas dos respetivos processos produtivos para CCV's e RCV's, respetivamente. Para a maioria dos processos de montagem, estes são feitos através de ligações aparafusadas, sendo os funcionários da equipa mecânica responsáveis pelo processo de início ao fim da montagem destes conjuntos e componentes.

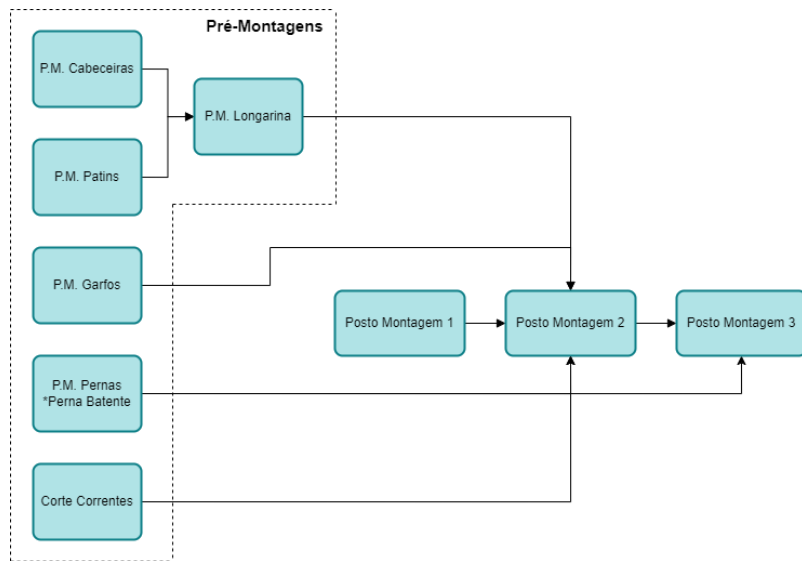


Figura 13 - Fluxograma processo de montagem CCV

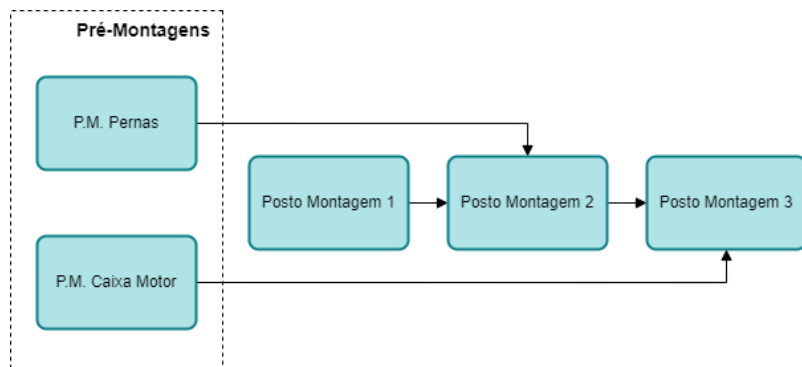


Figura 14 - Fluxograma processo de montagem RCV

### 3.1.1. Pré-Montagens

Ambos os equipamentos requerem a realização de atividades preliminares, consideradas 'pré-montagens'. Como não existem precedentes nestes processos de pré-montagens, estes conjuntos são habitualmente montados antes de se dar início às montagens dos equipamentos finais, acompanhando o ritmo de produção e criando um buffer de modo a combater faltas de material e sobrecarga de trabalho nos processos mais demorosos. Estes processos incluem a montagem de conjuntos que serão utilizados nos posteriores postos de montagem, ou até para outras pré-montagens, como é o caso das longarinas. É evidente que, pela natureza complexa do equipamento, os CCV's requerem mais destas atividades para realizar a montagem completa do equipamento comparativamente com os RCV's, onde grande parte do processo de montagem é feito nos postos 2 e 3. Estas pré-montagens são realizadas em bancadas de trabalho, como pode ser visto na figura 15.



Figura 15 - Bancadas de trabalho para pré-montagens

Relativamente aos CCV's, as pré-montagens realizadas incluem a montagem das cabeceiras, patins, longarinas, garfos, pernas (quadro, central e batente) e corte das correntes. Para efetuar a montagem completa de um equipamento, são necessárias as quantidades de cada conjunto demonstrado na tabela 3.

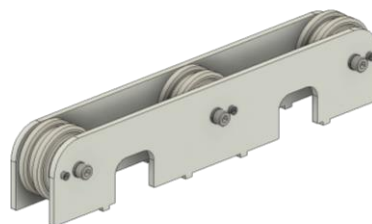
Tabela 3 - Quantidades de conjuntos pré-montagem por CCV

Conjunto	Quantidade
Cabeceira	6 por CCV (2 por longarina)
Patim	3 por CCV (1 por longarina)
Longarina	3 por CCV
Garfo	3 por CCV
Perna Quadro	3 por CCV
Perna Central	3 por CCV
Perna Batente	2 por CCV
Corrente	3 por CCV

Os conjuntos das cabeceiras e patins são montados e guardados nos carros Kit que abastecem a linha, para consumo no posto de pré-montagem da longarina. O aspeto final destes conjuntos podem ser vistos nas figuras 16 e 17. Estes conjuntos servem para guiar e garantir o correto posicionamento das correntes ao longo da longarina.

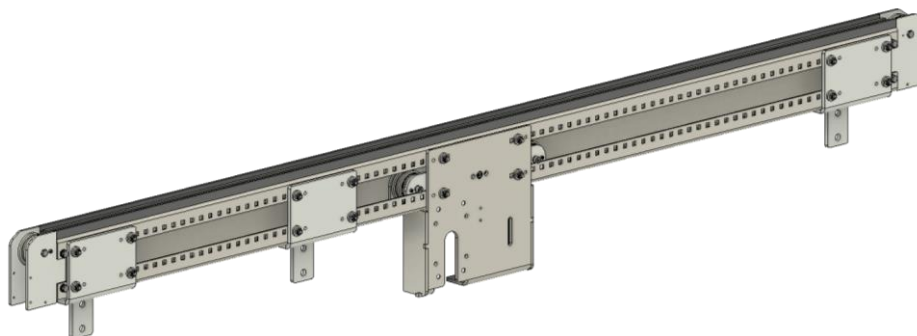


*Figura 16 - Conjunto Cabeceira*



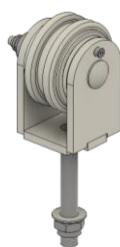
*Figura 17 - Conjunto Patim*

Para as longarinas, como pode ser visto na figura 18, à parte dos conjuntos mencionados acima, ainda se inclui na montagem o deslizador (em cima), os suportes para as pernas e a caixa para o motor. Neste projeto, a grande maioria dos CCV's tem três longarinas, sendo que para cada modelo específico e em que posição se encontram no equipamento, a disposição dos suportes para as pernas na longarina podem alterar. O conjunto finalizado é subsequentemente colocado numa estante cantiléver para facilitar o transporte para o posto 2 onde será utilizado.



*Figura 18 - Conjunto Longarina*

Os garfos têm como principal função o correto tensionamento da corrente, podendo ser ajustado e apertado dentro da caixa do motor. Na figura 19 está representado o aspeto final deste conjunto.



*Figura 19 - Conjunto Garfo*

Em relação às pernas, nomeadamente a perna quadro, existe o posto próprio onde é feita a montagem (ver figura 20), em conjunto com um gabari que garante o correto posicionamento e esquadria da estrutura (ver figura 21). Como é possível ver na figura 22, a estrutura é aparafusada, sendo necessário garantir a correta colocação dos componentes nas cotas exigidas, de forma a evitar problemas de esquadria quando o equipamento é posteriormente montado.



Figura 20 - Posto P.M. Pernas



Figura 21 - Gabari para montagem da perna quadro



Figura 22 - Conjunto Perna Quadro

As pernas centrais e batentes, representadas pelas figuras 23 e 24 respectivamente, são montadas em bancadas, seja no posto das pernas ou no posto auxiliar. Estes conjuntos são colocados nos carros Kit para depois serem consumidos conforme preciso. Em relação à perna batente, esta é montada no posto 3, ao contrário dos outros conjuntos.

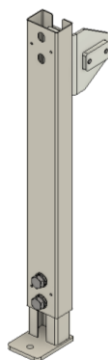


Figura 23 - Conjunto Perna Central

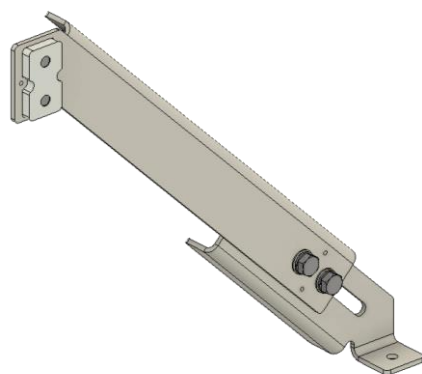
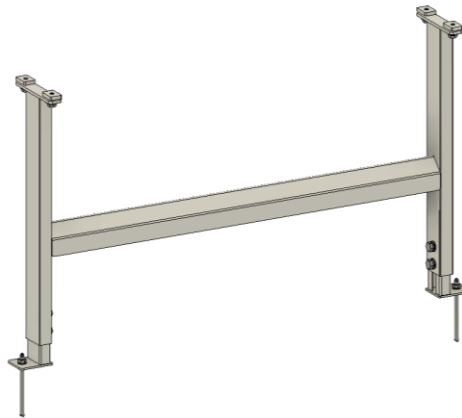


Figura 24 - Conjunto Perna Batente

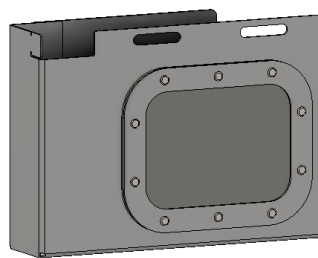
As correntes normalmente vêm em grandes quantidades (bobines de 5 metros), sendo necessário fazer o corte correto para a dimensão do determinado transportador a ser montado. Esta atividade tem o seu próprio posto onde é realizado esta tarefa.

Em relação aos RCV's, a principal pré-montagem realizada é a das pernas, onde o conjunto é montado no posto das PM Pernas, sendo colocado no chão ao lado do posto de trabalho quando estiver finalizado. Na figura 25 é demonstrado o conjunto da perna para este tipo de equipamento. A estrutura da perna é uniforme e soldada, sendo apenas necessário colocar os pés e placas de suporte à estrutura no topo. São utilizados dois conjuntos de pernas por RCV.



*Figura 25 - Conjunto Perna RCV*

Também foi considerada pré-montagem a montagem da caixa do motor (ver figura 26), apesar de este ser um processo pouco demoroso e de fácil execução (apenas rebitar a janela de plástico à estrutura), é necessário fazer a montagem deste conjunto para ser utilizado no posto de montagem 3. Cada RCV utiliza um destes conjuntos na sua montagem.



*Figura 26 - Conjunto Caixa Motor RCV*

Estas pré-montagens são fulcrais para a correta montagem dos equipamentos e funcionamento da linha em questão, sendo essencial manter rotinas de controlo de produção e qualidade destes conjuntos, para que problemas futuros possam ser evitados na montagem do equipamento final.

### 3.1.2. Montagem do Conjunto Motriz (Posto 1)

No posto de montagem 1, é efetuada a montagem dos conjuntos motrizes para ambos os equipamentos. Este posto encontra-se diretamente antes do posto 2 no layout, já que serão lá utilizados e de forma a reduzir movimentações e facilitar o transporte do conjunto para quando for montado no equipamento. A montagem de ambos os conjuntos são feitos em cima de uma bancada de trabalho, onde os conjuntos finalizados são pousados em palete de forma a criar um buffer.

O conjunto motriz utilizado nos CCV's pode ser visto na figura 27. Para completar a montagem deste conjunto, passa por colocar o veio no motor, encaixar as chavetas, pinhões e chumaceiras no veio, e aparafusar o apoio do motor. O alinhamento dos pinhões tem de estar à cota exigida no desenho do conjunto, de forma a evitar o desalinhamento entre os pinhões e o percurso das correntes do transportador.

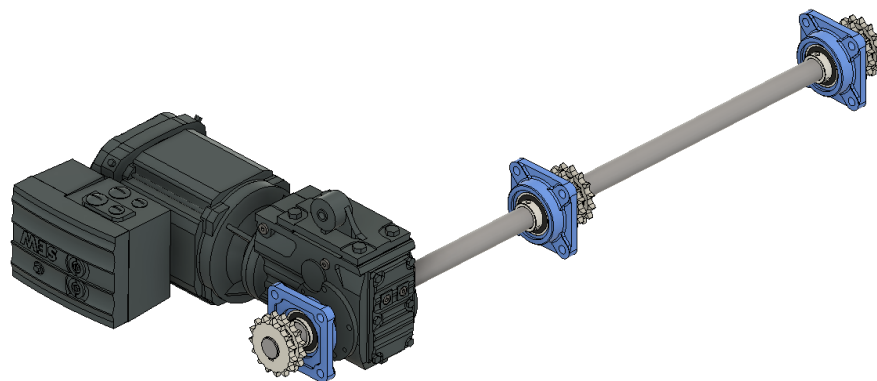


Figura 27 - Conjunto Motriz CCV

Na figura 28 está representado o conjunto motriz para RCV's. Neste caso existe uma barra de suporte transversal que é aparafusada a ambas as longarinas do equipamento. O motor é montado à placa de apoio, que permite fazer ajustes verticais para melhor encaixar e alinhar o motor à corrente quando este é montado no equipamento. Nos RCV's, apenas existe um pinhão ligado diretamente ao veio que irá dar movimento ao equipamento.

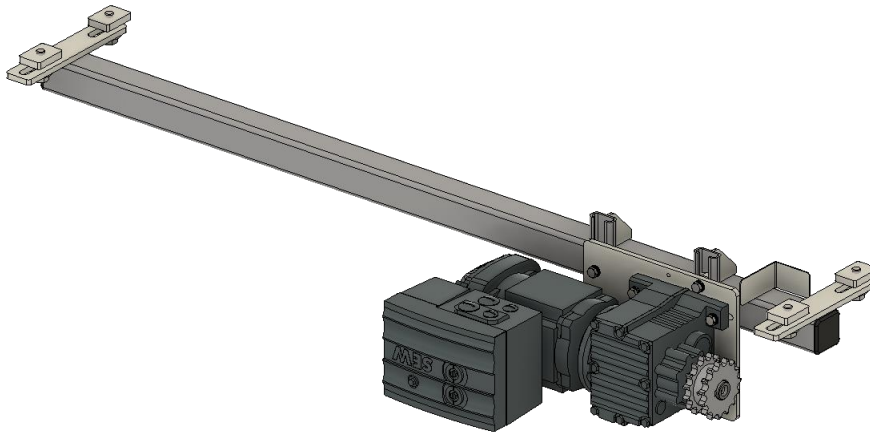


Figura 28 - Conjunto Motriz RCV

Os ajustes e posicionamentos referidos anteriormente são todos feitos à mão pelo funcionário, isto pode levar a pequenas imperfeições no que toca à montagem destes conjuntos, que serão retificados conforme o equipamento final é montado nos posteriores postos de montagem.

### 3.1.3. Montagem da Estrutura (Posto 2)

A montagem da estrutura do equipamento é realizada no posto 2, onde os elementos principais do equipamento serão montados dando início aos processos complexos de montagem destes equipamentos. É necessário ter dois funcionários constantemente presentes no posto para realizar as tarefas, já que estas incluem movimentações de cargas pesadas, processos demorosos e atividades cujo uma pessoa é incapaz de fazer sozinha. A área destinada a este posto de trabalho pode ser vista na figura 29, e como o layout indica, existe um corredor que permite o abastecimento do material necessário para a montagem do equipamento, uma estante *Kanban* para parafusos utilizados neste posto e uma zona destinada à montagem do equipamento. A montagem é feita no chão ou em cavaletes, podendo ser necessário passar o equipamento de uma posição para outra para facilitar a realização de certas tarefas durante o processo.

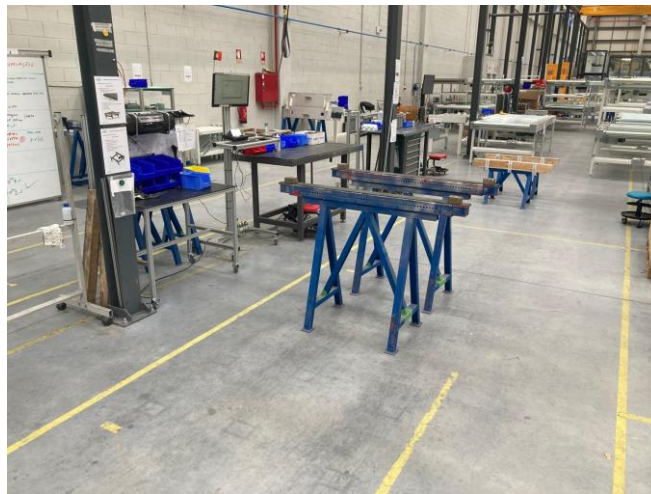


Figura 29 - Área designada para o Posto 2

Para os CCV's, o processo de montagem é definido pelas principais etapas descritas na figura 30.

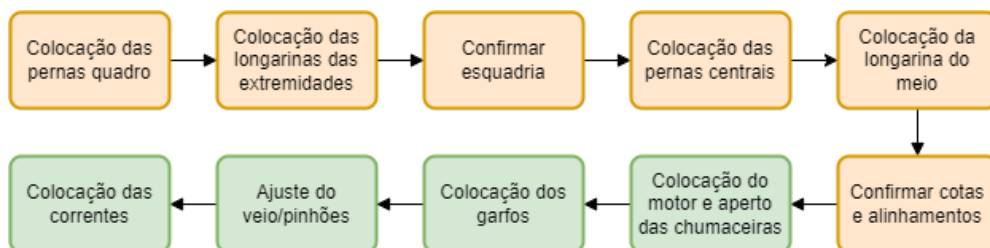


Figura 30 - Processo Montagem Posto 2 CCV

As etapas destacadas a laranja são efetuadas no chão. Depois, o equipamento é elevado, através do uso de uma ponte rolante, e colocado em cavaletes para serem realizadas as tarefas a verde. É necessário fazer esta transição para facilitar o acesso na colocação do motor por debaixo do equipamento, garantir o nivelamento das longarinas e possibilitar uma posição mais ergonómica de trabalho para os colaboradores. Neste caso, as etapas seguem um fluxo sequencial já que para efetuar o passo seguinte, é necessário ter o passo anterior concluído, isto também se aplica em grande parte aos processos de montagem dos RCV's. Garantir a correta esquadria foi historicamente um ponto de fraqueza no que toca à montagem deste equipamento, sejam por defeitos e falta de qualidade da matéria-prima, ou pela dificuldade em manter o alinhamento correto desta estrutura aparafusada. Por esse motivo, torna-se fulcral garantir o mais assertivo posicionamento da estrutura e correta montagem dos conjuntos base deste equipamento, como é o caso para o conjunto perna quadro e longarina. O aspeto final do CCV após ser feita a montagem neste posto pode ser vista na figura 31.

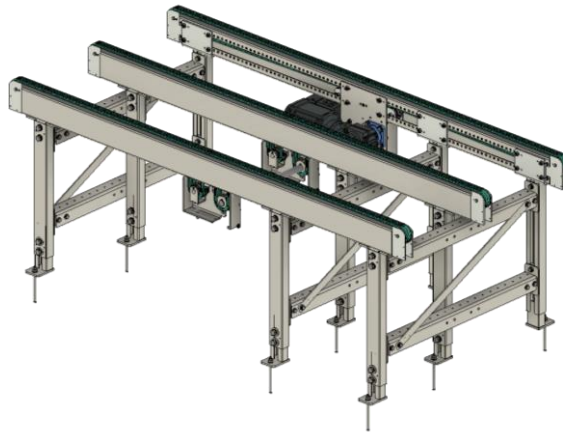


Figura 31 - Aspeto final do CCV à saída do posto 2

Em relação aos RCV's, estes seguem um fluxo de processo descrito na figura 32.

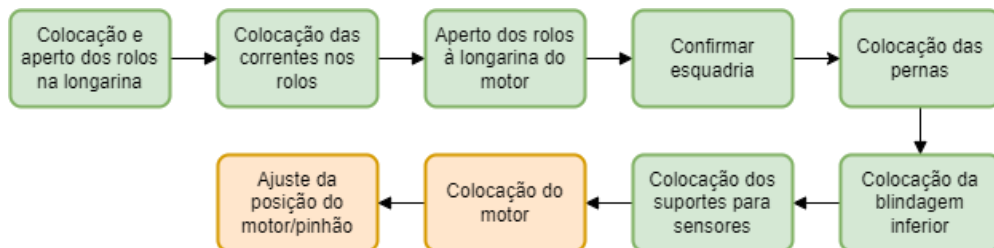


Figura 32 - Processo Montagem Posto 2 RCV

Ao contrário da montagem dos CCV's, a montagem deste equipamento é iniciada em cima de cavaletes, já que a estrutura de topo (rolos e longarinas) é a primeira a ser assemblada, e apenas é pousado no chão quando for colocado o conjunto motriz no equipamento. Um passo que é importante realçar é o ajuste do motor e do pinhão, já que pela forma que este conjunto é desenhado, torna-se difícil ter tanto o motor como o pinhão diretamente alinhados e nivelados quando são montados no equipamento. Caso este alinhamento esteja incorreto, pode causar ruídos nas correntes e mau funcionamento do equipamento, sendo necessário gastar tempo considerável a ajustar estes componentes. O aspeto final do equipamento a sair deste posto está representado na figura 33.



Figura 33 - Aspeto final do RCV à saída do posto 2

### **3.1.4. Fecho do Equipamento (Posto 3)**

No posto 3 é realizado o fecho dos equipamentos, ou seja, serão colocados os conjuntos e componentes finais para que os equipamentos estejam mecanicamente finalizados. Este processo geralmente inclui a montagem dos suportes elétricos, blindagens, tampas, caixas do motor, entre outros. Este passo é realizado na área designada para este posto, idêntico à zona do posto 2, incluindo uma estante *Kanban* para parafusos utilizados, e área para material consumível deste posto.

O que distingue esta montagem final de um equipamento para o outro é principalmente o número de componentes que são montados neste posto, onde os CCV's requerem inúmeras pequenas blindagens para fechar o equipamento, todas elas aparafusadas. Os RCV's têm blindagens que fazem o completo fecho do equipamento, facilitando assim a realização desta tarefa.

O aspeto final da montagem destes equipamentos pode ser visto nas figuras 10 e 11 anteriormente demonstradas.

## **3.2. Estudo da Linha de Produção *Conveyors***

Após a apresentação e contextualização dos produtos e processos realizados na linha dos *conveyors*, um estudo detalhado das diferentes etapas de cada processo foi feito com o âmbito de melhor compreender e quantificar os tempos de produção para cada atividade. Durante o decorrer deste estudo, não só foram recolhidos os tempos produtivos, como também os tempos dedicados a outras atividades que ocorrem durante o processo, como movimentações, retrabalhos, preparações e interrupções. Estes dados serão utilizados para criar um VSM para cada processo produtivo e um modelo de simulação da linha de produção inicial para auxiliar na identificação de problemas e possíveis pontos de melhoria ao processo.

### **3.2.1. Levantamento de dados**

Os dados utilizados para o estudo dos processos foram recolhidos durante um período de seis semanas, neste caso sendo de abril a meados de maio de 2024. Como não existem dados históricos para a produção destes equipamentos específicos, este estudo serve de base para a definição dos tempos de ciclo para cada posto de trabalho e posterior aplicação no modelo de simulação realizado para análise da linha, sendo consistente para os seguintes meses de produção. Tendo em conta o grande número de processos a serem analisados, altos tempos de produção de certas atividades e limitações horárias, foram angariados o maior número de amostras exequíveis, com o intuito de representar o funcionamento da linha de forma mais realista possível.

Posto isto, os dados obtidos podem ser observados na tabela 4, onde os valores temporais são uma média das diferentes amostras recolhidas.

Tabela 4 - Tempos retirados do estudo da linha Conveyors

Equipamento	Processo	Tempos								
		Produção	Retrabalho	Material	Preparação	Interrupção	Ajustes	Ferramenta	Espera	Total
CCV	Cabeceira	02:34	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	<b>02:34</b>
	Patim	04:43	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	<b>04:43</b>
	Garfo	02:01	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	<b>02:01</b>
	Corrente	04:26	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	<b>04:26</b>
	Perna Quadro	11:01	03:58	01:23	03:52	04:31	00:42	00:10	N/A	<b>25:37</b>
	Perna Central	02:15	00:00	00:08	00:22	00:15	00:00	00:04	N/A	<b>03:04</b>
	Perna Batente	02:25	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	<b>02:25</b>
	PM Longarina	13:04	01:07	01:36	01:13	01:16	00:06	00:00	N/A	<b>18:22</b>
	Posto 1	06:47	06:04	02:19	01:39	03:18	00:00	00:30	N/A	<b>20:37</b>
	Posto 2	37:51	00:13	07:00	08:04	08:51	16:40	01:15	02:38	<b>01:22:30</b>
	Posto 3	35:55	00:00	04:46	22:02	04:30	01:22	00:00	N/A	<b>01:08:35</b>
RCV	Caixa Motor	00:56	00:43	00:07	01:00	00:03	00:00	00:00	N/A	<b>02:49</b>
	PM Pernas	03:14	00:54	00:55	01:38	00:46	00:12	00:00	N/A	<b>07:39</b>
	Posto 1	10:01	07:39	01:16	03:00	02:35	00:30	00:27	N/A	<b>25:29</b>
	Posto 2	18:56	03:30	02:37	02:58	28:14	12:51	00:34	02:03	<b>01:11:43</b>
	Posto 3	25:41	00:36	03:06	02:30	05:54	00:33	00:29	N/A	<b>38:48</b>

Como referido anteriormente, para os processos considerados mais críticos, foram também captados os tempos dedicados a outras atividades fora aquelas consideradas 'produtivas', ou de valor acrescentado ao processo. Estas atividades incluem:

- Retrabalho – Tempo dedicado ao retrabalho de peças ou conjuntos, seja por defeitos da matéria-prima (pintura, deformações, dimensionamento incorreto, etc...), ou por erros na montagem;
- Material – Tempo perdido em movimentações provocadas pela procura e recolha de material durante o processo de montagem;
- Preparação – Tempo dedicado à preparação de componentes ou material para ser possível realizar as tarefas de montagem (parafusagem, peças, etc...);
- Interrupção – Tempo perdido causado por interrupções durante o processo de montagem (pausas, ajudar noutros postos de trabalho, etc...);

## Análise e Melhoria de uma Linha de Produção

- Ajustes – Atividades onde é necessário realizar ajuste de componentes para que fiquem às especificações exigidas (dimensões, esquadria, alinhamentos, etc...);
- Ferramenta – Tempo perdido à procura de ferramentas para realizar as tarefas de montagem;
- Espera – Tempo perdido à espera pelo colega de trabalho para realizar uma tarefa, aplicado apenas aos processos com mais de um operador.

Para estas atividades, o objetivo é minimizar as de valor não acrescentado, mas que são inevitáveis para o processo, e eliminar aquelas que são consideradas desperdício. Posto isto, estes tempos representam os diferentes tipos de desperdícios principais, baseados nos 7 desperdícios *Lean*, detetados durante a realização das tarefas de montagem que servirão para ajudar na deteção de pontos que podem ser abordados para melhoria.

É importante realçar nos valores temporais para interrupções, estas incluem pausas de almoço, intervalos ou outro tipo de paragens durante o recolher destes dados. No caso do posto 2 para RCV, por exemplo, estes valores somam a um tempo desperdiçado de 28 minutos, isto é dado pelo alto tempo de ciclo para este processo, por vezes sendo interrompido por tais paragens. Serão incluídos estes tempos ao tempo final de ciclo, já que no dia-a-dia, é habitual o trabalho ser interrompido por estes acontecimentos.

Juntamente com os dados recolhidos, foram criados *Value Stream Maps (VSM)* para cada tipo de produto de modo a compilar esta informação, facilitar a posterior visualização de pontos críticos, identificação de problemas, e projeção de soluções aplicáveis. Nas figuras 34 e 35 estão representados estes VSM's, que incluem os tempos de ciclo por processo, dependências e anotações dos desperdícios detetados por processo.

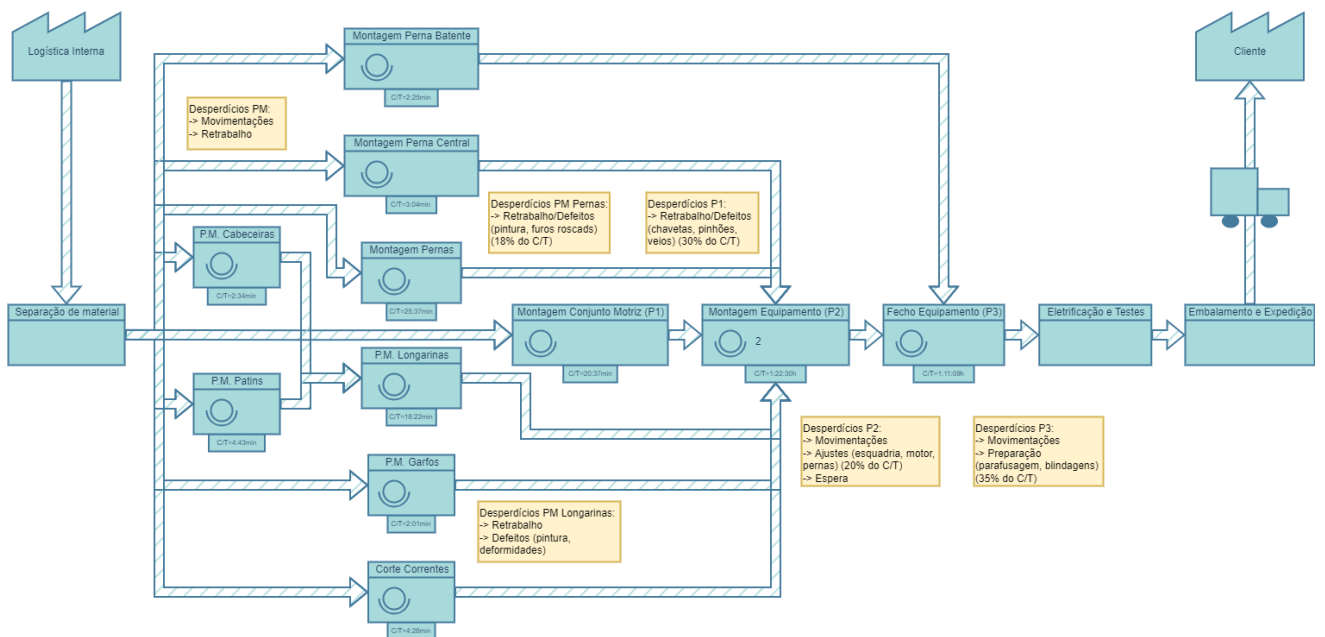


Figura 34 - VSM para CCV

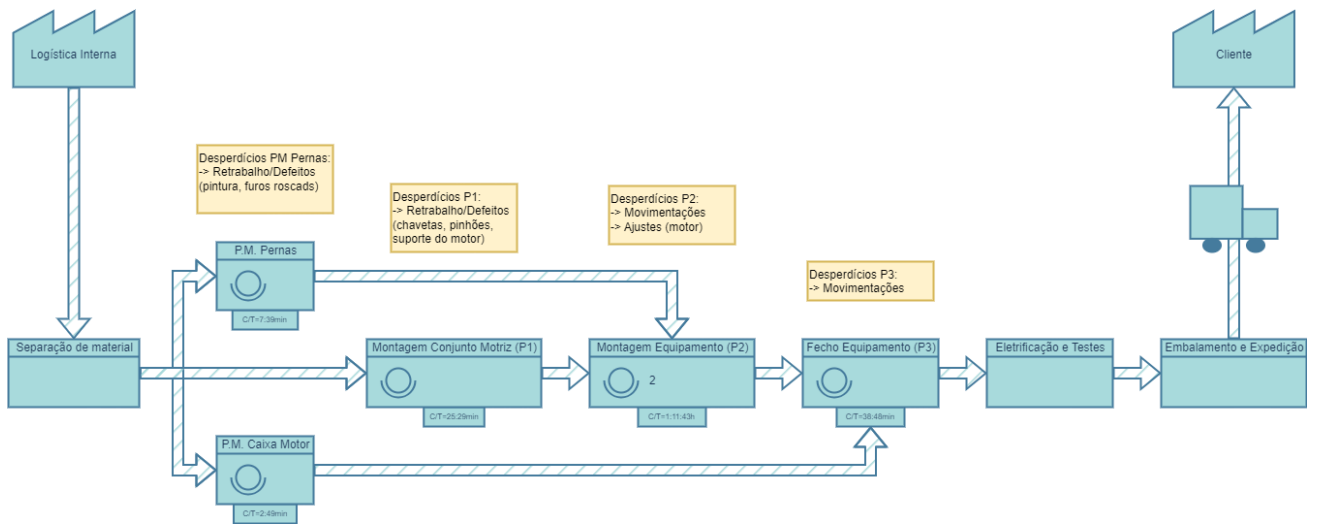


Figura 35 - VSM para RCV

É possível verificar que o posto crítico em ambos os processos é o posto de montagem do equipamento (posto 2), já que grande parte dos conjuntos precedentes serão montados neste posto, sendo também o processo mais demoroso para tanto os CCV's como RCV's. Posto isto, quaisquer alterações feitas a este posto resultarão num aumento da taxa de produção dos equipamentos, no entanto, a melhoria da cadência de produção não será o âmbito para este projeto, que será discutido a seguir.

No início deste projeto, foi determinado que o valor para o *takt time* seria de 2 horas por equipamento (CCV e RCV), considerando o prazo de entrega para a quantidade de equipamentos a montar. Sendo o pior caso a produção do CCV, onde este tem um tempo de ciclo de 1:22:30h em média, pode-se concluir que o ritmo de produção atual da linha está acima do necessário (por mais de 30 minutos) de maneira a alcançar as datas exigidas pelo cliente (ver figura 36). Este facto é considerado para as futuras implementações de melhorias, já que o processo atual já vai em conta às necessidades do cliente e por isso a diminuição dos tempos de ciclo não será o objetivo principal deste projeto.

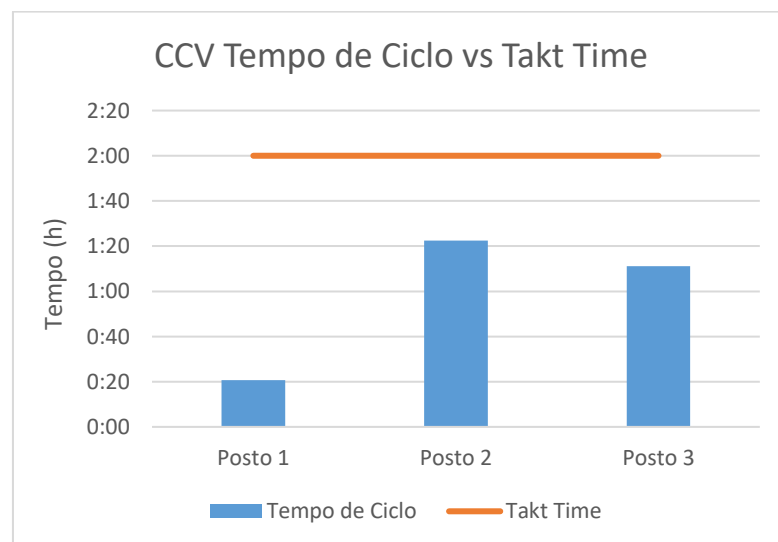


Figura 36 - Tempo de Ciclo vs Takt Time para CCV

### 3.2.2. Análise do estado inicial através da simulação

Após terem sido recolhidos os dados apresentados no capítulo anterior, estes foram utilizados para criar um modelo de simulação, tanto para os CCV's como para os RCV's. Estes modelos permitem o estudo e representação da linha de uma maneira mais intuitiva, a recolha de dados estatísticos, e ainda facilitando a identificação de pontos de gargalo e atividades críticas durante o processo. Com os modelos finalizados, será necessário fazer a posterior validação dos mesmos, garantindo que os processos retratam de forma mais próxima possível a linha de produção real.

#### Pressupostos

Para criar qualquer modelo de simulação, é necessário tomar em consideração alguns pressupostos e simplificações. Estes podem passar por atribuir valores constantes a variáveis ou excluir certos aspetos que não contribuem para o desempenho geral do sistema.

Neste caso, assumiu-se os seguintes pressupostos que podem ter impacto no desempenho final do sistema:

- Stock de matéria-prima ilimitado – Os materiais utilizados para realizar as tarefas de montagem dos vários conjuntos do equipamento terão disponibilidade ilimitada, já que a montagem para um projeto é iniciado apenas quando o material se encontra disponível na totalidade;
- Desconsidera-se peças e equipamentos defeituosos – Como o tempo de retrabalho já será considerado nos tempos de ciclo dos processos onde se encontram estas ocorrências, não serão considerados o retrabalho ou rejeição de matéria-prima ou equipamentos como passo-extra;
- Desconsidera-se a falta de recursos – Já que no sistema real grande parte dos processos podem ser realizados em paralelo e existe sempre disponibilidade de pessoas para os postos críticos, considera-se então que para todos os processos existirá sempre disponibilidade contínua de recursos para a realização das tarefas;
- Considera-se as 8 horas de trabalho por dia, sem interrupções – Como mencionado anteriormente, na recolha dos dados temporais da linha os tempos de interrupções, incluindo pausas para almoço, já foram incluídos estes tempos nos tempos de ciclo por isso desconsidera-se os horários de trabalho no modelo de simulação.

#### Modelo Computacional

O programa utilizado para a criação destes modelos computacionais foi o JaamSim. Este *software* de simulação de eventos discretos destaca-se por ser *open-source* e gratuito, incluindo funcionalidades como a integração de gráficos em 3D, uma biblioteca extensa de objetos que podem ser amplamente utilizados, e uma interface gráfica que permite a fácil aprendizagem e utilização do programa, que rivaliza outros softwares de simulação comerciais. Por estes motivos é que este software foi utilizado em contraste com outros programas mais conhecidos e usados, como por exemplo o Arena. O aspeto da interface deste programa pode ser visto na figura 37.

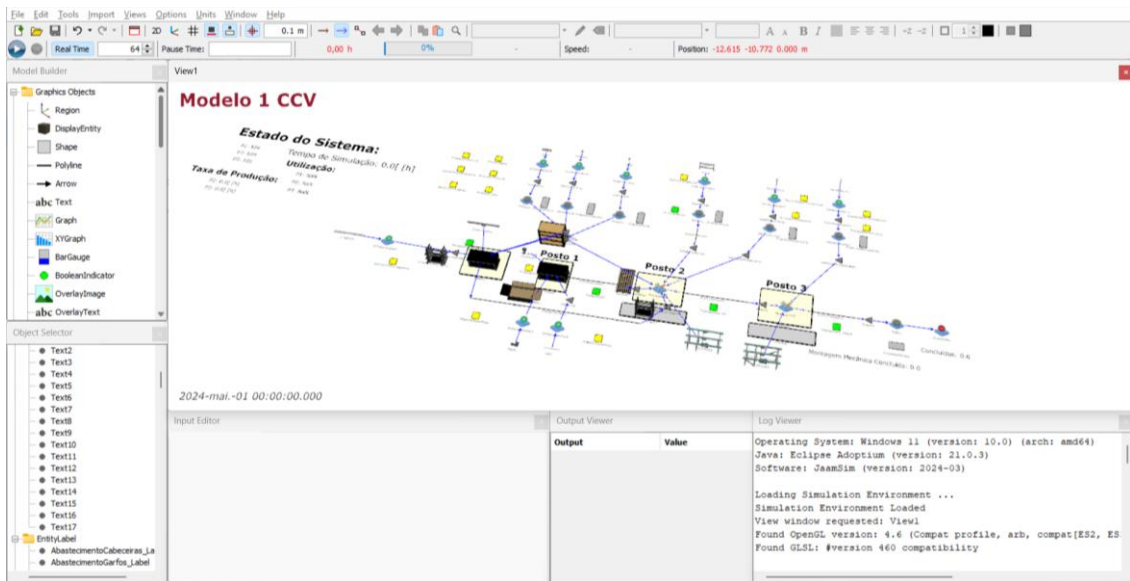


Figura 37 - Interface do software JaamSim

Nas figuras 38 e 39 estão representados os modelos de simulação criados para a linha de produção inicial de CCV's e RCV's respetivamente. No JaamSim, o modelo lógico e animado funcionam em simultâneo, sendo possível atribuir figuras em 2D ou 3D a entidades do processo ou entidades representativas (como é o caso das estantes, mesas ou cantilêver).

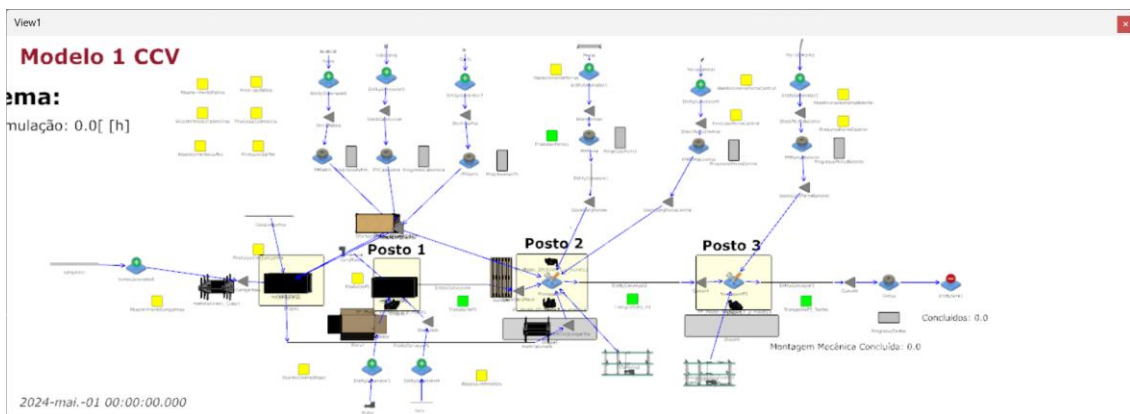


Figura 38 - Modelo inicial da linha CCV

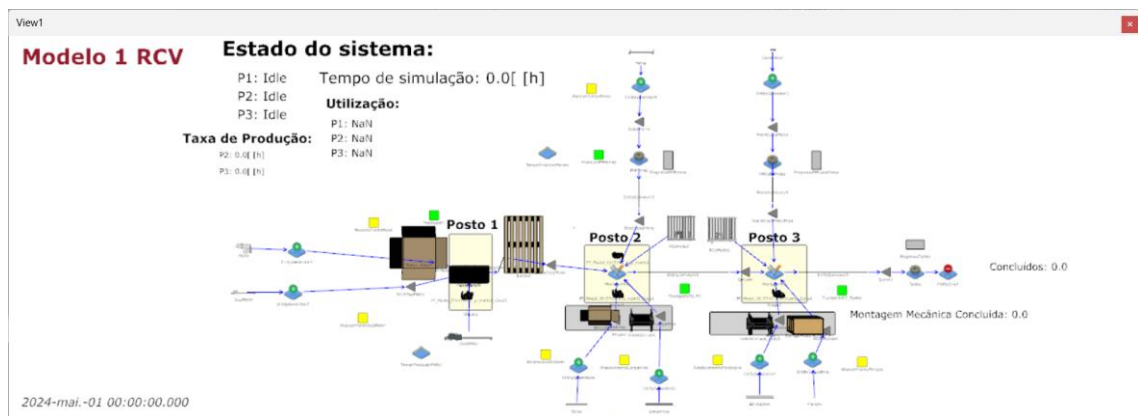


Figura 39 - Modelo inicial da linha RCV

O fluxo das entidades segue os fluxos dos respetivos processos, começando pela geração das entidades (*EntityGenerator*), passando a filas de espera (*Queue*), de seguida aos processos produtivos (*Server* ou *Assemble*), até às entidades serem retiradas do sistema (*EntitySink*). Estes objetos e a correta definição dos mesmos é fulcral para que o modelo corra conforme previsto, sendo atribuído aos parâmetros destes objetos os dados temporais levantados do estudo realizado à linha, como tempos de ciclo dos processos, tempos de transporte (através do *EntityConveyor*), entre outros.

Neste caso, os valores alocados à geração de entidades pelo *EntityGenerator* foram escolhidos de forma a minimizar a sobrecarga dos modelos, e garantir sempre a existência de material para o funcionamento da linha durante o decorrer da simulação, já que, como mencionado anteriormente, o início de um projeto é dado apenas quando todo o material necessário se encontra disponível.

Os objetos *Server* e *Assemble* são utilizados como representações dos processos da linha, onde o *Server* serve para a realização de tarefas onde não exista a junção de conjuntos precedentes (por exemplo maioria das pré-montagens), e o *Assemble* como representação dos processos de montagem dos equipamentos.

Dentro do próprio modelo, é também possível recolher inúmeros dados em tempo real, ou após a conclusão do modelo, sendo apresentado como relatório num ficheiro de texto. Na figura 40 está representado um exemplo do modelo de simulação em funcionamento, onde as células de texto são apenas utilizadas para ter uma perceção do estado do sistema.

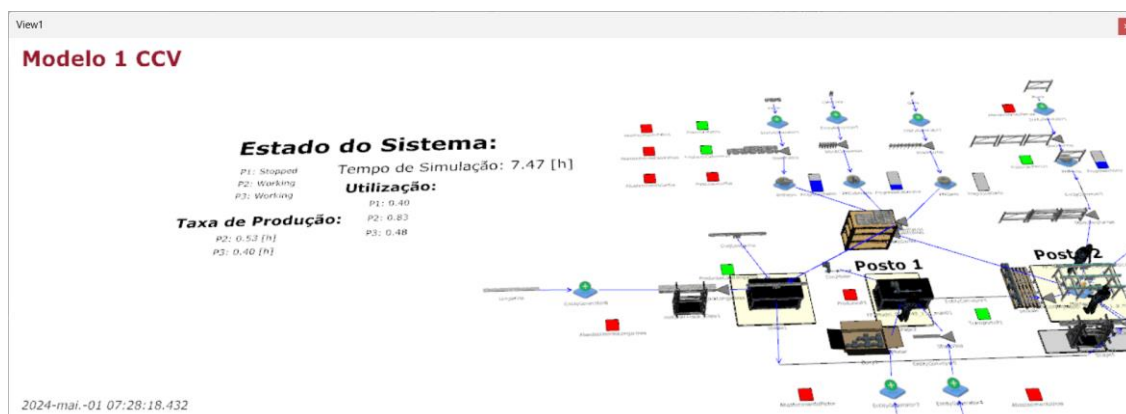


Figura 40 - Exemplo do modelo de simulação em funcionamento

Na tabela 5 estão apresentados os dados recolhidos do relatório criado pelo modelo de simulação inicial após 40 horas de produção. Estes dados incluem os tempos de funcionamento, de espera, tempos onde os processos se encontram parados (transporte dos equipamentos, stock limite atingido, etc...), como também a percentagem de utilização e entidades processadas por posto. Os processos escolhidos para análise mais aprofundada foram os postos da pré-montagem das pernas, pré-montagem das longarinas, posto 1, 2 e 3, já que estes postos consideram-se ser os mais essenciais para o processo de montagem dos CCV's, e será o ponto de partida para a posterior análise dos resultados das melhorias implementadas apresentados nos capítulos mais à frente.

Tabela 5 - Dados do modelo de simulação inicial para CCV

Processo	Tempos (h)				Utilização (%)	Entidades Processadas
	Produção	Funcionamento	Espera	Parado		
<b>PM Pernas</b>	40	40	0	0	100	93
<b>PM Longarina</b>	40	27,33	0,09	12,58	68,33	89
<b>P1</b>	40	11	0	29	27,51	32
<b>P2</b>	40	37,81	1,29	0,9	94,54	27
<b>P3</b>	40	30,41	8,73	0,87	76,02	<b>26</b>

### Validação do Modelo Computacional

Para validação dos modelos de simulação, serão utilizados dados referentes às quantidades de equipamentos finais montados ao final de uma semana de trabalho, que equivale às 40 horas de produção. Posto isto, definiu-se o tempo de duração total dos modelos para estas 40 horas, podendo assim recolher dados comparativos do sistema real e da simulação. A tabela 6 indica a quantidade de equipamentos produzidos ao final do período estipulado.

Tabela 6 - Validação dos modelos de simulação

Equipamento	Tempo de Produção (horas)	Quantidade Produzida	
		Sistema Real	Modelo de Simulação
CCV	40	24	26
RCV	40	33	31

Como se pode verificar, existe uma pequena discrepância entre os valores dos modelos de simulação e da linha de produção real. Sendo este erro cerca de 8,3% para CCV e 6,1% para RCV. Considerando o baixo volume de produção unitário destes equipamentos, isto provoca com que esta percentagem de erro seja mais expressiva e variante do que o sistema real, onde uma diferença de apenas um equipamento provoca um grande aumento neste valor. Assim sendo, pode-se assumir que os erros dos presentes modelos de simulação poderão ser desprezados, sendo válidos para o objetivo pretendido com este estudo e análise da linha através da simulação.

### 3.3. Identificação de Problemas

No decorrer do estudo realizado à linha, com o auxílio dos dados recolhidos, observações anotadas e opiniões dos colaboradores da equipa de montagem dos equipamentos, foi possível identificar diversos problemas que podem causar ineficiências nos processos produtivos, ou mesmo dificuldades sentidas na realização de certas tarefas por parte dos operadores. Estes problemas estão categoricamente distinguidos pelos diferentes processos onde ocorrem, e pelo tipo de problema considerado.

Na tabela 7 estão descritos estes problemas detetados, que incluem ineficiências na realização das tarefas de montagem, atividades de valor não acrescentado, desperdícios em certos processos, desorganização nos postos de trabalho, entre outros. Estes problemas serão posteriormente abordados de modo a ir de acordo com os objetivos definidos para este projeto, através da criação de medidas de melhoria e, se possível, implementar estas medidas na linha de produção real.

Tabela 7 - Identificação de problemas por processo

<b>Processo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Problema</b>
<b>Pré-Montagens</b>	Retrabalho da matéria-prima	Furos roscados tem de ser machedos
	Má organização da matéria-prima e material finalizado	Material tem de ser recolhido e pousado nos carros kit (sem identificação/local definido)
<b>PM Pernas</b>	Retrabalho/defeitos da matéria-prima	Pintura por vezes vem danificada, e requer nova pintura
		Furos roscados tem de ser machedos
<b>PM Longarinas</b>	Erros de montagem	Posicionamento incorreto do suporte para as pernas
	Má organização da matéria-prima e material finalizado	Material espalhado pelo posto de trabalho (sem identificação/local definido)
	Defeitos da matéria-prima	Longarinas vem danificadas (pintura, deformidades), necessitando de retrabalho ou rejeição da peça
<b>Posto 1</b>	Retrabalho da matéria-prima	Chavetas, pinhões e veios requerem retrabalho para estarem à dimensão exigida para realizar montagem
<b>Posto 2</b>	Movimentações	Tempo perdido à procura e recolha de material e parafusos (falta de identificação/local definido)
	Ajustes	Tempo dedicado para ajustar esquadria, alinhamentos do motor/pinhões, pernas e correntes
<b>Posto 3</b>	Movimentações	Tempo perdido à procura e recolha de material e parafusos (falta de identificação/local definido)
	Preparação de componentes	Tempo dedicado à preparação de peças e parafusos para realizar montagem

### 3.4. Propostas de Melhorias

As propostas de melhorias foram desenvolvidas com o objetivo de tentar combater os problemas anteriormente discutidos. Tendo sido realizado uma sessão de *brainstorming* em conjunto com os chefes das equipas da engenharia industrial e da linha dos *conveyors*, várias soluções foram propostas para abordar estes problemas detetados, sendo escolhidos os com maior impacto e probabilidade de implementação, considerando as necessidades atuais e futuras da empresa.

Certos problemas apresentados tornam-se impossíveis de resolver face à natureza complexa existente, incapacidade de projetar uma solução no curto espaço de tempo disponível para o decorrer deste projeto, entre outros motivos. Um exemplo destes problemas são os defeitos causados pela falta de qualidade dos fornecedores. Posto isto, encontra-se na tabela 8 as ações de melhoria sugeridas e implementadas assim como os respetivos problemas a que se relacionam para cada etapa dos processos produtivos.

Tabela 8 - Propostas de melhoria

Processo	Problema	Proposta de Melhoria
<b>Pré-Montagens</b>	Má organização do espaço	Gestão visual
		Mudança do layout
<b>PM Pernas</b>	Defeitos da matéria-prima	Guia de identificação de defeitos
	Erros de montagem	Criação de um guia de montagem
<b>PM Longarina</b>	Má organização do espaço	Gestão visual
		Mudança do layout
<b>Posto 2</b>	Movimentações	Gestão visual/Aplicação dos 5S's
		Mudança do layout
	Ajustes	Guia de montagem Criação de ferramenta para auxílio na montagem das correntes
<b>Posto 3</b>	Movimentações	Gestão visual/Aplicação dos 5S's
		Mudança do layout
	Preparação de componentes	Guia de montagem

### 3.4.1. Mudança do layout

Ao longo do projeto, foi possível implementar alterações ao layout da linha dos *conveyors* com base nos dados recolhidos e observações anotadas, de modo a solucionar a falta de organização de certos espaços no layout inicial e reduzir o quanto possível as movimentações consideradas desperdício durante os processos de montagem.

Estas mudanças podem ser observadas na figura 41, onde foram criadas zonas distintas para o material consumível e conjuntos finalizados das pré-montagens, e reajustou-se as zonas dos materiais para os postos 2 e 3.

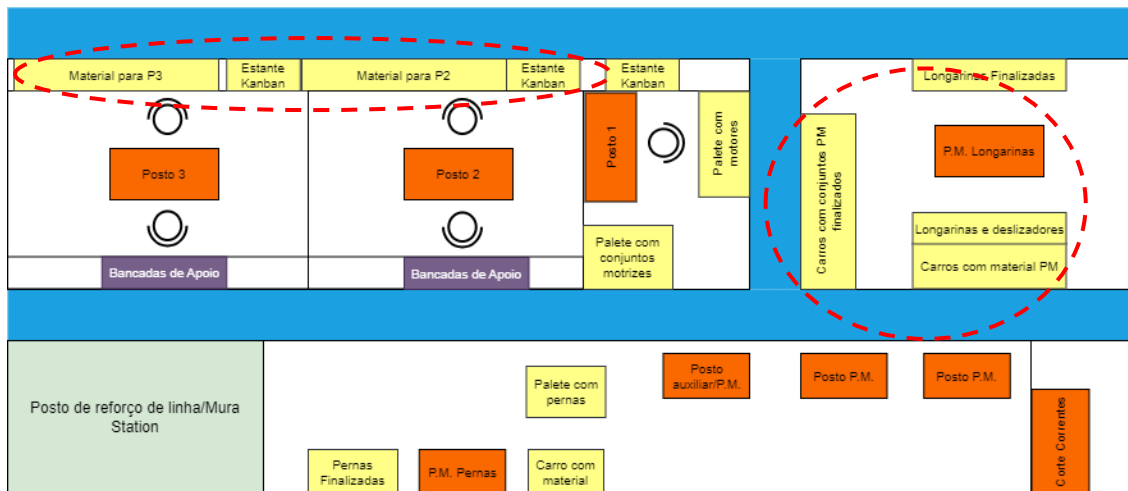


Figura 41 - Mudanças realizadas ao layout inicial

À medida que a quantidade de trabalho foi reduzindo e os projetos para clientes foram concluídos, ocorreram mudanças no layout geral da fábrica, incluindo à linha de produção dos *conveyors*. Aproveitando esta oportunidade, foi possível implementar para o novo layout as alterações já realizadas anteriormente, e possibilitou ainda a implementação de novas melhorias.

Neste contexto, as principais mudanças realizadas ao novo layout podem ser vistas na figura 42, onde foi possível alocar um espaço mais próximo do posto 2 para o conjunto das pernas finalizadas, definir áreas para material consumível e finalizado, tanto nos postos de montagem como nos de pré-montagens, colocar as estantes dos parafusos *Kanban* junto às bancadas de apoio, entre outras mudanças.

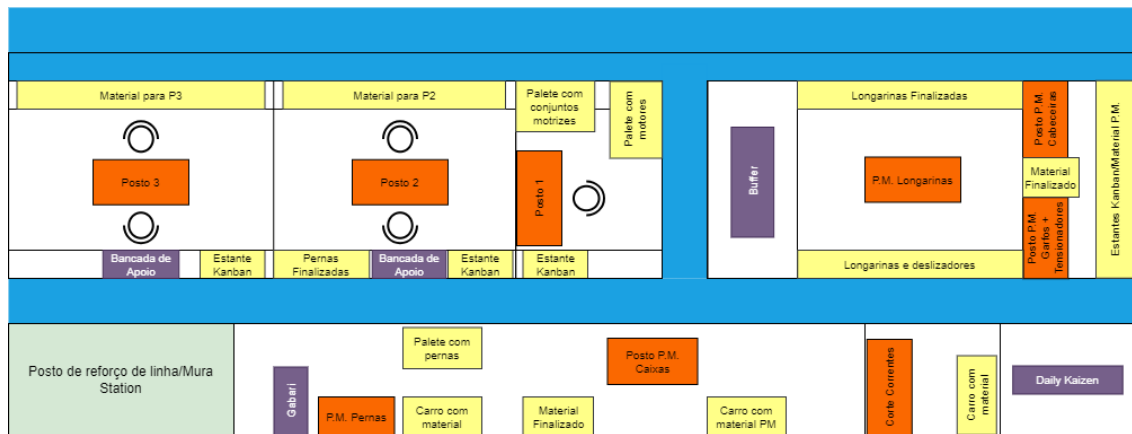


Figura 42 - Novo layout da linha

Estas alterações providenciam melhores condições de trabalho para os colaboradores, nomeadamente no que toca a movimentações de cargas pesadas, como é o caso dos conjuntos pernas para os CCV's, que chegam a pesar perto dos 25 quilogramas cada. O facto de existirem locais definidos para a colocação de material evita a desorganização e excesso de movimentações dentro dos postos de trabalho, melhorando por consequência a gestão de stocks e planeamento de produção para os processos de pré-montagens, como também a própria realização das atividades de montagem.

### 3.4.2. Gestão Visual

A gestão visual foi aplicada como ferramenta de apoio às equipas da logística interna e dos *conveyors* para auxiliar na gestão de material (abastecido e finalizado) e garantir o cumprimento do layout definido. Desta forma, apresentam-se nas seguintes figuras as várias medidas criadas para garantir a correta gestão destes pontos supracitados.

Na figura 43, é possível verificar a identificação utilizada para auxiliar o abastecimento pela logística interna dos componentes e materiais nos carros Kit, neste caso, aplicado ao material usado no posto 3. Estas listas foram criadas para cada posto de montagem, onde foi definido para cada prateleira do carro os diferentes componentes que serão lá colocados, garantindo que quando o material é consumido, este é abastecido de forma consistente ao local próprio.



Figura 43 - Exemplo de identificação de material abastecido em carro Kit

Na figura 44 estão representados outros tipos de identificações para material pronto. O objetivo desta medida é destinar um local exato para os diferentes tipos de conjuntos, e facilitar a sua identificação e gestão de stocks destes componentes. A figura representa os dois tipos de caixas para CCV's, no entanto, identificações similares foram criadas e colocadas nos respetivos carros de material destinadas aos conjuntos assembled nas pré-montagens, por exemplo para os conjuntos das cabeceiras, patins e garfos, entre outros conjuntos utilizados.



*Figura 44 - Exemplo de identificações de material pronto*

As identificações demonstradas na figura 45 servem para representar visualmente as diferentes áreas distintas do layout da linha, sendo fundamental para evitar a incorreta utilização desses espaços. Com a criação do novo layout, foram também criadas zonas que anteriormente não existiam, melhorando assim a falta de organização por vezes presente junto aos postos de trabalho.



*Figura 45 - Exemplo de identificações das áreas do layout*

Estas medidas de gestão visual visam melhorar a forma como o material é gerido e abastecido pela linha de produção, de modo a definir espaços próprios para os materiais e ainda auxiliar na gestão dos stocks não só do material abastecido como também dos conjuntos finalizados à espera de serem consumidos. Também se verifica uma melhor organização do espaço à volta dos postos de trabalho, garantindo o cumprimento do layout e evitar a aglomeração de material desnecessário para realizar os processos de produção.

### 3.4.3. Aplicação dos 5S's para estantes dos parafusos *Kanban*

As estantes *Kanban* são usadas para colocar maioritariamente os parafusos utilizados nos respetivos postos de montagem. Inicialmente, não existia qualquer tipo de identificação para os tipos de parafusos que seriam utilizados para o início deste novo projeto. Assim, foi aplicado a ferramenta dos 5S's para garantir a correta identificação, colocação e utilização dos parafusos por posto de montagem.

Antes de ser implementada esta medida, uma lista de todos os tipos de parafusos pedidos por cada tipo de equipamento foi criada para facilitar a posterior separação por posto de montagem. Depois da separação ser feita, foram criadas as identificações, utilizando um sistema de cores (ver figura 46) para diferenciar em qual equipamento será utilizado cada parafuso, aplicado aos CCV's, RCV's ou para ambos os equipamentos.



Figura 46 - Exemplo da aplicação dos 5S's para as estantes *Kanban*

Esta medida previne a incorreta utilização dos parafusos entre os postos e equipamentos, facilitando também a sua identificação, já que este terá o local definido e tornará o trabalho mais parametrizado e rudimentar para a realização das tarefas de montagem. Estas identificações servem também para a equipa da logística interna mais facilmente abastecer estes parafusos, já que são abastecidos através do sistema *Kanban* e podem ser mais facilmente identificados, com a presença do código e descrição do parafuso no local próprio.

### 3.4.4. Guias de Montagem

Ao longo do desenvolvimento do estudo à linha, foram detetadas algumas dificuldades na realização de certas atividades de montagem, que por vezes provocavam erros na montagem e obrigavam ao retrabalho do conjunto. Posto isto, foram criados vários guias de montagem para mitigar estas dificuldades, de modo a assistir os colaboradores no cumprimento destas tarefas e eliminar ou reduzir a ocorrência destes erros.

O primeiro guia é aplicado ao posto da pré-montagem das longarinas, onde pela natureza deste processo de montagem, o posicionamento dos suportes para as pernas requer uma especial atenção, já que estas exigem uma cota distinta para cada tipo de CCV e para cada uma das três longarinas. Na figura 47 está demonstrado um exemplo destes guias para o equipamento A239421/120054912, aqui é possível verificar as cotas da posição dos suportes, separado por cada longarina (motor, meio e esquerdo). Para simplificar este guia, as cotas estão definidas pelo número de furos na longarina entre pontos de referência, como a caixa do motor ou a extremidade da longarina. Os restantes guias para pré-montagem das longarinas criados para cada equipamento encontram-se no Apêndice A.

#### A239421/120054912

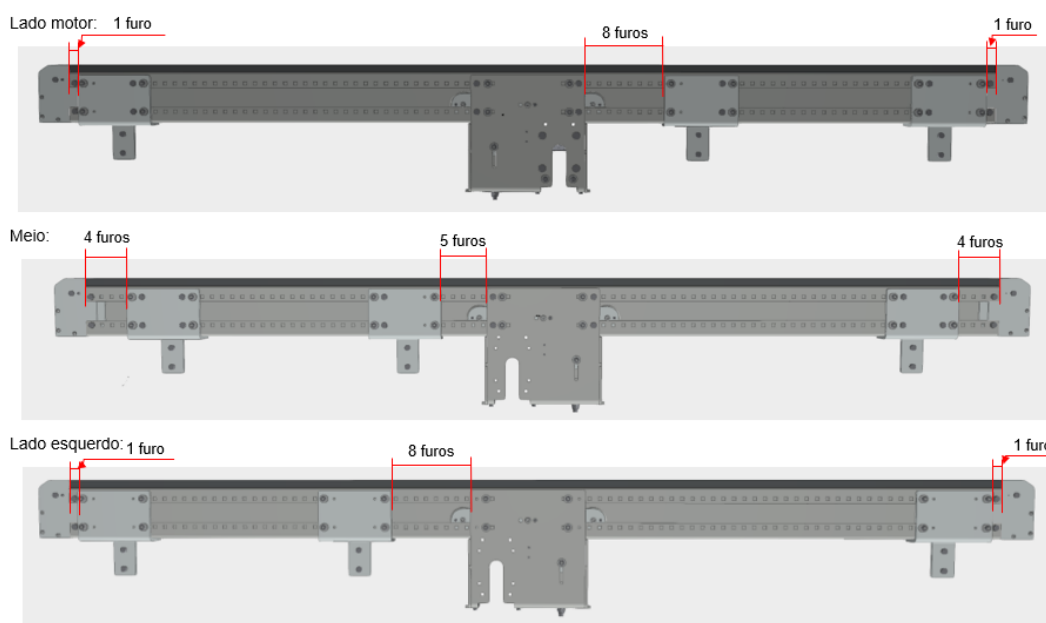


Figura 47 – Exemplo de guia para pré-montagem das longarinas

Para o segundo guia de montagem, este é utilizado no posto 3 como apoio para a montagem das blindagens dos CCV's (ver figura 48). Igualmente ao guia anterior, o formato está separado por equipamento e pelas três longarinas distintas, onde a identificação de cada blindagem com o respetivo código é exposto para mais facilmente identificar onde cada blindagem e suporte elétrico é colocado. Para os outros equipamentos, os guias de montagem das blindagens encontram-se no Apêndice B.

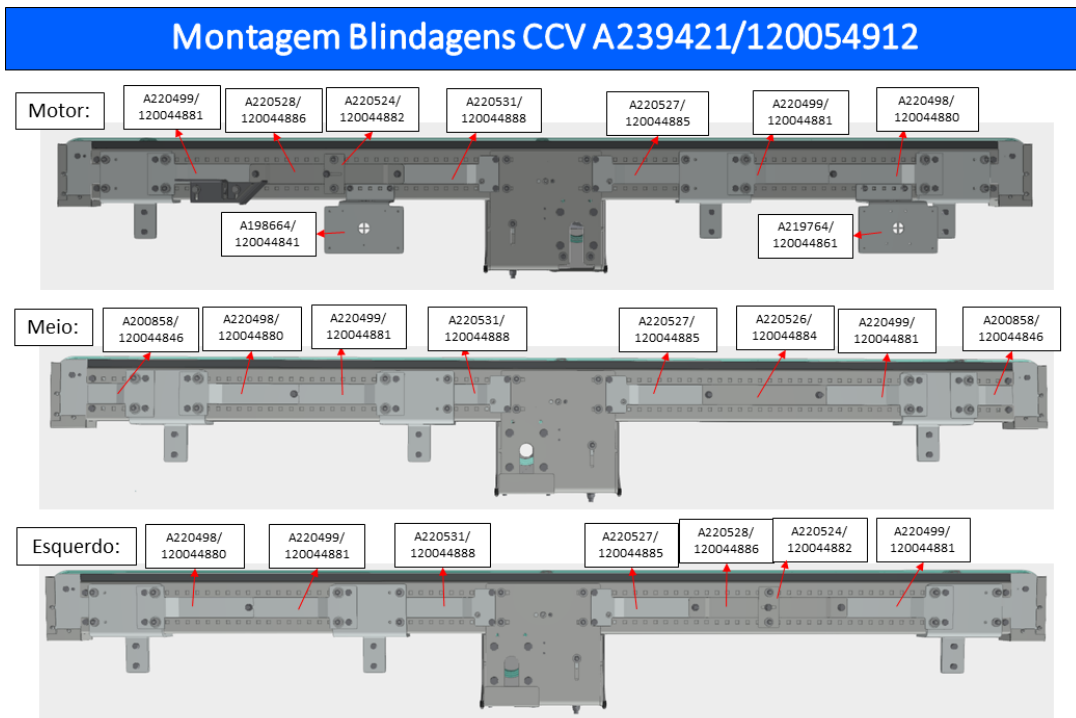


Figura 48 – Exemplo guia de montagem das blindagens para CCV's

O terceiro e último guia foi criado com a intenção de assegurar no posicionamento das pernas no início da montagem do CCV no posto 2. As marcações no chão observadas na figura 49 representam a posição dos pés para os diferentes equipamentos, onde cada cor representa um certo CCV e estando à cota exigida do respectivo equipamento. Este guia garante o posicionamento correto das pernas, sendo um ponto fundamental para a correta montagem do equipamento e colocação das longarinas, facilitando o passo crítico da colocação do equipamento em esquadria.



Figura 49 - Guia de colocação das pernas para CCV's

### 3.4.5. Gestão de defeitos e retrabalho

Em relação ao retrabalho causado pelos defeitos presentes na matéria-prima, como referido anteriormente foi impossível combater este problema de raiz, para tal seria necessário reconsiderar a lista de fornecedores que abastecem os materiais à empresa. Deste modo, foi criado um guia de identificação para os diferentes tipos de defeitos encontrados, para evitar o desperdício de tempo e recursos em retrabalho considerado desnecessário para alcançar a qualidade exigida pelo cliente.

Na figura 50 é possível verificar este guia de gestão e identificação de defeitos, separado por três categorias distintas: Defeitos sem necessidade de retrabalho; Defeitos retrabalháveis; Defeitos não-aceitáveis. A primeira categoria inclui defeitos que não requerem retrabalho por serem ocultados por outros componentes no conjunto final do equipamento. A segunda categoria refere-se aos defeitos que precisam de retrabalho da peça para estarem em conformidade. Para a terceira categoria, estes defeitos incluem componentes que tem de ser rejeitados pela incapacidade de retrabalho destas peças, sendo necessário requisitar a substituição do artigo.

Este guia permite aos colaboradores rapidamente identificar o tipo de defeito presente e a forma como deverá ser tratado, tentando combater o excesso de retrabalho presente nos processos de produção dos *conveyors*.

Guia de Identificação de Defeitos		
Defeitos sem necessidade de retrabalho	Defeitos retrabalháveis	Defeitos não-aceitáveis
<ul style="list-style-type: none"> <li>Defeitos que ficam ocultos, e não afetam o funcionamento do conjunto</li> </ul> <p><b>Exemplos:</b></p>  <p>Escondido por parafusos</p> <p>Escondido por outros componentes</p> <p><b>Antes:</b>  <b>Depois:</b> </p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Marcas superficiais na pintura (riscos, marcas, picadas, etc...)</li> </ul> <p><b>Exemplos:</b></p>  	<ul style="list-style-type: none"> <li>Peças tortas, torcidas, empenadas</li> <li>Defeitos que afetem a integridade/funcionamento da peça</li> <li>Defeitos visuais não retrabalháveis (tinta lascada, golpes profundos, etc...)</li> </ul> <p><b>Exemplos:</b></p>  

Figura 50 - Guia de gestão de defeitos e retrabalho

### 3.4.6. Melhoria do processo de montagem das correntes

A montagem das correntes dos CCV's é uma etapa bastante demorosa no processo de montagem do equipamento, principalmente por causa da dificuldade em passar as correntes por dentro do transportador e garantir a correta ligação entre os elos de fixação, já que esta tarefa é toda realizada à mão no posto 2, onde os colaboradores utilizam um cabo para auxiliar na colocação das correntes pelas longarinas e bastante tempo é perdido a colocar a corrente numa posição que possibilita o fecho da mesma.

A solução proposta para este problema baseia-se numa ferramenta impressa em 3D, com o objetivo de simplificar este processo e possibilitar a montagem das correntes no posto da pré-montagem da longarina em vez de no posto 2, balanceando a carga de trabalho neste posto crítico, aumentando assim a cadência de produção destes equipamentos. Deste modo, com a corrente montada diretamente na longarina, será apenas necessário girar a corrente para uma posição que permita remover a ferramenta e colocar o elo de engate para finalizar esta montagem.

Na figura 51 estão representados os três componentes que compõem o conjunto desta ferramenta, consistindo por elos de extensão e dois elos de ligação à corrente em cada extremidade. Estes elementos são montados para criar a ferramenta em questão, onde o número de elos de extensão pode ser escolhido consoante a necessidade exigida para a montagem da corrente.



*Figura 51 - Elementos da ferramenta de melhoria do processo de montagem das correntes*

A ferramenta assemblada pode ser vista na figura 52. Como descrito anteriormente, servirá para passar a corrente pelo equipamento em vez de se utilizar o cabo, e estando a corrente em posição, serve como extensão utilizando os dois elos de ligação em cada lado para facilitar a posterior montagem da corrente no posto 2. Da forma como os componentes são desenhados, isto simplifica a montagem desta ferramenta e possibilita a rápida customização caso seja preciso.



*Figura 52 - Ferramenta de melhoria do processo de montagem das correntes*

Por causa do excesso de carga de trabalho das impressoras 3D da empresa, não foi possível fabricar e testar este protótipo. No entanto, apenas pelo facto de possibilitar o rebalanceamento do posto 2 e melhoria do processo de montagem das correntes, demonstra a viabilidade desta ferramenta para atingir resultados positivos para o processo.

página propositadamente em branco

## 4. Resultados e Discussão

Neste capítulo, serão expostos os resultados qualitativos obtidos após a proposta e implementação das ações de melhoria anteriormente discutidas. Para quantificar estas medidas de melhoria, teria sido realizado um segundo estudo dos tempos para avaliar o desempenho atual da linha comparativamente ao estado inicial. Por causa da falta de trabalho e ausência de colaboradores no período após a implementação destas medidas, foi impossível realizar este estudo. Porém, a simulação será utilizada para dar uma previsão dos resultados esperados destas melhorias, possibilitando assim a representação quantitativa das melhorias implementadas. Após esta análise, a discussão destes resultados obtidos serão apresentados, dando uma visão geral dos resultados alcançados no decorrer deste projeto.

### 4.1. Apresentação dos resultados

Com o intuito de apresentar os resultados obtidos através da implementação das melhorias, na tabela 9 estão representados por cada proposta de melhoria relativamente a cada processo os resultados qualitativos alcançados.

*Tabela 9 - Resultados qualitativos*

Processo	Proposta de Melhoria	Resultados Qualitativos
Pré-Montagens	Gestão visual	<ul style="list-style-type: none"><li>• Melhor organização do espaço para material e carros Kit</li><li>• Diminuição do tempo perdido à procura de material consumível</li><li>• Melhor gestão e controlo de stocks de material consumível e finalizado</li></ul>
	Mudança do layout	<ul style="list-style-type: none"><li>• Definição de locais apropriados a todo o tipo de material/conjunto</li><li>• Diminuição das distâncias percorridas</li><li>• Simplificação do processo de abastecimento de material</li></ul>

Tabela 9 - Resultados Qualitativos (cont.)

<b>PM Pernas</b>	Guia de identificação de defeitos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução do retrabalho considerado desnecessário</li> </ul>
	Criação de um guia de montagem	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eliminação dos erros durante a montagem</li> <li>• Aumento da produtividade</li> </ul>
<b>PM Longarina</b>	Gestão visual	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhor organização do espaço para material e carros Kit</li> <li>• Diminuição do tempo perdido à procura de material consumível</li> <li>• Melhor gestão e controlo de stocks de material consumível</li> </ul>
	Mudança do layout	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definição de locais apropriados a todo o tipo de material/conjunto</li> <li>• Diminuição das distâncias percorridas</li> <li>• Simplificação do processo de abastecimento de material</li> </ul>
	Guia de identificação de defeitos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução do retrabalho considerado desnecessário</li> </ul>
	Gestão visual/Aplicação dos 5S's	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução do tempo perdido à procura de material e parafusos</li> <li>• Diminuição das distâncias percorridas</li> </ul>
<b>Posto 2</b>	Mudança do layout	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alocação de locais próprios para o material abastecido à linha</li> <li>• Simplificação do processo de abastecimento de material</li> </ul>
	Guia de montagem	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminuição do tempo dedicado aos ajustes de esquadria do equipamento</li> </ul>

Tabela 9 - Resultados Qualitativos (cont.)

<b>Posto 2</b>	Criação de ferramenta para auxílio na montagem das correntes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhoria do processo de montagem – Melhores condições</li> <li>• Diminuição do tempo de ciclo no posto 2 – Aumento da produtividade</li> </ul>
	Gestão visual/Aplicação dos 5S's	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução do tempo perdido à procura de material e parafusos</li> </ul>
<b>Posto 3</b>	Mudança do layout	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminuição das distâncias percorridas</li> <li>• Alocação de locais próprios para o material abastecido à linha</li> <li>• Simplificação do processo de abastecimento de material</li> </ul>
	Guia de montagem	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminuição do tempo de montagem das blindagens</li> <li>• Aumento da produtividade</li> </ul>

Estes resultados mostram ser benéficos para a empresa, já que mesmo utilizando certas soluções baseadas em *quick wins*, foi possível obter melhorias consideráveis no que toca à organização dos processos, materiais e da linha como um todo, sem necessitar de altos custos e tempos de implementação.

## 4.2. Análise das melhorias através do uso da simulação

Para representar estas melhorias de uma forma quantitativa, já que como referido na secção introdutória deste capítulo, foi impossível realizar um novo estudo após a implementação das melhorias, foram então utilizados os modelos de simulação anteriormente apresentados para tornar estes ganhos mais perceptíveis. Deste modo, alterações aos modelos iniciais serão feitas, nomeadamente aos tempos de ciclo dos respetivos processos, com o objetivo de permitir a própria análise e previsão do desempenho da linha após a implementação destas melhorias.

Posto isto, as seguintes análises serão aplicáveis apenas ao processo de montagem dos CCV's, já que este demonstra ter o maior impacto no que toca ao cumprimento dos prazos de entrega impostos pelo cliente, como também sendo o processo mais complexo e demoroso dos dois tipos de equipamentos produzidos na linha e onde todas as melhorias aplicadas impactam o processo.

Os principais contributos da implementação destas melhorias foram aos processos da pré-montagem das pernas (quadro), pré-montagem das longarinas, posto 2 e 3. Assim sendo, serão

## Resultados e Discussão

estes os processos considerados para esta análise, visto que estes apresentam as maiores alterações nos respetivos tempos de ciclo.

Os resultados esperados foram baseados nos tempos recolhidos do estudo realizado à linha. Por exemplo, sabe-se que o tempo desperdiçado em movimentações causados pelo layout antigo no processo de montagem das longarinas é cerca de 20 segundos (na categoria Material dos tempos), por isso com as alterações realizadas pode-se assumir que reduz este tempo por cerca de 25%. Esta abordagem foi utilizada para os restantes processos e melhorias.

Na tabela 10 estão expostos na totalidade os resultados quantitativos esperados para cada proposta, assim como o tempo de ciclo total para cada processo após a implementação das melhorias.

*Tabela 10 - Resultados quantitativos esperados após implementação das melhorias*

<b>Processo</b>	<b>Proposta de Melhoria</b>	<b>Resultados Quantitativos Esperados</b>	<b>Tempo de Ciclo Total</b>
<b>PM Pernas</b>	Guia de identificação de defeitos	Redução cerca de 30% do tempo de 'Retrabalho'	<b>24:26</b>
<b>PM Longarina</b>	Criação de um guia de montagem	Redução cerca de 60% do tempo de 'Retrabalho'	16:47 + 4 minutos para montagem da corrente = <b>20:47</b>
	Gestão visual	Redução cerca de 10% do tempo de 'Material' e 10% do tempo de 'Preparação'	
	Mudança do layout	Redução cerca de 25% do tempo de 'Material' (movimentações)	
	Guia de identificação de defeitos	Redução cerca de 20% do tempo de 'Retrabalho'	
<b>Posto 2</b>	Gestão visual/Aplicação dos 5S's	Redução cerca de 20% do tempo de 'Material' e 20% do tempo de 'Preparação'	<b>57:24</b>
	Mudança do layout	Redução cerca de 25% do tempo de 'Material' (movimentações)	
	Guia de montagem	Redução cerca de 50% do tempo de 'Ajustes'	
	Criação de ferramenta para auxílio na montagem das correntes	Redução cerca de 12 minutos do tempo de 'Produção' (tempo de montagem das correntes)	

Tabela 10 - Resultados quantitativos esperados após implementação das melhorias (cont.)

<b>Posto 3</b>	Gestão visual/Aplicação dos 5S's	Redução cerca de 20% do tempo de 'Material' e 20% do tempo de 'Preparação'	<b>57:38</b>
	Mudança do layout	Redução cerca de 25% do tempo de 'Material' (movimentações)	
	Guia de montagem	Redução cerca de 20% do tempo de 'Preparação'	

É importante realçar que os valores percentuais para as reduções dos tempos são cumulativos, por isso o total de tempo reduzido é a soma das percentagens para essa categoria de tempo.

Os dados retirados do relatório criado pelo programa de simulação estão expostos na tabela 11, onde é possível verificar os tempos de funcionamento, espera, parado, assim como a percentagem de utilização e entidades processadas por cada processo.

Tabela 11 - Dados do modelo de simulação CCV após melhorias

<b>Processo</b>	<b>Tempos (h)</b>				<b>Utilização (%)</b>	<b>Entidades Processadas</b>
	Produção	Funcionamento	Espera	Parado		
<b>PM Pernas</b>	40	40	0	0	100	98
<b>PM Longarina</b>	40	35,2	0,08	4,71	88	101
<b>P1</b>	40	12,38	0	27,62	30,95	36
<b>P2</b>	40	30,56	8,41	1,03	76,4	31
<b>P3</b>	40	28,82	10,18	1	72,04	<b>30</b>

### 4.3. Discussão dos resultados

Depois de apresentar os resultados acima descritos, é possível verificar que tanto os resultados qualitativos como quantitativos demonstram ter um impacto positivo no desempenho da linha e realização das atividades do processo pelos colaboradores, especialmente considerando os custos de aplicabilidade sendo bastante reduzidos em termos financeiros e de tempo de implementação. Isto demonstra a verdadeira versatilidade de utilizar abordagens como estas para alcançar resultados consideráveis num curto espaço de tempo.

Observando em mais detalhe os resultados quantitativos previstos, é possível verificar na tabela 12 os ganhos/perdas comparativamente ao estado inicial da linha. O ponto que mais se destaca é o aumento de 4 equipamentos produzidos ao final de uma semana de trabalho, passando de 26 para 30. Também é de notar o aumento da produtividade dos postos da pré-montagem das longarinas e o posto 1, com um aumento de 19,67% e 3,44% de utilização respetivamente. Por

outro lado, é possível verificar um decréscimo na utilização e funcionamento dos postos 2 e 3, isto é provocado pela descida significativa dos tempos de ciclo destes processos e o facto da produção dos componentes necessários para alimentar estes postos, nomeadamente a montagem das pernas, sejam incapazes de acompanhar este novo ritmo de produção, causando o aumento dos tempos de espera ou inatividade para os postos principais de montagem. No entanto, apesar do posto da pré-montagem das pernas se tornar o novo posto crítico do processo para este cenário, na realidade isto seria um problema facilmente resolvido apenas por atribuir uma boa gestão de stock para este conjunto e garantir que esta montagem permaneça sempre à frente das necessidades do posto 2, eliminando estes tempos de espera.

*Tabela 12 - Comparação entre estado inicial da linha e estado após melhorias*

Processo	Tempos (h)			Utilização (%)	Entidades Processadas
	Funcionamento	Espera	Parado		
<b>PM Pernas</b>	0	0	0	0	+5
<b>PM Longarina</b>	+7,87	-0,01	-7,87	+19,67	+12
<b>P1</b>	+1,38	0	-1,38	+3,44	+4
<b>P2</b>	-7,25	+7,12	+0,13	-18,14	+4
<b>P3</b>	-1,59	+1,45	+0,13	-3,98	<b>+4</b>

Para além dos ganhos monetários e funcionais alcançados através da implementação das medidas de melhoria anteriormente descritas, é relevante mencionar que para ser possível implementar e sustentar uma filosofia de melhoria contínua em linhas de produção como no caso deste projeto, as pessoas pertencentes à equipa tem de fazer parte deste processo de melhoria, sendo a base e do interesse de todos para possibilitar o crescimento comparando a um estado inicial do processo.

Isto foi possível verificar na linha de produção em estudo, depois de terem sido aplicadas certas medidas de melhoria. Na figura 53 está demonstrado um exemplo de uma medida aplicada pelos colaboradores da equipa no contexto supracitado. Neste caso, verifica-se o carro Kit para o material utilizado no posto 3, que inclui todas as blindagens para o fecho do CCV. Como mencionado anteriormente, existem códigos que distinguem cada blindagem, e por iniciativa dos colaboradores, foram utilizadas pequenas etiquetas colocadas ao lado de onde são postas as blindagens no carro, de maneira a mais facilmente distinguir entre tipos, sendo um complemento ao guia de montagem criado para auxiliar o processo de montagem neste posto.



*Figura 53 - Medida de melhoria complementada pelos colaboradores*

Posto isto, estes resultados representam favoravelmente a integração de metodologias *Lean* com ferramentas tecnológicas como a simulação para a análise e implementação de melhorias em uma linha de produção, sendo aplicado a um sistema complexo de produção como é o caso das empresas *engineer-to-order*.

Adicionalmente às medidas criadas e implementadas, a boa receção a estas mudanças por parte dos colaboradores da equipa dos *conveyors*, assim como o envolvimento neste processo de melhoria, demonstrou que mesmo utilizando medidas rudimentares para resolver problemas presentes no meio de trabalho, é possível alcançar retornos significativos não só no que toca à melhoria do próprio processo produtivo, mas também a forma como o envolvimento de todas as partes interessadas contribui para a geração de soluções inovadoras, incentiva a colaboração e reforça as ideias encorajadas pelas metodologias *Lean*.

página propositadamente em branco

## 5. Conclusão

Esta dissertação foi elaborada no âmbito da unidade curricular Dissertação/Projeto/Estágio (DPEST) do curso de Mestrado de Engenharia Mecânica, no ramo de Gestão Industrial, sendo realizado no contexto industrial na empresa Körber Supply Chain PT. O foco principal deste projeto foi abordar os desafios presentes na linha em estudo, procurando implementar medidas de melhoria baseadas nas metodologias *Lean* com o auxílio da simulação como ferramenta de apoio à decisão.

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões finais retiradas deste trabalho, incluindo a descrição das dificuldades encontradas no decorrer deste projeto e discussão das perspectivas para trabalhos futuros.

### 5.1. Conclusões finais

A presente dissertação visou utilizar a simulação e metodologias *Lean* como abordagens complementares para análise e melhoria de uma linha de produção de uma empresa industrial. Durante o estudo realizado à linha, a análise temporal e aplicação das ferramentas *Lean*, como o VSM e análise dos 7 desperdícios, permitiu identificar diversos pontos para possíveis melhorias, enquanto o posterior uso da simulação forneceu uma plataforma visual para avaliar o estado atual dos vários processos em funcionamento. A combinação destas metodologias relevou ser eficaz na compreensão profunda dos processos e na identificação de oportunidades para melhoria do desempenho geral da linha, especialmente para uma estrutura sofisticada de produção como é o caso das empresas do tipo *engineer-to-order*, onde o cumprimento dos prazos exigidos pelos clientes é crucial para crescer num mercado cada vez mais competitivo.

Com base na análise inicial, foram propostas várias medidas com o objetivo de eliminar ou reduzir a ocorrência dos problemas detetados, aumentar o aproveitamento dos recursos disponíveis e melhorar as condições de trabalho para as atividades de montagem exercidas na linha de produção dos *conveyors*. A maioria destas medidas foram implementadas no sistema real, onde os respetivos impactos para cada proposta foram avaliados, e através do meio da simulação, foi possível quantificar e prever os novos tempos de ciclo dos processos após a implementação destas melhorias. Esta abordagem também serve como auxílio na tomada de decisão para melhor controlar e gerir o planeamento da produção, tornado a visualização mais clara da linha como um todo para futuros projetos semelhantes. A combinação da implementação prática com uma análise preditiva, assegurou que as decisões tomadas fossem baseadas em dados concretos mesmo quando estes fossem difíceis de recolher.

## Conclusão

Os resultados obtidos demonstraram ser positivos tanto qualitativamente como quantitativamente. As melhorias implementadas não só são capazes de aumentar a eficiência e reduzir os desperdícios, mas também contribuem para melhores condições para os colaboradores no que toca à organização dos espaços de trabalho, melhoria das atividades redundantes e facilitar certas atividades de montagem, incluindo a prevenção de erros. As previsões através da simulação resultaram num aumento de 4 unidades produzidas ao final de uma semana de trabalho após a implementação das medidas apresentadas, ou um aumento de 13% relativamente ao estado inicial da linha de produção, exibindo o considerável impacto que medidas relacionadas com melhorias rápidas e contínuas podem ter nos processos produtivos. De forma sucinta, o processo de análise, melhoria e implementação demonstrou a versatilidade e robustez da integração das metodologias *Lean* e utilização de ferramentas tecnológicas como a simulação para auxiliar em projetos de melhoria de uma linha de produção num ambiente industrial, mesmo para processos multifacetados e com baixo nível de aplicabilidade, resultando em ganhos significativos mesmo quando os processos produtivos já estão aquém das necessidades do cliente.

## 5.2. Dificuldades Encontradas

As dificuldades sentidas durante o desenvolvimento deste projeto passaram principalmente pela compreensão dos processos de produção da empresa, e como analisar corretamente estas atividades. Inicialmente, foi preciso dedicar bastante tempo para perceber como estes processos eram realizados, principalmente porque não existe apenas uma forma de fazer a montagem destes equipamentos, e existem muitos fatores externos que influenciam a forma como são realizados estes processos. Por esses motivos, demonstrou ser difícil conseguir efetuar um estudo concreto e angariar dados de forma coerente, que representem as tarefas executadas de modo realista para uma posterior análise e aplicação da simulação.

## 5.3. Perspetivas de Trabalho Futuro

Em relação às perspetivas de trabalho futuro, é fundamental que estas medidas de melhoria sejam posteriormente avaliadas no processo real, o progresso e desempenho sejam acompanhados, para dar continuidade ao processo de melhoria contínua aqui apresentado e sendo responsabilidade da empresa para manter e contruir a partir deste progresso alcançado.

Ainda assim, uma oportunidade para próximos trabalhos seria utilizar os dados recolhidos no presente projeto como dados históricos que podem ser utilizados para comparação ou melhorias futuras, melhorando desta maneira a validação dos mesmos e alcançando um nível de confiança superior ao aqui atingido.

Além disso, recomenda-se o desenvolvimento de uma nova estratégia para avaliação da qualidade dos fornecedores, já que este foi identificado como um ponto principal que origina problemas durante os projetos, não só pela falta de qualidade da matéria-prima como também o tempo desperdiçado em os solucionar.

# Referências

- Abar, S., Theodoropoulos, G. K., Lemarinier, P., & O'Hare, G. M. P. (2017). Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review*, 24, 13–33. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.001>
- Alpala, L. O., Alemany, M. D. M. e va, Peluffo, Di. H., Bolaños, F. A., Rosero, A. M., & Torres, J. C. (2018). Methodology for the design and simulation of industrial facilities and production systems based on a modular approach in an «industry 4.0» context. *DYNA*, 85(207), 243–252. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.68545>
- Altuntas, S., Selim, H., & Dereli, T. (2014). A fuzzy DEMATEL-based solution approach for facility layout problem: a case study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(5–8), 749–771. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5826-3>
- Al-Zubaidi, S. Q. D., Fantoni, G., & Failli, F. (2021). Analysis of drivers for solving facility layout problems: A Literature review. *Journal of Industrial Information Integration*, 21, 100187. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100187>
- Antonelli, D., Litwin, P., & Stadnicka, D. (2018). Multiple System Dynamics and Discrete Event Simulation for manufacturing system performance evaluation. *Procedia CIRP*, 78, 178–183. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.312>
- Ares, E., Pelaez, G., Ferreira, L. P., Prieto, M. D., & Chao, M. A. (2012). Optimisation of a production line using simulation and lean techniques. *Proceedings of the Operational Research Society Simulation Workshop (SW12)*.
- Armour, G. C., & Buffa, E. S. (1963). A heuristic algorithm and simulation approach to relative location of facilities. *Management Science*, 9(2), 294–309.
- Asl, A. D., & Wong, K. Y. (2015). Solving unequal area static facility layout problems by using a modified genetic algorithm. *2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 302–305. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2015.7334129>
- Azadivar, F., & Wang, J. (2000). Facility layout optimization using simulation and genetic algorithms. *International Journal of Production Research*, 38(17), 4369–4383. <https://doi.org/10.1080/00207540050205154>
- Bon, A. T., & Shahrin, N. N. (2016). Assembly Line Optimization using Arena Simulation. *Proceedings of the 2016 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2225–2232.
- Bozorgi, N., Abedzadeh, M., & Zeinali, M. (2015). Tabu search heuristic for efficiency of dynamic facility layout problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(1–4), 689–703. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6460-9>
- Burkard, R. E., Cela, E., Pardalos, P. M., & Pitsoulis, L. S. (1998). *The quadratic assignment problem*. Springer.
- Cheek, C., Hays, R., Smith, J., & Allen, P. (2018). Improving case study research in medical education: a systematised review. *Medical Education*, 52(5), 480–487. <https://doi.org/10.1111/medu.13469>
- Choi, S., Jun, C., Zhao, W. Bin, & Do Noh, S. (2015). Digital Manufacturing in Smart Manufacturing Systems: Contribution, Barriers, and Future Directions. Em *IFIP Advances in Information and Communication Technology* (Vol. 460, pp. 21–29). Springer New York LLC. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-22759-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-22759-7_3)
- Crowe, S., Cresswell, K., Robertson, A., Huby, G., Avery, A., & Sheikh, A. (2011). The case study approach. *BMC Medical Research Methodology*, 11(1), 100. <https://doi.org/10.1186/1471-2288-11-100>

## Referências

- Dantas, L., Oliveira, F., & Peres, I. (2016). Simulação de Eventos Discretos com balanceamento de linha de produção: uma aplicação na manufatura. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 1328–1339.
- Deisenroth, M. P., & Apple, J. M. (1972). A computerized plant layout analysis and evaluation technique. *Annual AIIE Conference*, 75–87.
- Deshpande, V., Patil, N. D., Baviskar, V., & Gandhi, J. (2016). Plant layout optimization using CRAFT and ALDEP methodology. *Productivity Journal by National Productivity Council*, 57(1), 32–42.
- Dias, L. M. S., Pereira, G. A. B., Vik, P., & Oliveira, J. A. (2014). Layout and process optimisation: using computer-aided design (CAD) and simulation through an integrated systems design tool. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 9(1–2), 46–62.
- Dimara, E., Zhang, H., Tory, M., & Franconeri, S. (2022). The Unmet Data Visualization Needs of Decision Makers Within Organizations. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 28(12), 4101–4112. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2021.3074023>
- dos Santos, C. H., Montevechi, J. A. B., de Queiroz, J. A., de Carvalho Miranda, R., & Leal, F. (2022). Decision support in productive processes through DES and ABS in the Digital Twin era: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 60(8), 2662–2681. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1898691>
- Drira, A., Pierreval, H., & Hajri-Gabouj, S. (2007). Facility layout problems: A survey. *Annual Reviews in Control*, 31(2), 255–267. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2007.04.001>
- Duplakova, D., Duplak, J., Mital, D., Soltes, P., & Sukic, E. (2020). Analysis of approaches to the material flow in the production process with the use of simulation. *J. Soc. Technol. Dev*, 1, 36–44.
- Emmanuel Lorou, B.-F. T., Muchiri, P. N., Kuloba, P., & Kimotho, J. K. (2021). Performance Improvement of Truck Assembly Line through Modeling and Simulation Using Arena Software. *Open Journal of Optimization*, 10(03), 88–100. <https://doi.org/10.4236/ojop.2021.103007>
- Feldkamp, N., Bergmann, S., Strassburger, S., & Schulze, T. (2016). Knowledge discovery in simulation data: A case study of a gold mining facility. *2016 Winter Simulation Conference (WSC)*, 1607–1618. <https://doi.org/10.1109/WSC.2016.7822210>
- Ferreira, L. P., Gómez, E. A., Lourido, G. C. P., Quintas, J. D., & Tjahjono, B. (2012). Analysis and optimisation of a network of closed-loop automobile assembly line using simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(1–4), 351–366. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3502-4>
- Ferreira, L. P., Gómez, E. A., Lourido, G. P., & Tjahjono, B. (2011, Julho). Optimization of a multiphase multiproduct production line based on virtual cells. *Proceedings of the World Congress on Engineering*.
- Fousek, J., Kuncova, M., & Fabry, J. (2017). Discrete Event Simulation – Production Model In SIMUL8. *ECMS 2017 Proceedings edited by Zita Zoltay Paprika, Péter Horák, Kata Váradi, Péter Tamás Zwierczyk, Ágnes Vidovics-Dancs, János Péter Rádics*, 229–234. <https://doi.org/10.7148/2017-0229>
- Gilmore, P. C. (1962). Optimal and Suboptimal Algorithms for the Quadratic Assignment Problem. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 10(2), 305–313. <https://doi.org/10.1137/0110022>
- Gong, L., Berglund, J., Fast-Berglund, Å., Johansson, B., Wang, Z., & Börjesson, T. (2019). Development of virtual reality support to factory layout planning. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJDeM)*, 13(3), 935–945. <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00538-x>

- Hadi-Vencheh, A., & Mohamadghasemi, A. (2013). An integrated AHP–NLP methodology for facility layout design. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(1), 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.07.009>
- Harrison, H., Birks, M., Franklin, R., & Mills, J. (2017). Case study research: Foundations and Methodological Orientations. *Forum Qualitative Sozialforschung Forum: Qualitative Social Research*, 18(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.17169/fqs-18.1.2655>
- Hasda, R. K., Bhattacharjya, R. K., & Bennis, F. (2017). Modified genetic algorithms for solving facility layout problems. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 11(3), 713–725. <https://doi.org/10.1007/s12008-016-0362-z>
- Hosseini-Nasab, H., Fereidouni, S., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Fakhrazad, M. B. (2018). Classification of facility layout problems: a review study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1–4), 957–977. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0895-8>
- Isluer, A. A. (1998). A genetic algorithm approach for multiple criteria facility layout design. *International Journal of Production Research*, 36(6), 1549–1569. <https://doi.org/10.1080/002075498193165>
- J Tampubolon, L D Agoestine Simangunsong, M D Agustina Sibuea, & A C Sembiring and A Mardhatillah. (2020). Prayer paper production facility layout redesign using systematic layout planning method and CRAFT. *International Journal of Science, Technology & Management*, 1(4), 448–456. <https://doi.org/10.46729/ijstm.v1i4.84>
- Jiang, S., Li, L., & Deng, K. (2022). Optimization and Simulation of Production Line Layout Based on Plant Simulation. *2022 IEEE 5th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE)*, 180–185. <https://doi.org/10.1109/AUTEEE56487.2022.9994500>
- Kampa, A., Gołda, G., & Paprocka, I. (2017). Discrete Event Simulation Method as a Tool for Improvement of Manufacturing Systems. *Computers*, 6(1), 10. <https://doi.org/10.3390/computers6010010>
- Kanduč, T. (2015). Optimisation of a complex manufacturing process using discrete event simulation and a novel heuristic algorithm. *Em Article in International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*. <https://www.researchgate.net/publication/283095139>
- Koopmans, T. C., & Beckmann, M. (1957). Assignment Problems and the Location of Economic Activities. *Econometrica*, 25(1), 53–76.
- Kumar, R., Singh, S. P., & Lamba, K. (2018). Sustainable robust layout using Big Data approach: A key towards industry 4.0. *Journal of Cleaner Production*, 204, 643–659. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.327>
- Kurkin, O., & Šimon, M. (2011). Optimization of Layout Using Discrete Event Simulation. *IBIMA Business Review Journal*, 1, 1–10. <https://doi.org/10.5171/2011.180343>
- Lather, J. I., & Messner, J. I. (2018). FRAMEWORK FOR A HYBRID SIMULATION APPROACH FOR AN INTEGRATED DECISION SUPPORT SYSTEM IN HEALTHCARE FACILITIES. *2018 Winter Simulation Conference (WSC)*, 1406–1417. <https://doi.org/10.1109/WSC.2018.8632194>
- Law, A. M. (2019). How to Build Valid and Credible Simulation Models. *2019 Winter Simulation Conference (WSC)*, 1402–1414. <https://doi.org/10.1109/WSC40007.2019.9004789>
- Lawler, E. L. (1963). The quadratic assignment problem. *Management science*, 9(4), 586–599.
- Le, P. L., Dao, T.-M., & Chaabane, A. (2019). BIM-based framework for temporary facility layout planning in construction site. *Construction Innovation*, 19(3), 424–464. <https://doi.org/10.1108/CI-06-2018-0052>
- Lee, R. C., & Moore, J. M. (1967). CORELAP-computerized relationship layout planning. *Journal of Industrial Engineering*, 8(3), 195–200.

## Referências

- Leiber, D., Eickholt, D., Vuong, A.-T., & Reinhart, G. (2022). Simulation-based layout optimization for multi-station assembly lines. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33(2), 537–554. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01853-5>
- Liu, C. (2017). International Competitiveness and the Fourth Industrial Revolution. *Entrepreneurial Business and Economics Review*, 5(4), 111–133. <https://doi.org/10.15678/EBER.2017.050405>
- Liu, J., Liu, J., Yan, X., & Peng, B. (2020). A heuristic algorithm combining Pareto optimization and niche technology for multi-objective unequal area facility layout problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 89, 103453. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103453>
- Lu, Y., Min, Q., Liu, Z., & Wang, Y. (2019). An IoT-enabled simulation approach for process planning and analysis: a case from engine re-manufacturing industry. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(4–5), 413–429. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1571237>
- Lufika, R. D., Sentia, P. D., & Maulana, I. (2021). Comparison of BLOCPLAN and CORELAP algorithm for Material Handling Improvement at M Bakery. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1082(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1082/1/012006>
- Matai, R. (2015). Solving multi objective facility layout problem by modified simulated annealing. *Applied Mathematics and Computation*, 261, 302–311. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2015.03.107>
- Matkovic, K., Gracanin, D., Jelovic, M., & Hauser, H. (2015). Interactive visual analysis of large simulation ensembles. *2015 Winter Simulation Conference (WSC)*, 517–528. <https://doi.org/10.1109/WSC.2015.7408192>
- Maulida Hakim, I., & Istiyanti, V. (2015). Improvement of Layout Production Facilities for a Secondary Packaging Area of a Pharmaceutical Company in Indonesia using the Corelap Method. *International Journal of Technology*, 6(6), 1006. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v6i6.1449>
- McKendall, A. R., & Hakobyan, A. (2010). Heuristics for the dynamic facility layout problem with unequal-area departments. *European Journal of Operational Research*, 201(1), 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.02.028>
- Montevichi, J. A. B., Pereira, T. F., da Silva, C. E. S., Miranda, R. de C., & Scheidegger, A. P. G. (2015). Identification of the main methods used in simulation projects. *2015 Winter Simulation Conference (WSC)*, 3469–3480. <https://doi.org/10.1109/WSC.2015.7408507>
- Moslemipour, G., Lee, T. S., & Rilling, D. (2012). A review of intelligent approaches for designing dynamic and robust layouts in flexible manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(1–4), 11–27. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3614-x>
- Mourtzis, D. (2020). Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends. *International Journal of Production Research*, 58(7), 1927–1949. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1636321>
- Nabila, A., Umam, M. I. H., Suherman, A., Devani, V., & Nazaruddin, M. R. (2022). Computerized Relative Allocation of Facilities Techniques (CRAFT) Algorithm Method for Redesign Production Layout (Case Study: PCL Company). *Proceedings of the 3rd South American International Industrial Engineering and Operations Management Conference*, 1580–1590.
- Naik, S. B., & Kallurkar, S. (2016). A LITERATURE REVIEW ON EFFICIENT PLANT LAYOUT DESIGN. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INDUSTRIAL ENGINEERING RESEARCH AND DEVELOPMENT*, 7(2). <https://doi.org/10.34218/IJIERD.7.2.2016.005>

- Naranje, V., Reddy, P. V., & Sharma, B. K. (2019). Optimization of Factory Layout Design Using Simulation Tool. *2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, 193–197. <https://doi.org/10.1109/IEA.2019.8715162>
- Navarra, A., Marambio, H., Oyarzun, F., Parra, R., & Mucciardi, F. (2017). System dynamics and discrete event simulation of copper smelters. *Minerals & Metallurgical Processing*, 34(2), 96–106. <https://doi.org/10.19150/mmp.7510>
- Nazif, A., Kamar, N., Hanim, N., Bakar, A., Asghar, A., Adham, J., & Sorooshian, S. (2016). IMPROVING PRODUCTIVITY BY SIMULATE FACILITY LAYOUT: A CASE STUDY IN A CAR COMPONENT MANUFACTURER. *International Journal of Industrial Management (IJIM)*, 2, 72–80.
- Neeraj, R. R., Nithin, R. P., Niranjhan, P., Sumesh, A., & Thenarasu, M. (2018). Modelling and simulation of discrete manufacturing industry. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 24971–24983. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.298>
- Negahban, A., & Smith, J. S. (2014). Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(2), 241–261. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.12.007>
- Nordin, N. N., & Lee, L. S. (2016). Heuristics and Metaheuristics Approaches for Facility Layout Problems: A Survey. *Pertanika Journal of Scholarly Research Reviews*, 2(3), 62–76. <http://www.pjsrr.upm.edu.my/>
- Ojstersek, R., & Buchmeister, B. (2017). Use of Simulation Software Environments for the Purpose of Production Optimization. *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*, 750–758. <https://doi.org/10.2507/28th.daaam.proceedings.xxx>
- Oztemel, E., & Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(1), 127–182. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>
- Paes, F. G., Pessoa, A. A., & Vidal, T. (2017). A hybrid genetic algorithm with decomposition phases for the Unequal Area Facility Layout Problem. *European Journal of Operational Research*, 256(3), 742–756. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.07.022>
- Palomo-Romero, J. M., Salas-Morera, L., & García-Hernández, L. (2017). An island model genetic algorithm for unequal area facility layout problems. *Expert Systems with Applications*, 68, 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.10.004>
- Palubeckis, G. (2012). A branch-and-bound algorithm for the single-row equidistant facility layout problem. *OR Spectrum*, 34(1), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s00291-010-0204-5>
- Peng, Y., Zeng, T., Fan, L., Han, Y., & Xia, B. (2018). An Improved Genetic Algorithm Based Robust Approach for Stochastic Dynamic Facility Layout Problem. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2018, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2018/1529058>
- Pérez-Gosende, P., Mula, J., & Díaz-Madroñero, M. (2021). Facility layout planning. An extended literature review. *International Journal of Production Research*, 59(12), 3777–3816. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1897176>
- Piccinini, A., Previdi, F., Cimini, C., Pinto, R., & Pirola, F. (2018). Discrete event simulation for the reconfiguration of a flexible manufacturing plant. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 465–470. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.362>
- Pierreval, H. (2018). Integrated Simulation Optimization for Layout Problems. *2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 1486–1490. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2018.8607591>
- Prajapat, N., Waller, T., Young, J., & Tiwari, A. (2016). Layout Optimization of a Repair Facility Using Discrete Event Simulation. *Procedia CIRP*, 56, 574–579. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.10.113>

## Referências

- Prasad, N. H., Rajyalakshmi, G., & Reddy, A. S. (2014). A Typical Manufacturing Plant Layout Design Using CRAFT Algorithm. *Procedia Engineering*, 97, 1808–1814. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.334>
- Priya, A. (2021). Case Study Methodology of Qualitative Research: Key Attributes and Navigating the Conundrums in Its Application. *Sociological Bulletin*, 70(1), 94–110. <https://doi.org/10.1177/0038022920970318>
- Rashid, A., Masood, T., Erkoyuncu, J. A., Tjahjono, B., Khan, N., & Shami, M. (2018). Enterprise systems' life cycle in pursuit of resilient smart factory for emerging aircraft industry: a synthesis of Critical Success Factors' (CSFs), theory, knowledge gaps, and implications. *Enterprise Information Systems*, 12(2), 96–136. <https://doi.org/10.1080/17517575.2016.1258087>
- Rizqi, Z. U., & Aulia, R. (2019). Evaluation of Redesign Layout Using Discrete Event Simulation (DES). *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Bangkok, Thailand, March 5-7, 2019*.
- Rodič, B. (2017). Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm. *Organizacija*, 50(3), 193–207. <https://doi.org/10.1515/orga-2017-0017>
- Rybicka, J., Tiwari, A., & Enticott, S. (2016). Testing a Flexible Manufacturing System Facility Production Capacity through Discrete Event Simulation: Automotive Case Study. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, 10(4), 719–723. <https://www.researchgate.net/publication/299600858>
- Safarzadeh, S., & Koosha, H. (2017). Solving an extended multi-row facility layout problem with fuzzy clearances using GA. *Applied Soft Computing*, 61, 819–831. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.09.003>
- Schubert, J., Moradi, F., Asadi, H., Luotsinen, L., Sjöberg, E., Hörling, P., Linderhed, A., & Oskarsson, D. (2015). Simulation-based decision support for evaluating operational plans. *Operations Research Perspectives*, 2, 36–56. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2015.02.002>
- Seehof, J. M., & Evans, W. O. (1967). Automated Layout Design Problems. *Journal of Industrial Engineering*, 18(12), 690–695.
- Sharma, P. (2015). Discrete-Event Simulation. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH*, 4(04). [www.ijstr.org](http://www.ijstr.org)
- Silva, V., Ferreira, L. P., Silva, F. J. G., Tjahjono, B., & Ávila, P. (2021). Simulation-Based Decision Support System to Improve Material Flow of a Textile Company. *Sustainability*, 13(5), 2947. <https://doi.org/10.3390/su13052947>
- Singh, D., & Ingole, S. (2019). Multi-objective facility layout problems using BBO, NSBBO and NSGA-II metaheuristic algorithms. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 10(2), 239–262. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2018.6.006>
- Singh, S. P., & Sharma, R. R. K. (2006). A review of different approaches to the facility layout problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30(5–6), 425–433. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0087-9>
- Tarigan, U., Cahyo, F. D., Tarigan, U. P. P., & Ginting, E. (2019). Facility Layout Design Through Integration of Lean Manufacturing Method and CORELAP Algorithm in Concrete Factory. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 505(1), 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/505/1/012015>
- Tavares, J. (2000). *Geração de Configurações de Sistemas Industriais com o Recurso à Tecnologia das Restrições e Computação Evolucionária*. Universidade do Minho.
- Tayal, A., & Singh, S. P. (2018). Integrating big data analytic and hybrid firefly-chaotic simulated annealing approach for facility layout problem. *Annals of Operations Research*, 270(1–2), 489–514. <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2237-x>

- Tayal, A., Solanki, A., & Singh, S. P. (2020). Integrated frame work for identifying sustainable manufacturing layouts based on big data, machine learning, meta-heuristic and data envelopment analysis. *Sustainable Cities and Society*, *62*, 102383. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102383>
- Tompkins, J. A., & Reed, R. (1976). An applied model for the facilities design problem. *International journal of production research*, *14*(5).
- Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. A. (2010). *Facilities planning*. John Wiley & Sons.
- Turner, C. J., Hutabarat, W., Oyekan, J., & Tiwari, A. (2016). Discrete Event Simulation and Virtual Reality Use in Industry: New Opportunities and Future Trends. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, *46*(6), 882–894. <https://doi.org/10.1109/THMS.2016.2596099>
- Vázquez-Román, R., Díaz-Ovalle, C. O., Jung, S., & Castillo-Borja, F. (2019). A reformulated nonlinear model to solve the facility layout problem. *Chemical Engineering Communications*, *206*(4), 476–487. <https://doi.org/10.1080/00986445.2018.1499095>
- Vik, P., Luís, D., Guilherme, P., & Oliveira, J. (2010). Automatic Generation of Computer Models through the Integration of Production Systems Design Software Tools. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, *4*(3–4), 141–148. <https://doi.org/10.1051/ijsmdo/2010018>
- Vitayasak, S., Pongcharoen, P., & Hicks, C. (2017). A tool for solving stochastic dynamic facility layout problems with stochastic demand using either a Genetic Algorithm or modified Backtracking Search Algorithm. *International Journal of Production Economics*, *190*, 146–157. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.03.019>
- Viteri-Viteri, D., Rodríguez-Luna, A., Avilés-Sacoto, S., & Mosquera-Recalde, G. (2021). Using Simulation for Facility Layout Problems: A Case Study of an Ecuadorian Handcraft Chocolate Company. Em J. L. García-Alcaraz, A. Realyvásquez-Vargas, & E. Z-Flores (Eds.), *Trends in Industrial Engineering Applications to Manufacturing Process* (pp. 389–434). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-71579-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-71579-3_17)
- Zha, S., Guo, Y., Huang, S., Wu, Q., & Tang, P. (2020). A hybrid optimization approach for unequal-sized dynamic facility layout problems under fuzzy random demands. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, *234*(3), 382–399. <https://doi.org/10.1177/0954405419883046>
- Zhang, Z., Wang, X., Wang, X., Cui, F., & Cheng, H. (2019). A simulation-based approach for plant layout design and production planning. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, *10*(3), 1217–1230. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0687-5>
- Zuniga, E. R., Moris, M. U., Syberfeldt, A., Fathi, M., & Rubio-Romero, J. C. (2020). A Simulation-Based Optimization Methodology for Facility Layout Design in Manufacturing. *IEEE Access*, *8*, 163818–163828. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3021753>

## Referências

página propositadamente em branco

# Declaração de Integridade

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

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

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

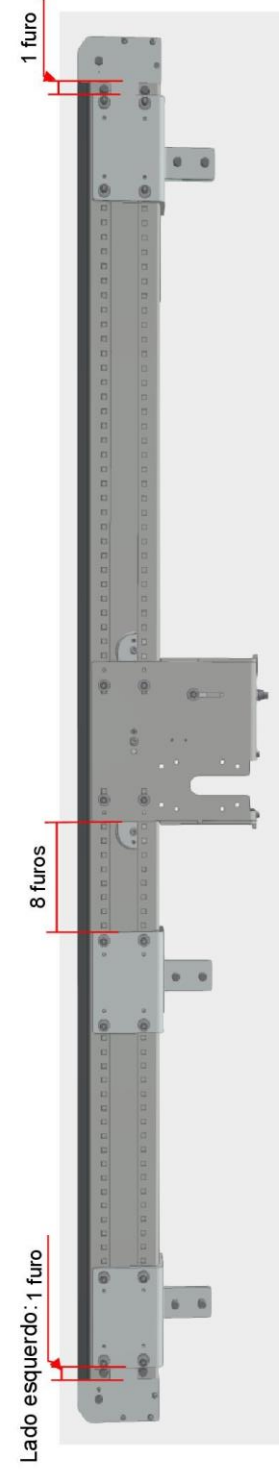
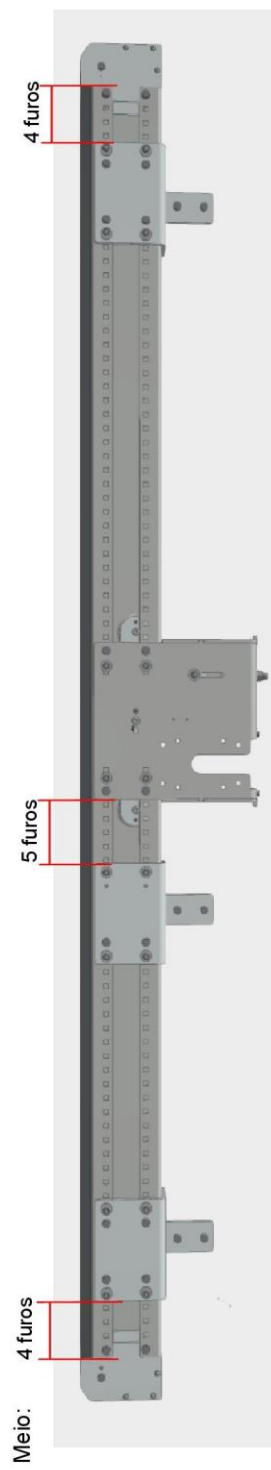
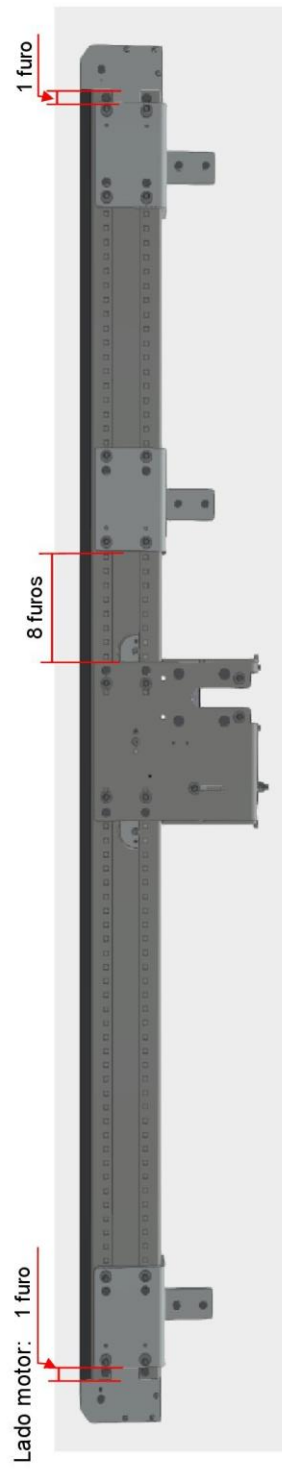
NOME: Alberto Sant'Aubyn Pinho

ISEP, Porto, 8 de setembro de 2024

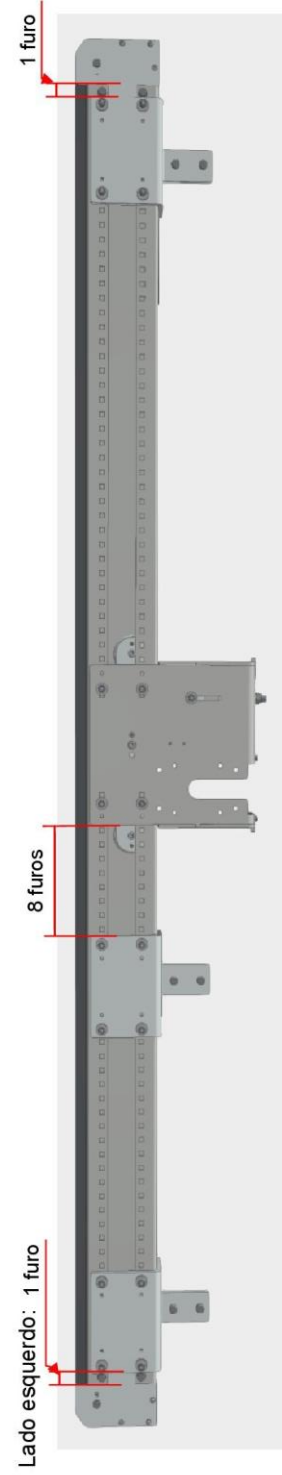
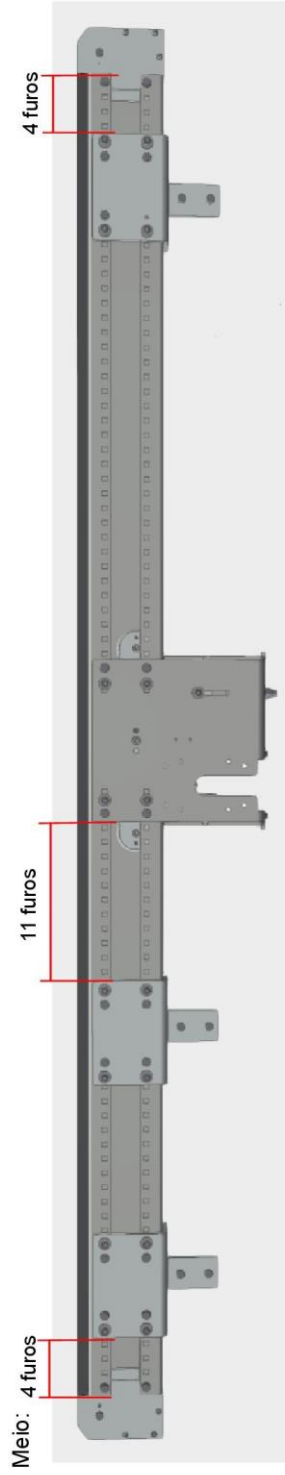
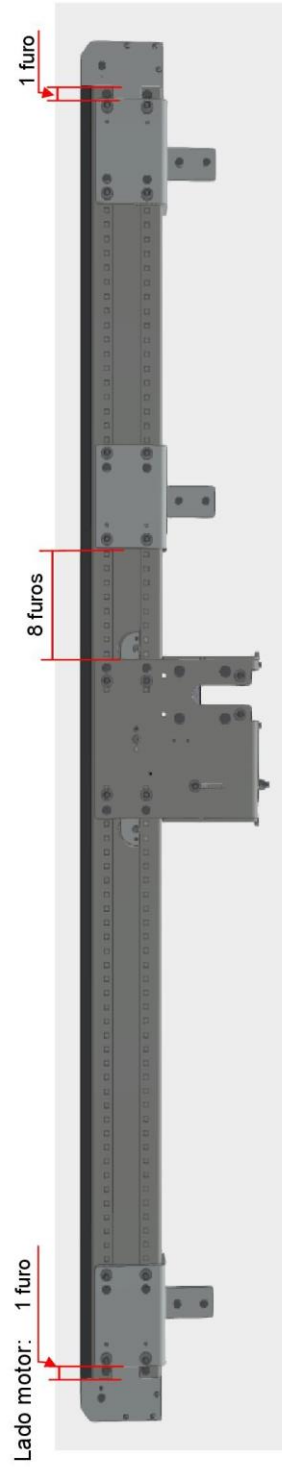
página propositadamente em branco

# Apêndice A

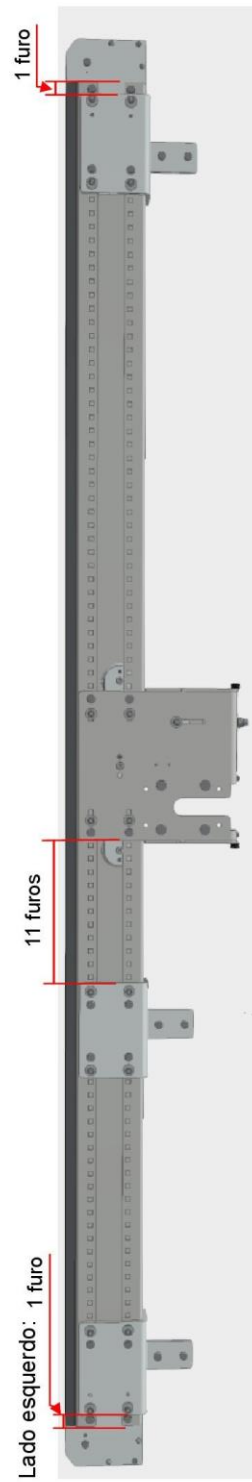
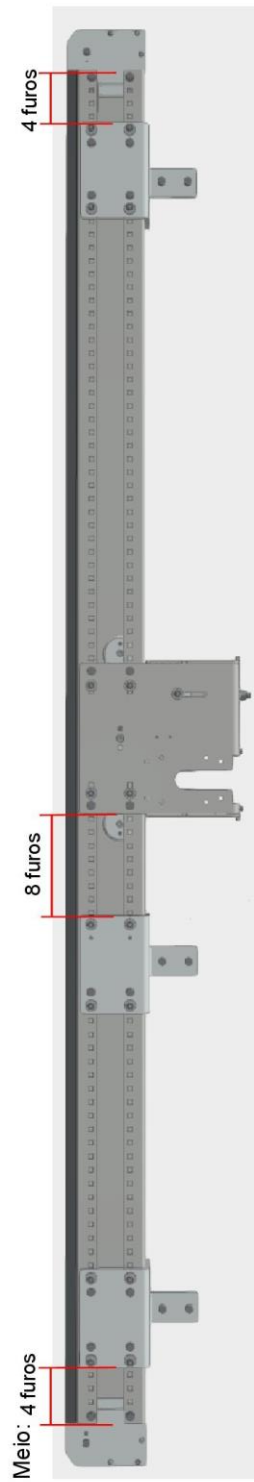
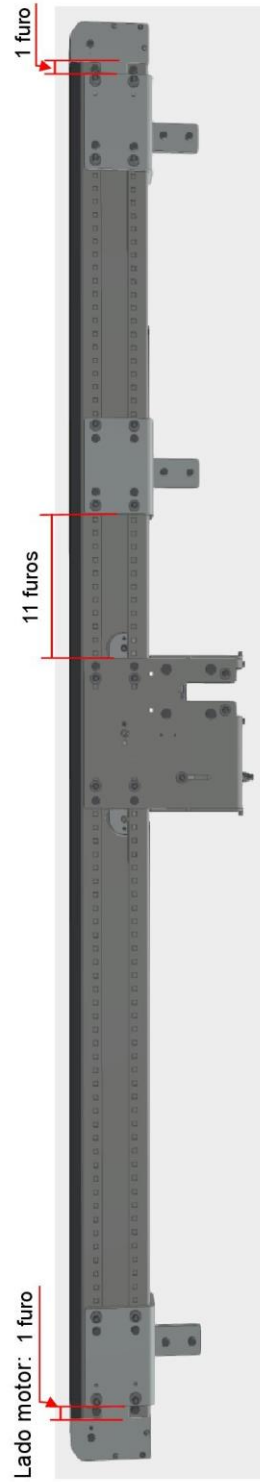
**A239421/120054912**



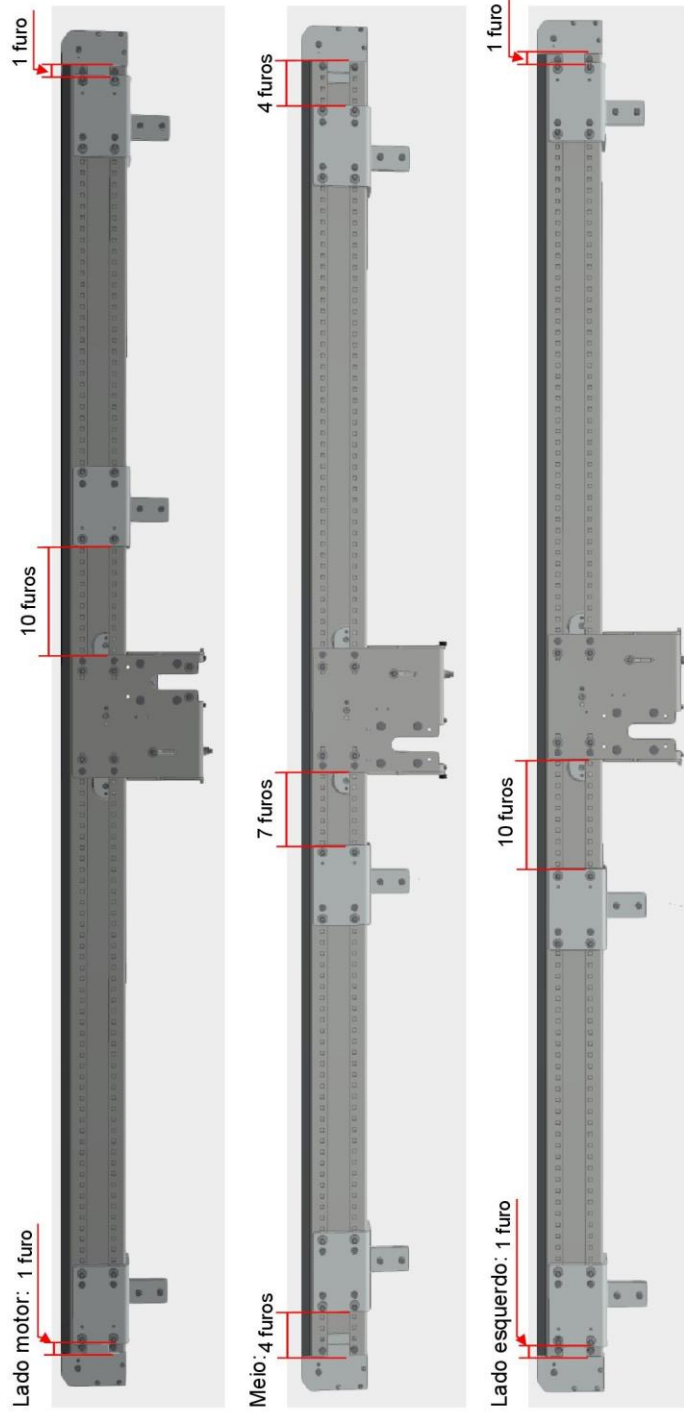
# A239271/120054913



# A239425/120054916

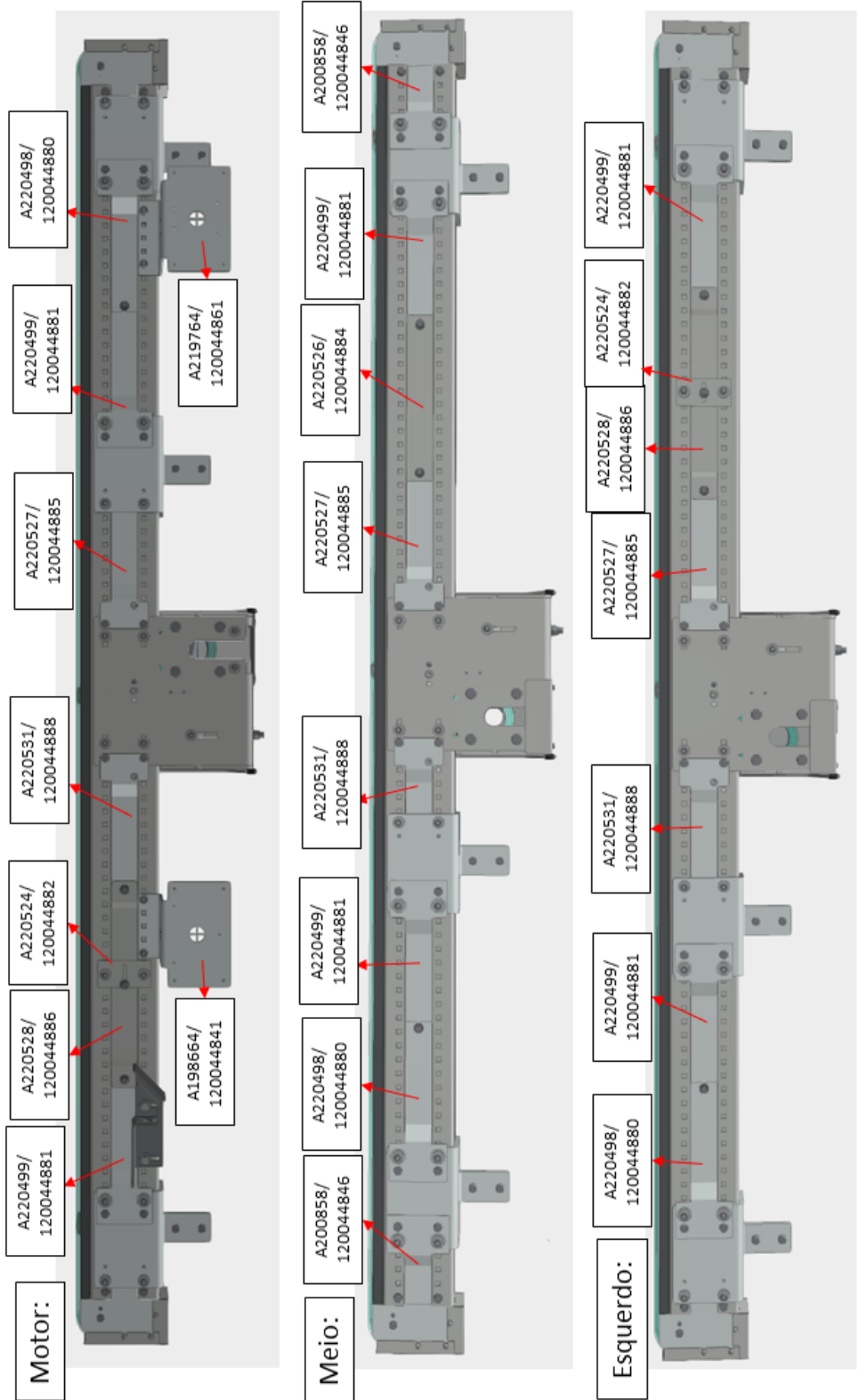


# A239330/120054917

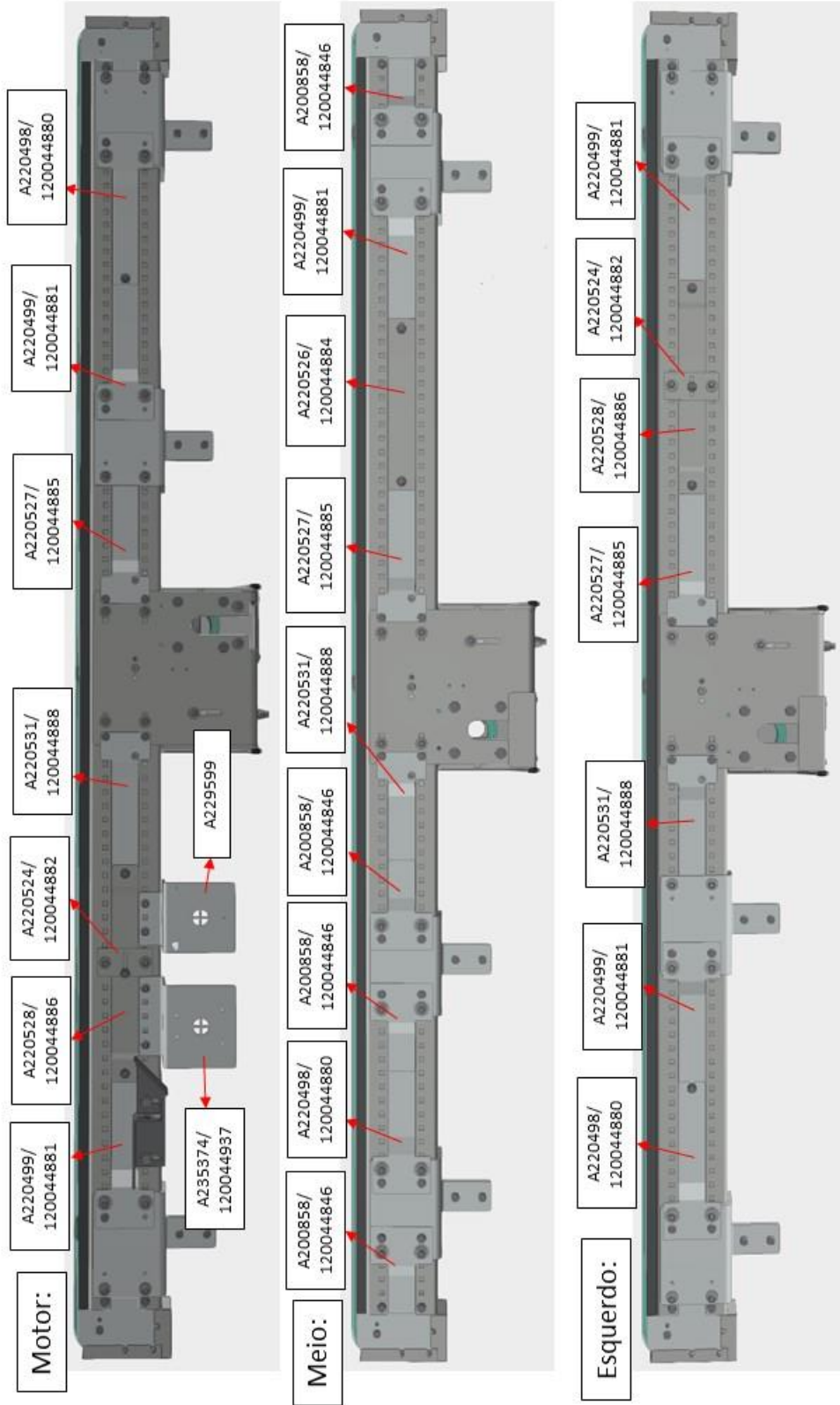


# Apêndice B

## Montagem Blindagens CCV A239421/120054912



# Montagem Blindagens CCV A239271/120054913



# Montagem Blindagens CCV A239425/120054916

