



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

João António Loureiro de Jesus

**MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO PARA O SISTEMA  
DE MANUFATURA *FLOWSHOP* DE PERMUTAÇÃO  
NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de  
Produção e Projeto orientada pelo Professor Doutor Telmo Miguel Pires Pinto e  
apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica**

Julho de 2024



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# **Métodos de Otimização para o sistema de manufatura *flowshop* de permutação na indústria automóvel**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

## **Optimization methods for a permutation flowshop manufacturing system in the automotive industry**

**Autor**

**João António Loureiro de Jesus**

**Orientadores**

**Professor Doutor Telmo Miguel Pires Pinto**

**Doutor David Rodrigo Lourenço Pinheiro**

**Júri**

**Presidente**      Professora Doutora Vanessa Sofia Melo Magalhães  
                         Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Orientador**    Professor Doutor Telmo Miguel Pires Pinto  
                         Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais**            Professor Doutor Miguel Jorge Vieira  
                         Professor Auxiliar da Universidade Lusófona

**Colaboração Institucional**

---



**Huf Portuguesa**

**Coimbra, julho, 2024**

*“Success is not final, failure is not fatal. It is the courage to continue that counts.”*

Winston S. Churchill



## Agradecimentos

Este trabalho é o culminar de um longo e árduo ciclo. É também a prova que com coragem e persistência é possível alcançar os nossos objetivos.

Em primeiro, gostaria de expressar a minha gratidão ao Professor Telmo Pinto, pelo apoio incansável, orientação perspicaz e paciência ao longo deste trabalho.

Agradeço também aos meus colegas da Huf Portuguesa, em especial ao Engenheiro David Pinheiro e ao Engenheiro Jorge Silva, pela confiança e pela ajuda constante que sempre me deram. Adicionalmente, gostaria de agradecer ao departamento de informática, que tão bem me acolheu durante os nove meses que estive na empresa.

Aos meus colegas de curso que me acompanharam ao longo destes anos, obrigado pelas partilhas de ideias e de conhecimento. Ao corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica, pelo ambiente de aprendizagem estimulante.

Aos meus amigos que sempre puxaram por mim e nunca me deixaram desistir. À minha família, pelo suporte incondicional, compreensão e amor. Um obrigado muito especial aos meus pais e à minha irmã. Obrigado por estarem sempre lá quando precisava de apoio. À Ivana, pelo apoio e suporte emocional. Por puxares pelo melhor de mim. Por nunca desistires de mim. Obrigado pelo teu amor. Obrigado pela tua amizade.

A todos os mencionados e aos outros que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

## Resumo

Neste trabalho investigam-se as oportunidades de otimização de uma linha de produção. Inicialmente, foi realizada uma revisão de literatura abrangente, incluindo uma análise das metodologias mais recentes aplicadas na otimização de linhas de montagem e a identificação de lacunas. Com base nesta revisão, foram identificadas linhas inovadoras de investigação no que concerne a linhas “*permutation blocking flowshop line with intermediate limited buffers*”. Foram desenvolvidas três diferentes abordagens de otimização, iterativas, com base na programação inteira mista. Estas abordagens focaram-se em resolver problemas complexos de forma eficiente, aplicando estratégias de decomposição para reduzir a complexidade computacional.

A aplicação prática destas abordagens envolveu a recolha e tratamento de dados reais de produção. Os resultados mostraram melhorias significativas na eficiência da linha de montagem, com reduções notáveis nos tempos de ciclo e de fluxo, destacando a adequabilidade das abordagens desenvolvidas.

Os casos de estudo foram escolhidos para representar diferentes desafios operacionais dentro da linha de produção, na secção crítica da mesma. Cada caso incluía variações nos níveis de automação e na velocidade de deslocação nos *buffers* intermédios, permitindo uma análise detalhada das estratégias de otimização em diversos cenários. Adicionalmente, a análise revelou um problema com a máquina rotativa na linha de montagem. Foi identificado que o aumento da capacidade de caixas do *buffer* intermédio que antecede a máquina poderia melhorar significativamente o desempenho desta máquina, reduzindo os tempos de espera e aumentando a eficiência não só desta máquina, como da linha de produção como um todo.

Este trabalho contribuiu para a integração de modelos de otimização em meio industrial e demonstra que a resolução de problemas reais através da formulação de modelos de programação matemática pode levar a ganhos substanciais de produtividade.

**Palavras-chave:** Indústria Automóvel, Programação Inteira Mista, Investigação Operacional, buffers intermédios finitos, flowshop de permutação, Gurobi



## Abstract

This work explores opportunities for optimizing a production line. Initially, a comprehensive literature review was carried out, including an analysis of the most recent methodologies applied to the optimization of assembly lines and the identification of gaps. Based on this review, innovative lines of research were identified with regard to permutation blocking flowshop lines with intermediate limited buffers. Three different iterative optimization approaches based on mixed integer programming were developed. These approaches focused on solving complex problems efficiently, applying breakdown strategies to reduce computational complexity.

The practical application of these approaches involved collecting and processing real production data. The results showed significant improvements in assembly line efficiency, with remarkable decreases in cycle and flow times, highlighting the suitability of the developed approaches.

The case studies were chosen to represent different operational challenges within the critical section of the production line. Each case included variations in the levels of automation and the speed of movement in the intermediate buffers, allowing for a detailed analysis of the optimization strategies in various scenarios. In addition, the analysis revealed a problem with the rotating machine on the assembly line. It was identified that increasing the box capacity of the intermediate buffer that precedes the machine could significantly improve its performance, reducing waiting times and increasing the efficiency not only of this machine, but of the production line as a whole.

This work has contributed to the integration of optimization models in an industrial environment and demonstrates that solving real problems by formulating mathematical programming models can lead to substantial productivity gains.

**Keywords:** Automotive Industry, Mixed Integer Programming, Operational Research, intermediate finite buffers, permutation flowshop, Gurobi.



## Índice

Índice de Figuras .....	viii
Índice de Tabelas.....	x
Siglas .....	xii
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Objetivo da dissertação .....	2
1.1.1. Metodologia .....	3
1.2. Estrutura da dissertação.....	4
2. Revisão de Literatura .....	5
2.1. Indústria 4.0 e ramo automóvel.....	5
2.2. Categorização e Otimização de uma linha de montagem .....	6
3. Descrição do Problema.....	21
3.1. Huf Group .....	21
3.1.1. Huf Portuguesa – a empresa.....	22
3.1.2. O Projeto .....	24
3.2. Descrição do Problema.....	25
4. Descrição das Abordagens de Resolução.....	29
4.1. Base Teórica.....	29
4.1.1. Introdução.....	29
4.1.2. Componentes da linha de montagem .....	30
4.1.3. Parâmetros e Variáveis de Decisão .....	31
4.1.4. Assunções Gerais das Abordagens.....	31
4.1.5. Relação Iterativa entre Abordagens .....	32
4.2. Formulação das Abordagens ao Problema .....	33
4.2.1. Abordagem I.....	33
4.2.2. Abordagem II .....	36
4.2.3. Abordagem III.....	39
5. Casos de Estudo e Discussão dos Resultados .....	43
5.1. Solver utilizado e Desempenho Computacional .....	43
5.2. Tratamento de dados de Produção .....	43
5.3. Casos de Estudo .....	47
5.4. Apresentação e Discussão dos Resultados .....	49
5.4.1. Caso 1:.....	49
5.4.2. Caso 2:.....	54
5.4.3. Caso 3:.....	59
6. Conclusão.....	65
6.1. Principais contributos.....	65
6.2. Trabalhos Futuros.....	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	67
APÊNDICE A – Questão relativa aos tempos de ciclo.....	71



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ligação entre as diferentes tecnologias da I4.0 [3, 5, 7] .....	6
Figura 2 Diferentes formas de categorizar uma linha de montagem [11, 12, 13].....	7
Figura 3. Categorização do ritmo de produção [11, 12].....	9
Figura 4. Categorização do fluxo de produção [11, 12].....	13
Figura 5. Categorização dos diferentes tipos de solução de problemas de otimização [17]	14
Figura 6. Carteira de clientes da Huf Portuguesa.....	23
Figura 7. <i>Layout</i> da linha de montagem em estudo.....	26
Figura 8. Imagem gerada com AI do posto de abastecimento .....	26
Figura 9. Imagem gerada com AI da fase de codificação mecânica .....	27
Figura 10. Imagem gerada com AI da fase de lubrificação e montagem final .....	27
Figura 11. Imagem gerada por AI da fase de qualidade e embalamento .....	28
Figura 12. Esquema exemplo da Abordagem I.....	33
Figura 13. Esquema exemplo da Abordagem II.....	36
Figura 14. Esquema exemplo da Abordagem III .....	39
Figura 15. (a) – modelo com baixa produção; (b) – modelo que não apresenta distribuição normal .....	44
Figura 16. Exemplo de modelo que passou pelo processo de seleção .....	45
Figura 17. Problema dos dados da máquina rotativa .....	46
Figura 18. Esquema representativo do Caso de Estudo 1 .....	48
Figura 19. Esquema representativo do Caso de Estudo 2 .....	48
Figura 20. Esquema representativo do Caso de Estudo 3 .....	49
Figura 21. Distribuição da produção real e comparação com valores obtidos pelas abordagens, para o caso 1 .....	50
Figura 22. Distribuição da densidade de volume de dados para o caso 1 .....	51
Figura 23. Dados reais de produção para o caso 1 .....	52
Figura 24. Dados obtidos pela abordagem III, para o caso 1 .....	54
Figura 25. Distribuição da produção real e comparação com valores obtidos pelas abordagens, para o caso 2 .....	55
Figura 26. Distribuição da densidade de volume de dados para o caso 2 .....	56
Figura 27. Dados reais de produção para o caso 2 .....	57
Figura 28. Dados obtidos pela abordagem III, para o caso 2 .....	59

---

Figura 29. Distribuição da produção real e comparação com valores obtidos pelas abordagens, para o caso 3 .....	60
Figura 30. Distribuição da densidade de volume de dados para o caso 3 .....	61
Figura 31. Dados reais de produção para o caso 3 .....	62
Figura 32. Dados obtidos pela abordagem III, para o caso 3 .....	63
Figura 33. Histograma dos tempos de ciclo inferiores a 5 minutos, do posto de trabalho 3288 .....	71
Figura 34. Dados reais do tempo de ciclo inferiores a 5 minutos .....	72
Figura 35. Histograma dos tempos de ciclo inferiores a 1 minuto, do posto de trabalho 3288 .....	72
Figura 36. Valores médios do tempo de ciclo de produção para intervalos inferiores a 1 minuto .....	73
Figura 37. Dados do tempo de ciclo no posto 3288, com intervalos inferiores a 30 segundos .....	73
Figura 38. Valores médios do tempo de ciclo de produção para intervalos inferiores a 30 segundos .....	73
Figura 39. Dados do tempo de ciclo no posto 3288, com intervalos inferiores a 20 segundos .....	74
Figura 40. Valores médios do tempo de ciclo de produção para intervalos inferiores a 20 segundos .....	74
Figura 41. Dados do tempo de ciclo no posto 3288, com intervalos inferiores a 15 segundos .....	75
Figura 42. Valores médios do tempo de ciclo de produção para intervalos inferiores a 15 segundos .....	75

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Tempos de computação dos modelos desenvolvidos ..... 43



## Siglas

ABC – Artificial Bee Colony  
ALBP – Assembly Line Balancing Problem  
B&B – Branch and Bound  
BAP – Buffer Allocation Problem  
BFSS – Blocking Flow Shop Scheduling  
CDF – Cumulative Distribution Function  
CPU – Central Processing Unit  
CPS – Cyber Physical System  
CSV – Comma Separated Values  
DPFSS – Distributed Permutation Flow Shop Scheduling  
DP – Dynamic Programming  
DT – Digital Twins  
FFS – Flexible Flow Shop  
FSS – Flow Shop Scheduling  
GA – Genetic Algorithms  
HFS – Hybrid Flow Shop  
HPS – Huf Production System  
I4.0 – Indústria 4.0  
I5.0 – Indústria 5.0  
IIoT – Industrial Internet of Things  
IOP – Iterative Optimization for Parameters  
IP – Integer Programming  
JSS – Job Shop Scheduling  
LP – Linear Programming  
MILP – Mixed Integer Linear Programming  
ML – Machine Learning  
OEM – Original Equipment Manufacturers  
PFSS – Permutation Flow Shop Scheduling  
PMS – Parallel Machine Scheduling

SA – Simulated Annealing

SM – Smart Manufacturing

SMT – Surface Mount Technology

TS – Tabu Search

VNS – Variable Neighborhood Search



## 1. INTRODUÇÃO

Desde a primeira revolução industrial no século XVIII, a indústria tem atravessado uma série de transformações significativas. A primeira revolução industrial trouxe motores a vapor que substituíram o trabalho humano e animal, enquanto a segunda introduziu a produção em massa e os sistemas ferroviários, diminuindo as distâncias e globalizando os mercados. A complexidade e o alto capital necessário para implementar a indústria ferroviária de forma eficiente, motivou o nascimento de metodologias de controlo, sugeridas por Frederick Taylor, que revolucionaram os métodos de trabalho e formaram a base para a produção em massa, contribuindo significativamente para a indústria em geral. Outra invenção importante desta revolução, foi o surgimento das linhas de montagem (Ford, 1913). Foram criados produtos inovadores, potenciando o surgimento de novas indústrias, entre elas, a indústria automóvel (Mercedes-Benz, 1886; Huf group, 1908).

A terceira revolução foi marcada pela transição de sistemas analógicos para digitais, como os computadores, autómatos e sistemas de telecomunicações. Esta foi evoluindo gradualmente com a evolução dos computadores, reinventou-se com o aparecimento da internet e chegou ao auge com a invenção dos *smartphones* e de sistemas de comunicação *wireless*. Na indústria, a internet permitiu uma melhor colaboração interpessoal e organizacional, graças à habilidade de conectar pessoas em qualquer ponto do mundo e à partilha de informação em tempo real e permitiu conectar com maior facilidade os clientes às empresas, possibilitando obter informação de como melhorar os produtos de acordo com a procura de forma mais eficaz. Foi nesta revolução que se iniciou o estudo e desenvolvimento da automação e robótica, que se tornaram elementos imprescindíveis na indústria moderna.

Uma das grandes vantagens da revolução digital é a capacidade de aceder e analisar grandes quantidades de dados, permitindo otimizar sistemas existentes, melhorar a qualidade e identificar áreas que precisem de ser melhoradas. Estes avanços fomentaram a base para a quarta revolução industrial, onde a convergência entre tecnologias digitais e físicas está a remodelar a maneira como os produtos são concebidos, produzidos e distribuídos.

Atualmente, estamos a vivenciar a era da Indústria 4.0 (I4.0), revolucionária pois integra a análise em tempo real dos dados gerados pelos processos de produção, através da

aplicação do conceito “*Industrial Internet of Things*” (IIoT). A interconexão de máquinas e sistemas numa linha de montagem, facilitada pelo uso de sensores, permite uma maior automação e eficiência. Por outro lado, permite testar ferramentas de otimização em ambientes virtuais (*Digital Twin*), que se traduz numa maior flexibilidade e adaptabilidade às mudanças de mercado e às necessidades dos consumidores. No entanto, a análise eficaz dos dados extraídos e a aplicação de subseqüentes estratégias de otimização ainda são desafios pendentes e atuais. A transição para a Indústria 5.0 (I5.0) que, segundo alguns especialistas, já está a acontecer, foca-se na colaboração entre humanos e máquinas inteligentes, elevando a personalização e a sustentabilidade na produção, e respondendo alguns dos desafios remanescentes da Indústria 4.0 (I4.0).

Esta dissertação de mestrado insere-se no contexto da transição da Indústria 4.0 (I4.0) para a Indústria 5.0 (I5.0), cujo foco é desenvolver abordagens de programação linear, que formulem a problemática complexa nas operações subjacentes a linhas de montagem. Estas abordagens, apesar de serem abstratas, servem como uma representação precisa dos processos de produção, permitindo soluções ótimas baseadas em dados com mínima intervenção humana e em tempo aceitável, impulsionando a eficiência e a automação nas linhas de montagem.

## **1.1. Objetivo da dissertação**

Esta dissertação de mestrado enquadra-se num projeto mais abrangente na Huf Portuguesa, representando uma oportunidade para abordar desafios críticos na otimização de processos industriais. Motivada pela necessidade de aprimorar a eficiência operacional da linha de montagem – um elemento-chave para manter a competitividade num mercado dinâmico – este trabalho de investigação foca-se no desenvolvimento de abordagens baseadas em modelos de programação linear inteira mista. Estas abordagens são projetadas para modelar a realidade complexa e multifacetada de linha de montagem.

A aplicação de modelos de otimização no contexto real de produção é crucial, pois estes fornecerão a base para implementar soluções com vista à melhoria da eficiência operacional na Huf Portuguesa.

Além do impacto prático, esta dissertação possui relevância científica, contribuindo com abordagens assentes em otimização, que podem ser utilizadas noutros contextos industriais. Este trabalho não atende apenas às necessidades específicas da Huf Portuguesa, mas também oferece uma perspetiva inovadora para a comunidade académica, expandindo o conhecimento e as técnicas disponíveis na otimização de processos industriais.

Esta dissertação estabelece também as bases para futuras aplicações e desenvolvimentos num âmbito mais amplo do projeto. Apesar de este trabalho se focar na criação de modelos matemáticos para a otimização da linha de montagem, ele também abre caminho para inovações subsequentes no projeto da empresa, cujas diretrizes de otimização incluem a minimização do número de operadores e a maximização da eficiência do chão de fábrica. O objetivo final desse projeto é o de desenvolver um “*Cyber Physical System*” (CPS) avançado com algoritmos de “*Machine Learning*” (ML) para otimização em tempo real.

### **1.1.1. Metodologia**

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada, seguindo três áreas principais de análise: aprofundamento do conhecimento no tema, desenvolvimento de abordagens de otimização adequadas ao problema, e recolha de dados de produção reais para uma abordagem de otimização orientada por dados. A revisão bibliográfica inicial procurou estabelecer uma base de conhecimento, explorando desde inovações recentes na indústria automóvel até conceitos específicos da indústria 4.0 (I4.0), como “*Cyber-Physical Systems*”, automatização e análise de dados, estendendo-se às diversas estratégias de otimização e configurações de linhas de montagem. Esta fase foi crucial para compreender as tendências atuais e as metodologias de resolução utilizadas tanto no meio académico como no industrial, identificando lacunas de conhecimento e delineando uma abordagem competitiva e atualizada para a resolução do problema.

A fase de análise de dados focou-se na recolha e processamento de dados reais de produção ao longo de três semanas, o que permitiu a obtenção de intervalos temporais de produção real. Este processo foi fundamental para fornecer um ponto de comparação fidedigno entre os resultados das abordagens de otimização desenvolvidas e a da produção real, possibilitando uma avaliação mais precisa da viabilidade das abordagens propostas.

Posteriormente, a abordagem ao problema foi implementada através da utilização de vários modelos de programação matemática, começando por uma representação simplificada do problema e evoluindo para uma que refletisse de uma forma cada vez mais próxima das condições reais da linha de montagem. As abordagens foram desenvolvidas utilizando a linguagem de programação *Python*, com o apoio da biblioteca *PuLP*, e o solver *GUROBI*, que foi utilizado para encontrar soluções exatas.

Esta metodologia detalhada e incremental garantiu um entendimento dos desafios enfrentados e estabeleceu uma base para a proposta de soluções ótimas.

## **1.2. Estrutura da dissertação**

Esta dissertação divide-se em seis capítulos principais, cada um desenvolvido nas diferentes etapas de conceção da mesma.

No capítulo 2 desenvolve-se a revisão bibliográfica, segundo a metodologia indicada anteriormente. A literatura existente sobre a Indústria 4.0 (I4.0) e as estratégias de otimização de linhas de montagem foi analisada. Este capítulo serve para contextualizar a pesquisa no panorama atual de inovações industriais e desenvolvimentos tecnológicos mais recentes. No capítulo 3 apresenta-se a empresa Huf Portuguesa juntamente com o problema proposto. Descreve-se a linha de montagem em análise e identificam-se os pontos chave do problema. No capítulo 4 desenvolvem-se os modelos de programação linear sugeridos. Discute-se a fundamentação teórica para o desenvolvimento e a sua aplicabilidade prática. No capítulo 5 inicia-se com uma descrição detalhada da seleção e tratamento de dados, seguindo uma abordagem orientada por dados na otimização de processos de produção. Segue-se uma comparação entre os resultados obtidos pelas abordagens de programação linear mista e os dados reais de produção, feita através de vários casos de estudo. Por fim, discutem-se os resultados obtidos. O capítulo 6 conclui a dissertação, sugerindo linhas para o trabalho futuro e resumindo os principais contributos da dissertação no contexto da empresa.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Indústria 4.0 e ramo automóvel

A indústria automóvel é um ramo empresarial muito competitivo, onde a qualidade do produto é o requisito mínimo e a necessidade de evolução é imperativa. Neste momento, a indústria está a passar por uma transformação significativa com a transição da Indústria 4.0 (I4.0) para a indústria 5.0 (I5.0), enfrentando desafios como mudanças na demanda dos consumidores, disrupções na cadeia de fornecimento e escassez de microchips, exacerbados pela pandemia de COVID-19 [1, 2]. Esta nova era destaca-se pela incorporação de tecnologias como a "*Industrial Internet of Things*" (IIoT), automação avançada e a "*Big Data*", redefinindo a produção com mais eficiência, flexibilidade e personalização [1, 2, 3, 4, 5]. Na transição do "*Big Data*" para "*Smart Data*", em [5] destacado como o foco na "*Smart Data*", enfrentando desafios como escalabilidade e segurança, o que é crucial para tornar os dados mais acessíveis e úteis nas empresas, potencializando a eficiência da produção.

A convergência entre as tecnologias relativas à I4.0 com a "*Smart Data*" deu origem ao conceito de "*Smart Manufacturing*" (SM), que coloca a análise eficiente dos dados no centro do processo de produção. A evolução da SM é marcada por um progresso sequencial de paradigmas. Em [6] é discutida esta progressão, sublinhando a integração de tecnologias de Inteligência Artificial em sistemas de SM demonstrando, uma vez mais, a capacidade da indústria em se inovar e reinventar face aos desafios do mercado. Este desenvolvimento é complementado por modelos híbridos que combinam abordagens físicas e baseadas em dados, conforme explorado em [7].

Em [2, 8, 9], os "*Cyber Physical Systems*" (CPS) e o "*Digital Twin*" (DT) são destacados como tecnologias emergentes. Estes sistemas permitem simulações de processos de manufatura em tempo real, possibilitando testes de melhorias sem impactar a produção física. Estas ferramentas aplicam as ferramentas clássicas de otimização, num sistema virtual, gémeo da linha física, possibilitando uma análise dinâmica e constante, tornando-as indispensáveis para a indústria moderna. Embora estes sistemas ofereçam vantagens significativas, a criação dos mesmos não é trivial, pois requer um conhecimento profundo

da linha de montagem física, bem como competências avançadas em programação, investigação operacional e outras áreas técnicas. Em [1, 2], a importância destas tecnologias para que a indústria automóvel se mantenha competitiva.

A integração de tecnologias avançadas é fundamental para a SM. [4] discute a importância da IIoT na SM, especialmente quando integrado com um CPS para o controlo em tempo real dos processos de produção. Paralelamente, [10] demonstra como *machine learning* (ML) facilita a análise de grandes volumes de dados, essencial para a integração de tecnologias complexas como os DT e CPS. Além disso, em [1, 6] é explorada a aplicação de sistemas de localização em tempo real em DT e a criação de CPS impulsionados pela existência de DTs. Na Figura 1 representam-se as relações entre os termos descritos em cima.

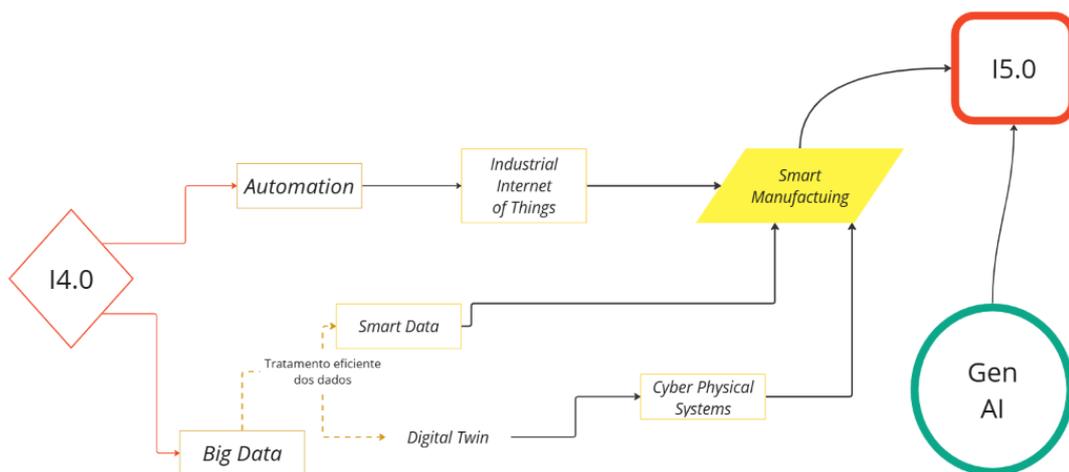
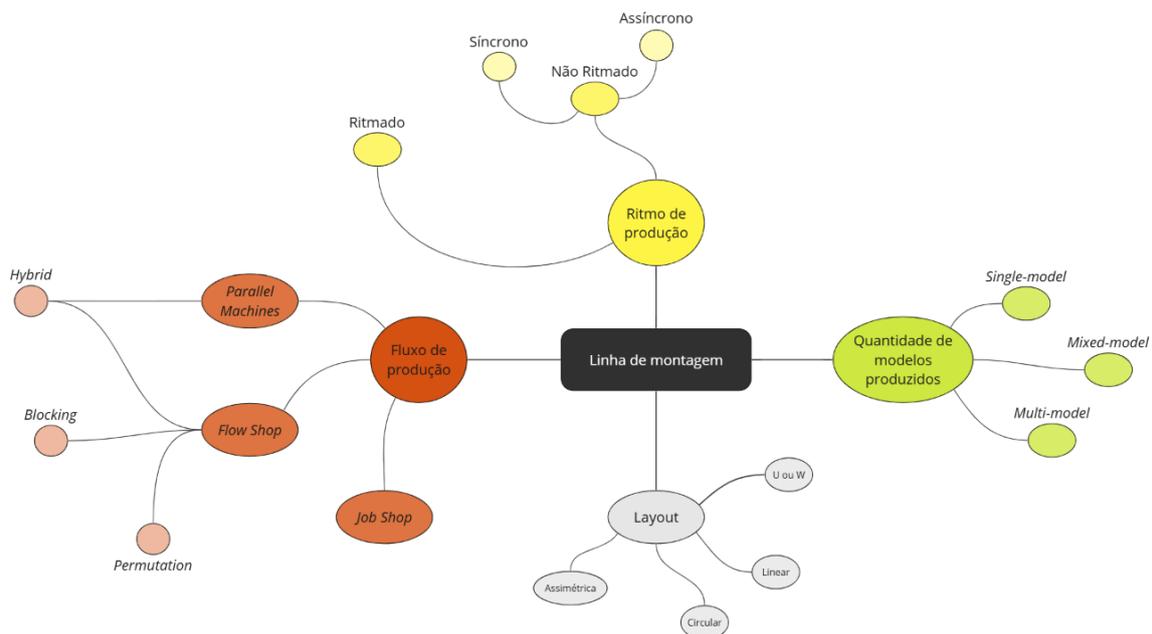


Figura 1. Ligação entre as diferentes tecnologias da I4.0 [3, 5, 7]

## 2.2. Categorização e Otimização de uma linha de montagem

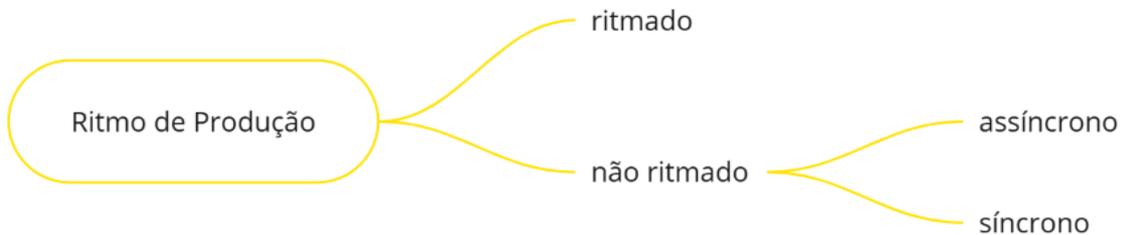
Existem diversas formas de categorizar uma linha de montagem [11, 12]. Pode-se categorizar conforme o ritmo de produção (ritmada ou não ritmada); quanto ao número de modelos produzidos na linha (único, misto ou multi); quanto ao layout (linear, em "U", em "W", circular ou assimétrica) e quanto à sequência de produção (máquinas paralelas, fluxo contínuo de produção - *flow shop*, produção sob encomenda - *job shop*). Na Figura 2, representam-se as diferentes formas de categorizar uma linha de montagem.



**Figura 2** Diferentes formas de categorizar uma linha de montagem [11, 12, 13]

Numa linha de montagem ritmada (Figura 3), existe um ciclo de trabalho (*cycle time*) comum para todos os postos de trabalho, o que restringe o tempo de processamento dos mesmos. O ritmo de produção é mantido através de um dispositivo de transporte, que transporta o material a produzir ao longo de todos os postos (tapete de transporte/operador), onde o artigo a produzir nunca para (o que obriga que o processamento dentro de um posto seja concluído antes que o artigo chegue ao final do mesmo), ou através de um transporte intermitente, onde o transporte do artigo é travado para ser processado e é libertado ao fim de um intervalo de tempo determinístico. Se o transporte de artigos a produzir for contínuo, então o comprimento de cada posto de trabalho tem de ser definido tendo em conta o balanceamento da linha. Se o comprimento de um posto multiplicado pela velocidade do tapete de transporte exceder o ciclo de trabalho, o intervalo de tempo a mais pode ser usado para compensar desvios do tempo de processamento provocados por variações no modelo a produzir ou por variações estocásticas.

Por outro lado, numa linha não ritmada, os artigos a produzir só são libertados de um posto de trabalho quando as operações de processamento dos mesmos num posto são concluídas, em vez de serem impostas por uma constante temporal. Uma linha não ritmada pode ser subdividida em linha não ritmada síncrona ou assíncrona. Numa linha síncrona, todos os postos esperam que o posto mais lento termine o processamento antes de libertar os artigos, fazendo com que todos os artigos sejam libertados e transferidos ao mesmo tempo. Caso os tempos de processamento sejam determinísticos, então uma linha de montagem deste tipo pode ser equiparada a uma linha ritmada com transporte intermitente, uma vez que o ciclo de trabalho de todos os postos passa a ser dado pelo posto mais lento. No caso de uma linha de montagem não ritmada assíncrona, um artigo é libertado assim que conclui o processamento dentro de um posto de trabalho e caso o posto de trabalho que o sucede não esteja bloqueado por outro artigo. Após libertar o artigo, o posto de trabalho fica disponível para processar o próximo artigo. Idealmente, deve estar já um artigo em espera para ser processado, de modo a minimizar o tempo que um posto de trabalho fica sem processar. De modo a minimizar os tempos "mortos" de um posto de trabalho, são instalados buffers - tapetes de transporte com capacidade limitada - entre os postos de trabalho, que podem armazenar temporariamente artigos a produzir. Assim, a configuração de uma linha de montagem deste tipo deve não só determinar o balanceamento da linha, como também determinar a alocação correta da capacidade de armazenamento de cada buffer. A análise deste tipo de linha de montagem revelou um efeito interessante chamado de "*bowl phenomenon*". Este fenómeno demonstra que a cadência de produção pode ser otimizada caso a capacidade de armazenamento dos buffers no centro da linha de montagem seja aumentada.



**Figura 3.** Categorização do ritmo de produção [11, 12]

Quanto ao número de modelos produzidos na linha, existem três definições diferentes. Em linhas de um modelo único (*single-model lines*), apenas é produzido um produto homogêneo. O conjunto de tarefas de processamento a serem aplicadas ao modelo são conhecidas. Cada posto é responsável por um subconjunto dessas tarefas, cujo tempo de processamento do mesmo é igual para todos os artigos. Em linhas de vários modelos similares entre si (*mixed-model lines*), existem diversos modelos que derivam de uma só "família" de artigos, para serem processados na mesma linha de montagem. A sequência de produção e o conjunto de tarefas a serem aplicadas a cada modelo são muito similares ao produto "pai", uma vez que diferem apenas em algumas características ou atributos. Portanto, o conjunto de tarefas a processar devem ser divididas conforme o subconjunto do modelo a que devem ser feitas, por cada posto de trabalho. O número de diferentes subconjuntos de tarefas em cada posto de trabalho corresponde ao número de modelos a produzir na linha. No caso de linhas que produzem diversos modelos diferentes entre si (*multi-model lines*), diversos modelos são produzidos em conjuntos separados. Neste caso, a linha deve ser rebalanceada para cada conjunto e os tempos de *setup* devem ser considerados entre conjuntos.

Quanto ao *layout* das linhas de montagem, isto é, como estão instaladas espacialmente, existem diversas configurações. Configuração linear: é o layout mais básico de uma linha de montagem, onde os postos de trabalho são instalados linearmente; configuração em "U", ou "W": nestes layouts, tanto o primeiro como o último posto de trabalho estão virados para o

mesmo lado. Este tipo de layout observa-se, geralmente em linhas com restrições espaciais (área disponível para a instalação da mesma é limitada), mas também é muito comum em linhas manuais, pois permite que os operadores se desloquem entre postos de trabalho de forma eficiente, otimizando a força de trabalho em linha; configuração circular: os postos de trabalho são instalados numa mesa-redonda, com transporte intermitente e circular sendo muito comum em subconjuntos responsáveis pelos controlo e qualidade. configuração assimétrica: normalmente usada para minimizar as diferenças entre as unidades a produzir, de modo a manter uma configuração de linha comum a todas as unidades a produzir, sempre que possível. Esta estratégia reduz os riscos associados a personalização de modelos, mas implica que o balanceamento da linha seja levado a cabo em conjunto com a otimização do layout, de modo a determinar a configuração final da linha de montagem.

As definições apresentadas em cima são geralmente analisadas aquando do planeamento da instalação de uma linha de montagem. Existem duas áreas de investigação que pretendem otimizar e melhorar a forma como uma linha de montagem é instalada - *Assembly Line Balancing Problems* (ALBP) e *Buffer Allocation Problems* (BAP) - duas áreas chave na engenharia de processos industriais, deixando o seu marco na procura de sistemas de produção eficientes.

Em [13], os autores pretendem diminuir a distância entre os problemas industriais e os problemas analisados de balanceamento até então. O trabalho [11] pretende dar aos leitores exemplos concretos de que tipo de solução de balanceamento se deve utilizar, conforme seja o tipo de linha de montagem em estudo. Os autores pretenderam apresentar um modelo flexível, capaz de se adaptar à natureza multifacetada das linhas de montagem encontradas na indústria, fazendo com que o mesmo trabalho sirva como um guia para a seleção de um modelo que melhor se adegue a cada linha de montagem. O trabalho [12] classifica diferentes tipos de problemas de balanceamento aplicados a contextos industriais, oferecendo uma taxonomia que abrange vários critérios de otimização. O trabalho foi escrito após analisar cerca de 300 estudos, realçando os pontos importantes a ter em conta quando se resolve problemas deste género, como o tipo de tarefas de processamento, diferentes postos de trabalho, variáveis de decisão, objetivos de otimização, etc.

Dentro da área de BAP, o trabalho [14] analisa uma linha de montagem com restrições espaciais, trazendo limitações quanto à capacidade dos buffers. Os autores propõem heurísticas inovadoras para otimizar a linha tendo em conta estas restrições, enfatizando a

importância da escolha de uma gestão eficiente dos buffers para melhorar a eficiência da linha de montagem. Por outro lado, em [15] estuda-se a complexidade de um BAP quando aplicado a uma linha de montagem com postos de trabalho não confiáveis - isto é, com tempos de processamento não determinísticos ou suscetíveis a falhas. Os autores provam que o problema é *NP-hard*, realçando os desafios na otimização de problemas deste tipo, tão comuns na realidade industrial. Em [16] os autores exploram diversas estratégias para otimizar a capacidade dos buffers, propondo uma nova política de alocação, chamada de "*echelon buffer policy*", com foco no potencial desta estratégia quando comparada com as opções tradicionais. Este trabalho abre as portas para mais inovações relativas a BAP para otimizar a performance de produção de uma linha de montagem.

Quanto à categorização relativa à sequência de produção, (Figura 4), existem três configurações base: produção em máquinas paralelas; produção em fluxo contínuo; e produção sob encomenda, de acordo com [17].

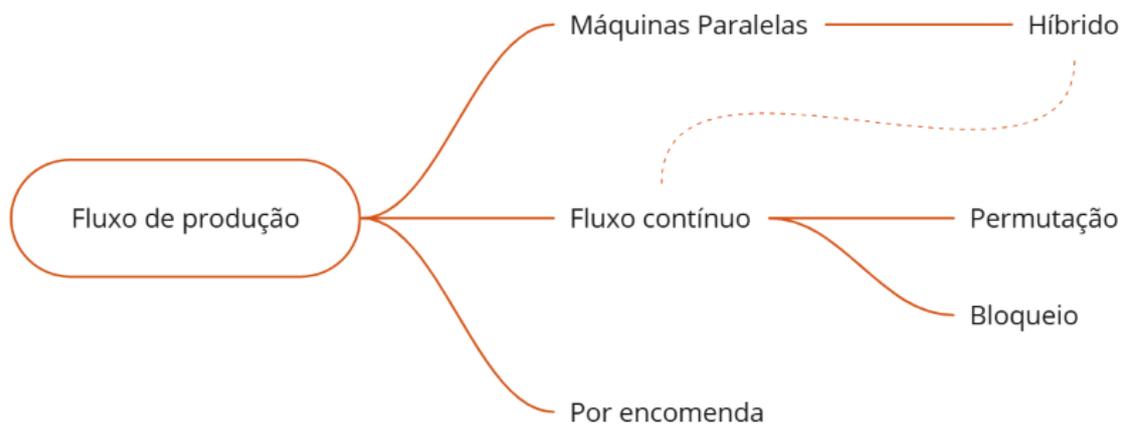
Produção em máquinas paralelas (PMS - *parallel machine scheduling*) combina decisões de sequenciamento de produção com decisões de alocação de recursos. Este domínio é distinguido pela alocação de tarefas por vários postos de trabalho, idênticos entre si, de modo a minimizar o final do processamento de todos os artigos, vulgarmente chamado de "*makespan*". Na sua essência, requer uma distribuição estratégica de artigos por postos, de modo a garantir uma sequência de produção eficiente, usualmente através de algoritmos desenvolvidos para prioritarizar tarefas com base no tempo de processamento ou outros fatores críticos.

A Produção em fluxo contínuo (FSS - *flow shop scheduling*) é um tipo de sequência de produção muito utilizado na indústria, em particular para grandes volumes de produção. Os postos de trabalho estão organizados de acordo com a sequência de produção, obrigando os artigos a movimentarem-se entre os postos, progredindo sob uma série de operações, desde o início até ao final. Esta configuração obriga cada artigo a ser decomposto num conjunto de operações de processamento distintas, onde cada uma é executada num posto específico, sob uma ordem de processamento pré-determinada. O objetivo principal é minimizar o tempo total de produção, que pode ser atingido minimizando o tempo que um artigo permanece dentro de um posto de trabalho. Existem vários subtipos desta categoria, dos quais se destacam os cenários de permutação (PFSS - *permutation flowshop*) e bloqueio (BFSS - *blocking flowshop*). PFSS significa que a ordem de processamento é fixa e constante

para todos os artigos a produzir. Para além disso, revela a importância da sequência entre artigos ao longo da linha, pois garante que a ordem de produção entre artigos é mantida ao longo da linha de montagem - o primeiro artigo a entrar dentro de um posto ou buffer é o primeiro a sair do mesmo. Foram encontrados poucos artigos recentes sobre este tema, pois uma solução genérica para este problema foi desenvolvida no século XX, resultando numa estabilização das pesquisas nesta área específica. Há um subtipo desta organização de produção que tem ganho interesse nos últimos anos, DPFSS – *Distributed Permutation Flowshop*, que lida com a otimização da distribuição de trabalhos em múltiplas fábricas, cada uma seguindo uma ordem específica de operações, com o objetivo de melhorar a eficiência global de produção. BFSS considera as situações em que o processamento de um artigo num posto bloqueia o processamento do artigo seguinte, pois cada posto processa somente um artigo de cada vez. Este bloqueio irá influenciar a eficiência de produção, pelo que deve ser evitado - usualmente pela adição de tapetes de transporte com capacidade limitada de armazenamento (*buffers*). Um subtipo de produção em fluxo contínuo que tem ganho relevância nos últimos anos é o “*Hybrid Flowshop*” (HFS). Trata-se de uma variação do *classic flowshop* onde a sequência de processamento continua a ser pré-determinada, mas pelo menos uma tarefa pode ser executada por máquinas paralelas. Em vez de considerar postos de trabalho fixos para processar um conjunto de tarefas, o HFS considera que existem múltiplas máquinas paralelas disponíveis para efetuar o processamento em pelo menos um dos postos de trabalho. A otimização desta sequência passa por escolher qual máquina utilizar de modo a minimizar o *makespan*. “*Flexible Flowshop*” (FFS) é uma variação do HFS, onde múltiplas máquinas paralelas estão disponíveis para processar tarefas, mas apenas uma é escolhida, mantendo a sequência de produção em série, permitindo flexibilidade na escolha da máquina.

Produção sob encomenda (JSS - *job shop scheduling*) representa um desafio complexo na otimização dos processos de produção. Difere do fluxo de produção contínuo pois, neste caso, o fluxo de produção não é nem linear nem unidirecional. Cada artigo passa por diferentes postos de trabalho e cada artigo tem diferentes estruturas de precedência. Esta configuração permite uma sequência de produção mais flexível, possibilitando uma diversa gama de cenários de produção. Nesta configuração, não existe uma ordem pré-definida de produção e cada artigo pode até passar pelo mesmo posto diversas vezes. A complexidade da otimização desta configuração é incrementada pela necessidade de compactar a produção

o máximo possível, de modo a minimizar o *makespan*, prevendo e evitando situações de sobreposição de tarefas de um posto e tendo em conta as restrições de precedência para cada posto.



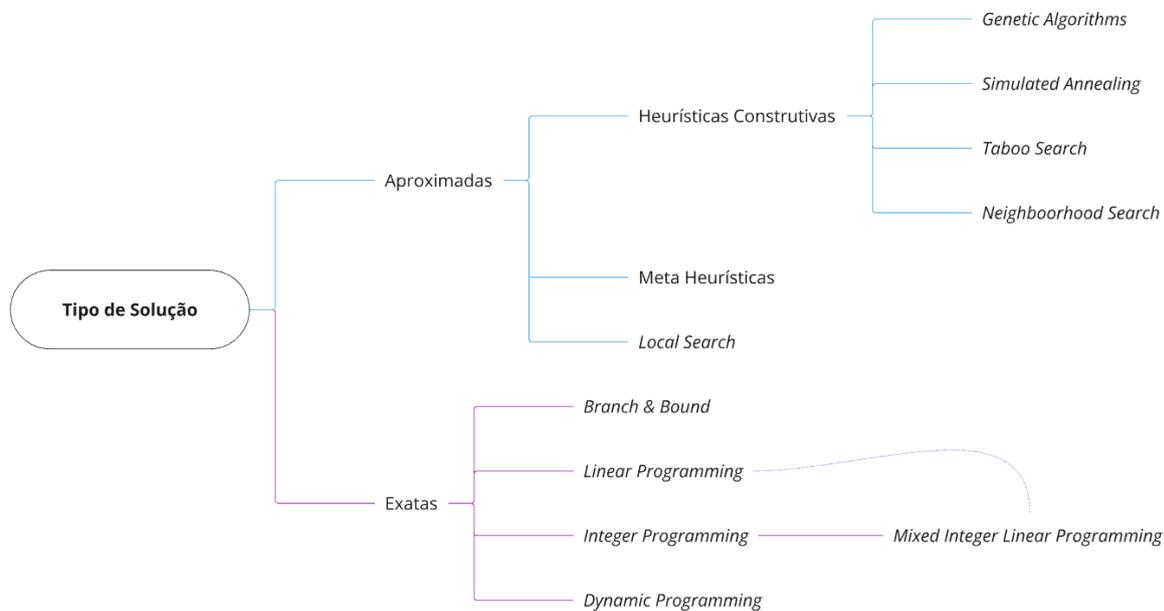
**Figura 4.** Categorização do fluxo de produção [11, 12]

Recentemente, tem sido dado ênfase ao conceito de linha de montagem virtual. Este conceito não é dependente do tipo de configuração da linha de montagem, pelo que pode ser aplicado para qualquer configuração de linha. As vantagens deste conceito estão interligadas com a possibilidade de simular a produção de uma linha de montagem real, com óbvios benefícios quanto ao planeamento e otimização da mesma linha, sem prejudicar a produção na linha real.

Em [18], os autores investigaram o quanto a situação de bloqueio aumentava a dificuldade de otimização de um problema de *flow shop*, enquanto em [19] fizeram uma revisão a cerca de 140 artigos publicados entre 1969 e 2019 sobre este tema, agregando as diferentes soluções propostas para esta situação. Uma parte significativa dos artigos revistos (62%) concentraram-se em problemas de minimização do *makespan*, seguido pela minimização do tempo que os artigos ficam dentro dos postos e por funções objetivo estocásticas. Em [20], foca-se em otimização de uma linha de montagem que contém características quer de permutação como de bloqueio. Os autores propõem uma meta heurística para minimizar o tempo total de produção. O trabalho [21], mais recente, propõe a otimização de uma BFSS com BAP, ao mesmo tempo. Os autores reconhecem a dificuldade NP-hard do problema de otimização, pelo que propõem um método de

decomposição inovador, abrindo caminho para novas formas de resolver problemas deste tipo, comuns a vários sistemas de produção modernos.

Até agora, foram apresentados e discutidos problemas de otimização nas diferentes configurações de linha de montagem. As abordagens para a sua resolução (Figura 5) baseiam-se em, essencialmente, dois grandes grupos: abordagens exatas e aproximadas [17].



**Figura 5.** Categorização dos diferentes tipos de solução de problemas de otimização [17]

As soluções exatas são aquelas que garantem a obtenção de uma solução ótima para o problema, satisfazendo todas as restrições impostas. Essas soluções são fundamentais quando é necessário assegurar o cenário ótimo, especialmente em situações críticas ou de alta precisão. Classificam-se como tais porque seguem metodologias rigorosas capazes de explorar sistematicamente o espaço de soluções até encontrar a melhor.

Programação dinâmica (DP - *dynamic programming*) é uma técnica de otimização muito versátil, recomendada para resolver problemas de otimização que possam ser divididos em subproblemas mais simples. Este método foca-se na decomposição do problema principal em subproblemas menores, permitindo uma análise detalhada das decisões de otimização em cada etapa, com base no princípio de otimalidade. Este tipo de programação é particularmente eficaz em problemas de sequenciamento com funções

objetivo aditivas, garantindo que cada subproblema seja resolvido de forma ótima e contribuindo para a solução global.

O método B&B (B&B - *Branch and Bound*) é amplamente utilizado para resolver problemas combinatórios de forma exata. Ele começa por dividir o problema original em subproblemas menores e mais fáceis de analisar (*branching*), seguido pela determinação de limites inferiores para esses subproblemas (*bounding*). O processo repete-se para outros ramos, enquanto houver uma solução mínima mais pequena que a anterior, refinando as soluções e eliminando opções subótimas precocemente, economizando o tempo de execução. Este processo "*dual*" e sistemático faz com que este método seja uma ferramenta poderosa para encontrar soluções de problemas complexos.

A Programação Linear (LP – *Linear Programming*), Programação Inteira (IP – *Integer Programming*) e Programação Linear Inteira Mista (MILP - *Mixed Integer Linear Programming*) são ferramentas muito utilizadas para resolver problemas de otimização. Ao contrário dos dois métodos anteriores, que são desenvolvidos especificamente a cada problema, o MILP pode ser aplicado usando *software* disponível no mercado, incluindo o Microsoft Excel. Este método modela o problema de otimização através de um conjunto de equações matemáticas, que impõem restrições que, por sua vez, direcionam a solução. A versatilidade e eficiência deste método, aliadas à disponibilidade de *solvers* existentes no mercado, tornam o MILP numa opção robusta, acessível e viável para abordar e resolver uma vasta gama de problemas de otimização.

Em [22], os autores utilizaram o método MILP para resolver um problema de otimização de uma linha de montagem *flow shop* com tapetes de transporte com capacidade limitada, cujo objetivo de otimização foi minimizar o tempo de conclusão de todos os produtos (*total completion time*). O modelo desenvolvido pelos autores propõe rotas alternativas de processamento para contornar situações de bloqueio. Enquanto no trabalho [23], os autores propõem um modelo MILP para resolver um problema de otimização de uma linha de montagem *flow shop*, tendo em consideração o objetivo de produção e o prazo de entrega, com o objetivo de melhorar a eficiência do agendamento. Os autores comparam os resultados obtidos com instâncias industriais reais de uma fábrica da Nissan em Barcelona, para demonstrar a eficácia dos modelos. Por outro lado, em [24], os autores propõem novos modelos MIP para resolver um problema de BAP, aplicado a uma linha de montagem *flow shop*. Os autores abordam a possibilidade de bloqueio de produção e

comparam os resultados obtidos com modelos anteriores onde apenas se considerava situações de *permutation flow shop*. Por fim, os autores testam a eficácia do modelo proposto com instâncias reais de grandes volumes de dados. No trabalho [25], os autores propõem um modelo LP para resolver um problema de otimização de produção de uma linha *flow shop* com tempos de processamento estocásticos e capacidade de tapetes de transporte intermédios limitada. Esta metodologia oferece uma nova maneira de abordar problemas de alocação de buffers em sistemas de produção. Em [26], os autores abordam o tema de otimização de uma linha *blocking flow shop* utilizando um algoritmo B&B. Introduzindo um novo limite inferior baseado no posto crítico, o estudo demonstra a eficácia do algoritmo através de resultados experimentais. Por fim, em [27] apresenta um algoritmo de DP destinado a resolver um problema de otimização de uma linha FS, cujos tempos de *setup* dependem da sequência de produção, como foco na minimização do *makespan*. O trabalho destaca a escassez de artigos que utilizem esta metodologia como uma alternativa promissora aos métodos MILP e B&B, para até 20 produtos a produzir e postos de trabalho. Os autores compararam os resultados obtidos com os outros dois métodos, demonstrando o desempenho superior dentro dos limites de tempo estabelecidos.

Além dos métodos de solução exata, existem os métodos de soluções aproximadas, que se destacam pela sua capacidade de encontrar soluções satisfatórias, ainda que não garantam a ótima. Entre os métodos para calcular soluções aproximadas, as heurísticas são especialmente valorizadas pela sua abordagem pragmática. As heurísticas construtivas iniciam a busca por soluções a partir de uma base nula, adicionando produtos sequencialmente, mas não necessariamente numa ordem fixa. Essa abordagem proporciona uma flexibilidade que permite o desenvolvimento de heurísticas específicas para cada tipo de problema. Para além das heurísticas construtivas, destacam-se outros métodos de soluções aproximadas, como *dispatching rules*, *local search* e meta heurísticas, cada uma com diferentes pontos fortes e recomendadas para situações diferentes. Nesta dissertação, serão apresentados algumas das metodologias mais populares para resolver problemas de otimização de linhas de montagem.

A heurística *Variable Neighborhood Search* (VNS) é uma estratégia que explora soluções potenciais próximas à solução atual (*seed*), gerando e avaliando sequências relacionadas a partir de uma sequência inicial, para identificar possíveis melhorias. A

eficácia deste método depende substancialmente da qualidade da "seed" inicial, sendo altamente personalizável para se adaptar a diversos problemas de otimização.

Outro método muito utilizado chama-se *Tabu Search* (TS). É uma evolução da VNS que adiciona flexibilidade ao permitir a seleção de soluções piores que a atual para escapar de mínimos locais subótimos. Diferencia-se por manter um registo (lista tabu) de soluções não ótimas, prevenindo a repetição de soluções já exploradas. A cada iteração, busca-se uma solução superior às presentes na lista tabu, facilitando uma exploração mais ampla do espaço de soluções e permitindo avanços temporários em direção a soluções subótimas. Este método enfatiza a importância de uma escolha inicial de solução ambiciosa, visando maximizar a abrangência da busca. Os defensores desta metodologia sugerem uma escolha de solução inicial agressiva - isto é, a melhor solução não tabu.

*Simulated Annealing* (SA) adota uma abordagem de otimização que se torna progressivamente mais seletiva, inicialmente permitindo movimentos para soluções de qualidade inferior, com o objetivo de alcançar uma solução ótima global. Inspirado no processo de tratamento térmico de metais, o SA reduz gradualmente a probabilidade de aceitar soluções piores, concentrando a procura em torno das melhores soluções encontradas.

Por último, *Genetic Algorithms* (GA), simulam o processo de evolução biológica, selecionando soluções iniciais e criando "descendentes" por meio da combinação de características de duas ou mais "soluções pais", introduzindo variações através de mutações. Este método refina continuamente o conjunto de soluções promissoras, tal como a seleção natural.

No trabalho [28], são apresentadas várias heurísticas construtivas destinadas à otimização de linhas de *flow shop* com bloqueio, sem a presença de tapetes de transporte, o que exige que o processamento de um artigo no posto subsequente ocorra imediatamente. O objetivo principal dessas heurísticas é minimizar o *makespan*. Entre as metodologias avaliadas, os autores optaram por adotar uma heurística NS, devido às suas vantagens específicas para o problema abordado. No estudo [29], foi desenvolvido um algoritmo inovador chamado TABC, que combina um algoritmo TS com o algoritmo *Artificial Bee Colony* (ABC). Este algoritmo híbrido foi projetado para otimizar linhas de *flow shop* híbridas equipadas com buffers de capacidade limitada, tendo como meta a minimização do tempo total de produção. A fusão dessas duas técnicas potencializa a busca por soluções próximas, ajustando-se automaticamente para melhorar a eficácia da pesquisa. A validação

do modelo contra instâncias de grande volume demonstrou a superioridade do algoritmo TABC proposto. Numa outra investigação, [30], são propostos dois métodos distintos, um algoritmo TS e uma formulação MILP, para o desafio de otimização representado pelo problema de balanceamento de linhas de produção multimodelo (MABLP), considerando restrições de alocação. Esta abordagem dual oferece perspectivas variadas para a resolução do problema, permitindo uma comparação entre as eficácias de uma solução exata e de uma heurística. Em [31] introduz-se uma abordagem inovadora de um modelo TS complementada pela deteção de *bottlenecks*, visando a otimização de problemas BAP. Esta versão aprimorada do TS tradicional demonstrou vantagens significativas, como a capacidade de identificar e ajustar pontos críticos na linha de produção sem prejudicar a qualidade das soluções encontradas, assegurando assim um equilíbrio efetivo entre eficiência e eficácia.

Uma limitação notável dos métodos de solução exata é a sua tendência para se tornarem demorados e complexos ao lidar com problemas de grande escala, especialmente aqueles que envolvem mais de dez postos de trabalho ou artigos a serem produzidos. Historicamente, essa desvantagem era ainda mais pronunciada devido à capacidade limitada dos computadores em processar tais métodos com a eficiência desejada. No entanto, com os avanços tecnológicos recentes, particularmente no que se refere aos *CPUs*, os métodos exatos começaram a ganhar destaque novamente. Para tornar os métodos exatos viáveis para problemas de grandes dimensões, têm sido propostas estratégias de decomposição como uma solução inovadora. Essas estratégias visam dividir problemas de otimização complexos em segmentos menores e mais fáceis de gerir, facilitando assim o processo de obtenção da solução.

Alguns trabalhos abordaram a otimização em larga escala e a verificação de sistemas complexos. Em [32], explora-se o sequenciamento de produção numa linha de configuração *flow shop* com dois postos de trabalho, considerando variações com capacidade de buffer nula e infinita, explorando o impacto no desempenho. Em [33] introduz-se um algoritmo de decomposição para problemas de otimização em larga escala não separáveis, demonstrando eficácia na manipulação de variáveis extensas. Em [34] propõe-se uma abordagem integrada para otimização de multiobjetivos em larga escala, otimizando a busca por soluções eficientes. Por fim, [35] avança com uma técnica de verificação baseada na importância dos nodos, melhorando significativamente a eficiência de verificação de redes neurais.

Esta revisão de literatura abrange diversos aspectos relacionados com linhas de montagem, desde a concepção da mesma, explorando áreas de investigação de "*line balancing*" e "*buffer allocation*", até ao sequenciamento de produção em linhas estabelecidas, com ênfase especial na configuração *flow shop*, o foco principal desta dissertação. Foi realizada uma pesquisa abrangente dos diferentes algoritmos de otimização, desde soluções exatas a soluções aproximadas, com uma breve passagem por estratégias de decomposição. Cada abordagem é discutida em termos das suas vantagens e desafios, enriquecendo o entendimento dos problemas de otimização enfrentados por linhas de produção reais. A inovação contínua, tanto na configuração de linha quanto nas metodologias de resolução, sublinha a importância da necessidade de adaptação e precisão para melhorar a qualidade das soluções e para destacar áreas potenciais para pesquisa e desenvolvimento futuro. No entanto, foi observada uma escassez de trabalhos que tentassem resolver problemas similares aos abordados nesta dissertação, indicando uma lacuna significativa na literatura atual e realçando a relevância e a contribuição potencial deste estudo para o campo da otimização de linhas de montagem.



### 3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

#### 3.1. Huf Group

Fundada a 1 de abril de 1908 [36], em Velbert, Alemanha, por Ernest Hülsbeck e August Fürst, como uma empresa de chaves e fechaduras para a indústria mobiliária e rapidamente se tornou em sinónimo de qualidade e excelência. Foi mais tarde, por volta de 1920 que a empresa se especializou no fornecimento do primeiro sistema de fechaduras automóveis para a Mercedes-Benz, que marcou o início de uma longa parceria que dura até hoje.

A expansão do grupo iniciou-se na década de 1980, com a abertura da primeira fábrica além-fronteiras alemãs, em Espanha, seguida, pouco tempo depois, com a abertura de uma instalação na Coreia do Sul. A estratégia de crescimento permitiu ao grupo manter-se competitivo, adaptando-se e respondendo às dinâmicas do mercado global. Atualmente, o grupo Huf está presente em 12 países, possui 17 fábricas e emprega cerca de 7300 funcionários. A empresa estima que cerca de 50% de todos os carros de passageiros estejam equipados com produtos Huf, um testemunho do seu impacto significativo no setor automóvel.

O Grupo Huf sempre esteve na vanguarda da inovação, pelo que iniciou a transição digital muito cedo, estabelecendo o caminho para a transformação dos seus produtos e processos. Esta aposta antecipada na digitalização permitiu ao grupo fortalecer a sua posição como especialista em soluções seguras de acesso e autorização na indústria automóvel, preparando-o para as mudanças de paradigma no setor.

Com a pandemia de COVID-19 e outras adversidades, como a guerra na Ucrânia e as flutuações nos custos das matérias-primas, o grupo enfrentou desafios significativos. Em resposta, a estreita colaboração com as *Original Equipment Manufacturers* (OEM) permitiu mitigar o impacto do estrangulamento do abastecimento. Atualmente, a colaboração incide na compensação sobre a inflação. Processos negociais têm permitido que as OEMs aproveiem mecanismos de apoio ao impacto da inflação nos preços dos produtos e das matérias-primas.

Como parte de sua estratégia de resposta e adaptação contínua, o Grupo Huf implementou o *Huf Production System* (HPS). Este sistema padroniza *layouts* e processos em todas as fábricas, tornando a produção mais flexível e eficiente. O HPS reflete o compromisso do grupo com a Indústria 4.0 (I4.0) e a otimização contínua das operações, garantindo que esteja bem posicionado para enfrentar os desafios futuros e continuar desempenhando um papel vital na indústria automóvel global.

### **3.1.1. Huf Portuguesa – a empresa**

A Huf Portuguesa, estabelecida em Tondela em 1991, rapidamente se tornou uma peça chave no sucesso do Grupo Huf. Ao longo dos seus 32 anos, a empresa tem demonstrado um desempenho notável, alcançando 86,6 M € em faturação em 2022. Especializada na produção de sistemas seguros de acesso e autorização para automóveis, a Huf Portuguesa, desde a sua fundação, equipou cerca de 100 milhões de carros com os seus sistemas.

A gama de produtos da empresa inclui puxadores para porta-bagagens com e sem câmara de visão incorporada, sistemas de abertura de porta-bagagens, atuadores, sistemas de fechaduras, sistemas mecânicos e eletrónicos de bloqueio da coluna da direção, chaves com controlo remoto, dispositivos de identificação e *strickers* para fecho de portas. Os sistemas de fechaduras representam 46% da sua produção, sublinhando a especialização e liderança da empresa no mercado. A Huf Portuguesa atende clientes globais de renome (Figura 6), como Stellantis (46%), BMW (10%) e Geely/Volvo (26%). Exporta grande parte do que produz, sendo que 73% das vendas estão concentradas na zona Euro.



**Figura 6.** Carteira de clientes da Huf Portuguesa

Recentemente, o Grupo Huf escolheu Portugal para expandir a produção de componentes eletrónicos, com a implementação da *Surface Mount Technology* (SMT), que trouxe o desafio de recrutar profissionais qualificados na área de eletrónica. A dificuldade na captação de profissionais também é sentida noutras áreas, em particular na manutenção, resultado do crescimento do setor automóvel na região. Para superar estes desafios, a Huf Portuguesa tem fortalecido parcerias com instituições de ensino, desenvolvendo ações de formação específicas, acolhendo estagiários, participando em avaliações de cursos e marcando presença em feiras de emprego. Estas iniciativas representam uma estratégia de recrutamento proativa, visando atrair e formar os profissionais necessários para sustentar o seu crescimento e inovação contínua.

Um dos pilares fundamentais que sustenta o sucesso da Huf Portuguesa é o seu compromisso com a excelência humana e foco nos colaboradores. O inquérito de satisfação interna de 2022/2023 revelou que 89% dos colaboradores consideram a Huf Portuguesa um excelente local de trabalho. Este resultado é um reflexo do reconhecimento contínuo da empresa pelo “*Great Place To Work Institute*”, que a classificou como uma das melhores empresas para trabalhar em Portugal nos últimos anos, e a incluiu na lista das 100 melhores na Europa em 2006. Além disso, a Huf Portuguesa destaca-se na área da saúde e segurança, mantendo os índices de frequência e gravidade de acidentes mais baixos do setor, alcançando um marco impressionante de mais de 1200 dias sem acidentes. A Huf Portuguesa também

foi distinguida pelas suas práticas de responsabilidade social pela Associação Portuguesa de Ética Empresarial, demonstrando o seu compromisso com o trabalho digno, a conciliação, a comunicação e o envolvimento com a comunidade.

A empresa é reconhecida pela sua força de trabalho altamente qualificada, que inclui profissionais com formação académica avançada e colaboradores especializados em funções específicas no chão de fábrica. Esta diversidade incentiva a inovação e a colaboração interdepartamental, onde diferentes especialidades colaboram para desenvolver soluções integradas e robustas. É neste contexto que a Huf Portuguesa investe em estratégias que maximizem o potencial dos seus trabalhadores, onde este tema de dissertação está inserido, destacando-se na inovação e desenvolvimento de soluções tecnológicas avançadas para a indústria automóvel.

### **3.1.2. O Projeto**

No contexto de um mercado cada vez mais impulsionado pela inovação tecnológica, a Huf Portuguesa tem vindo a adaptar-se às tendências emergentes. Nos últimos anos, tem, nomeadamente, investido fortemente na digitalização do chão de fábrica, implementando tecnologias ligadas à I4.0 e a IIoT. Este cenário não só contribui para uma produção eficiente, mas também gera uma vasta quantidade de dados fundamentais para futuras análises e otimizações.

O cerne deste projeto inovador é o desenvolvimento de um "*Digital Twin*", um gêmeo virtual do sistema de produção real implementado na fábrica, que recebe os dados gerados pela produção em tempo real, permitindo testar soluções de otimização sem nenhum impacto negativo na produção. Este projeto pretende preparar a linha de montagem para uma otimização contínua, adaptando-se e aprendendo com os dados gerados e desafios de otimização propostos. A linha piloto em estudo, dedicada à produção de chaves e fechaduras para o setor automóvel, foi escolhida para este projeto devido à sua complexidade e variedade de processos. Adicionalmente, devido à quantidade de sensores com que está equipada, cada posto da linha de montagem - mesmo os postos manuais - fornece dados que são cruciais para o desenvolvimento de estratégias de otimização eficazes.

As diretrizes de otimização que estruturam este projeto são desafiantes. Uma das principais metas é alcançar uma disponibilidade de operadores próxima de zero numa linha otimizada, maximizando assim a eficiência do recurso humano. A flexibilidade do chão de

fábrica é outra área chave, permitindo que um operador trabalhe em várias linhas conforme as necessidades e prazos de produção. A análise dos dados recolhidos tem um papel crucial neste processo, não só para o cálculo da disponibilidade de cada operador, mas também para a determinação do número mínimo de trabalhadores necessários em cada linha, com base em métricas de capacidade de produção e prazos de entrega.

Ao atingir as metas estabelecidas nas diretrizes de otimização, a Huf Portuguesa tem como objetivo final desenvolver um "*Cyber Physical System*" (CPS) avançado, que incorporará um algoritmo de "*Machine Learning*" (ML) capaz de otimizar a linha de produção em tempo real, aprendendo e adaptando-se às variáveis dinâmicas do processo. O foco principal é otimizar a utilização da força de trabalho altamente qualificada da empresa, alinhando a produção com as métricas definidas para eficiência e produtividade. Este CPS, ao aprender e a adaptar-se continuamente, reflete o compromisso da empresa em maximizar o potencial dos seus colaboradores, minimizando ao mesmo tempo a necessidade de intervenção humana. Em paralelo, está em desenvolvimento uma interface "*user-friendly*", permitindo intervenções práticas sem a necessidade de alterações no código fonte.

### **3.2. Descrição do Problema**

A linha em estudo é responsável pela montagem de conjuntos chave-fechadura para uma empresa de renome no setor automóvel. O conjunto chave-fechadura destaca-se como um componente fundamental, assegurando a segurança do veículo e facilitando a interação do condutor com várias funcionalidades. Num ambiente de produção industrial, onde a eficiência, a qualidade e o volume de produção são prioritários, estes conjuntos são fabricados em larga escala, exigindo uma linha de montagem que otimize a produção.

A linha de montagem analisada distingue-se por características específicas que a posicionam de forma única no espectro das configurações industriais modernas. Opera de forma não ritmada e assíncrona e adota uma abordagem de "*mixed-model*", onde diferentes modelos e as suas variantes são produzidos na mesma linha sem necessidade de reconfiguração completa, aumentando a versatilidade da linha. O layout em "W" otimiza o espaço e facilita a comunicação e eficiência entre os postos de trabalho, enquanto a configuração de sequenciamento em "*permutation blocking flow shop line with intermediate limited buffers*" combina os desafios de sequenciamento com restrições de buffers limitados e bloqueio, exigindo soluções otimizadas sofisticadas.

Esta estrutura (Figura 7) complexa exige uma abordagem de otimização integrada, considerando as especificações do processo produtivo e as restrições impostas pelo layout e configuração.

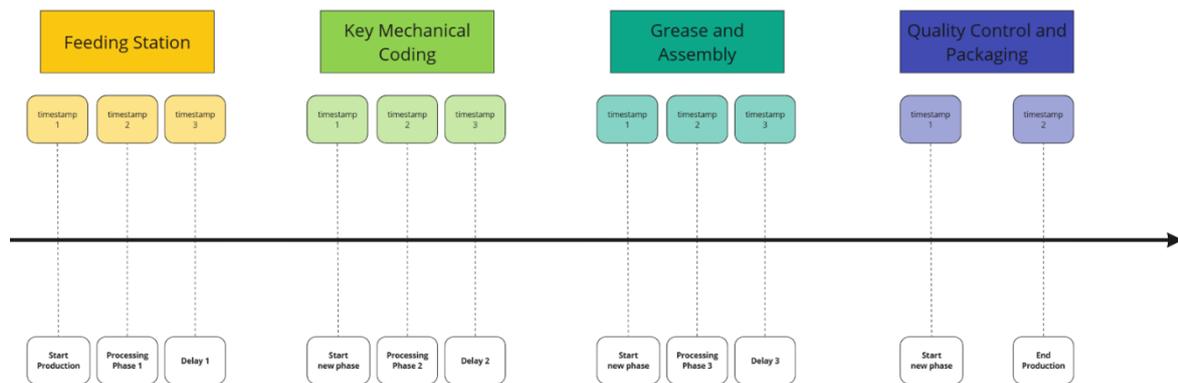


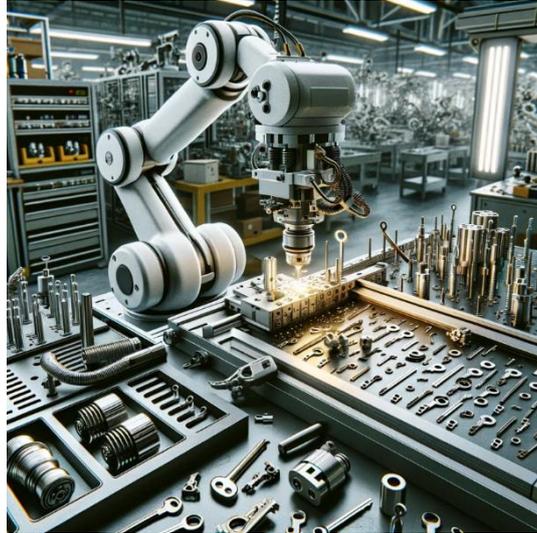
Figura 7. Layout da linha de montagem em estudo

O processo inicia-se com a fase de preparação e carga do material necessário para a produção das fechaduras, juntamente com um procedimento de identificação das variantes específicas de fechaduras a serem produzidas, garantindo que todos os componentes estejam corretos e prontos para a montagem subsequente. (Figura 8)



Figura 8. Imagem gerada com AI do posto de abastecimento

Posteriormente, entra-se na fase de codificação mecânica da chave e da montagem de molas e linguetas no cilindro de bloqueio, de modo que o cilindro corresponda à chave produzida. (Figura 9)



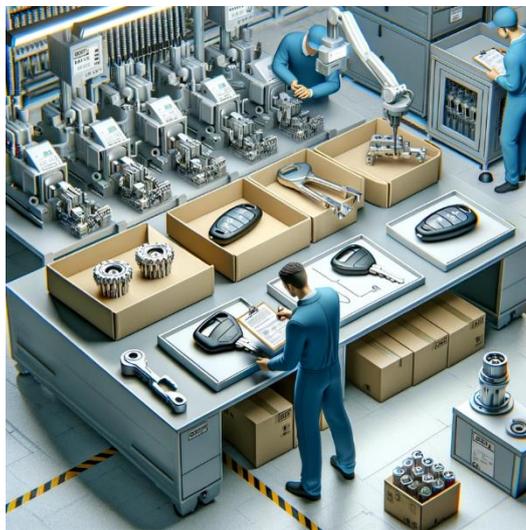
**Figura 9.** Imagem gerada com AI da fase de codificação mecânica

Segue-se uma fase de lubrificação intermédia e montagem final, onde os componentes são em primeiro lubrificados e depois montados em conjunto. (Figura 10)



**Figura 10.** Imagem gerada com AI da fase de lubrificação e montagem final

Por fim, os últimos postos da linha de montagem são dedicados a uma série rigorosa de testes de qualidade e verificações finais, assegurando a conformidade dos conjuntos chave-fechadura com os padrões de qualidade. A finalização e embalagem preparam o produto para distribuição. Isto envolve a leitura e verificação das chaves, a impressão de etiquetas identificativas e o agrupamento de todos os componentes associados. Finalmente, as fechaduras são cuidadosamente embaladas, prontas para serem enviadas para o cliente. (Figura 11)



**Figura 11.** Imagem gerada por AI da fase de qualidade e embalagem

A otimização desta linha de montagem requer uma consideração cuidada da eficiência produtiva e da capacidade de adaptação a variações do produto, mantendo consistentemente altos padrões de qualidade. A combinação dos princípios de produção, o tipo de modelos produzidos, o *layout* adotado e a configuração de sequenciamento definem a linha como um sistema complexo, cuja análise e otimização representam um desafio significativo abordado neste trabalho, com o objetivo de desenvolver estratégias que melhorem a eficiência e a adaptabilidade deste sistema produtivo essencial no setor automóvel, estratégias essas que serão abordadas no próximo capítulo.

## 4. DESCRIÇÃO DAS ABORDAGENS DE RESOLUÇÃO

### 4.1. Base Teórica

#### 4.1.1. Introdução

A linha de montagem abordada neste trabalho trata-se de um sistema complexo de produção que requer uma análise detalhada para identificar oportunidades de melhoria. A partir da revisão bibliográfica realizada, identificaram-se várias áreas de análise, tais como a programação linear mista, juntamente com estratégias de decomposição, para resolver problemas de otimização de linhas de montagem, em especial para o caso de *flow shop* com permutação e bloqueio. Como referido anteriormente, a linha de montagem em estudo é classificada como uma "*Permutation Blocking Flowshop Assembly Line with Intermediate Buffers*". Esta caracterização é crucial para uma análise cuidada da otimização da linha. A escolha desta tipologia baseia-se na observação e análise da linha de montagem real, onde os processos e os fluxos de trabalho seguem padrões específicos que influenciam diretamente as estratégias de otimização aplicáveis.

O desafio é encontrar soluções exatas para o problema de otimização num intervalo de tempo relativamente curto. A complexidade inerente aos problemas de programação inteira mista, exige um poder computacional considerável. No contexto industrial atual, que exige agilidade, com condições de produção que mudam rapidamente, surgem duas abordagens viáveis: o uso de soluções aproximadas através de meta-heurísticas ou heurísticas; ou a decomposição do problema em subconjuntos mais simples, permitindo obter soluções exatas para estes subconjuntos. Neste trabalho, dada a preferência da empresa por soluções exatas, optou-se pela decomposição do problema. A solução global obtida a partir desta abordagem de decomposição pode ser heurística ou exata, dependendo da complexidade dos subconjuntos. Este desafio motivou a estratégia de decomposição como a abordagem mais adequada face ao desafio proposto.

A estratégia de decomposição da linha em subproblemas, seguindo as estratégias de decomposição descritas na revisão bibliográfica, é essencial para diminuir a complexidade. A redução do número de postos de trabalho analisados diminui a complexidade computacional. Além disso, a escalabilidade das abordagens propostas permite que estas sejam ajustadas para representar fielmente a linha de montagem, mantendo a integridade dos

processos e dos resultados de otimização. Este equilíbrio entre escalabilidade e redução de complexidade é vital para assegurar a eficácia das abordagens em ambiente industrial.

#### **4.1.2. Componentes da linha de montagem**

Numa linha de montagem, cada componente desempenha um papel na eficiência geral do processo de produção. Os tapetes de transporte desempenham um papel duplo numa linha de montagem: transportam os artigos entre os postos de trabalho e servem como buffers para evitar bloqueios de produção. Na abordagem adotada nesta dissertação, a caracterização dos tapetes depende da capacidade máxima dos mesmos: alguns podem funcionar como armazéns com capacidade praticamente ilimitada, enquanto outros têm capacidades finitas e atuam como buffers tradicionais. Esta distinção influencia diretamente a dinâmica da linha de montagem e as estratégias de otimização aplicáveis.

Por outro lado, os postos de trabalho são os locais onde os artigos são efetivamente processados. Na linha em análise existem três tipos de postos de trabalho, diferenciados pelo tipo de força de trabalho utilizada: manuais, onde a presença e ação do operador são indispensáveis; automáticos, que funcionam de forma autónoma sem intervenção humana; e semiautomáticos, onde a interação entre o operador e o sistema automatizado é necessária para completar o processamento do trabalho.

As caixas de transporte representam um elemento na dinâmica da linha de montagem e são utilizadas para transportar os artigos ao longo da linha. Uma vez que a quantidade de caixas na linha é fixa e definida à partida, estas são reutilizadas continuamente, caso o número de unidades a produzir ultrapasse o número de caixas em linha. A gestão eficiente destas caixas é crítica, pois estas influenciam diretamente a taxa de produção e a eficiência geral da linha. O tapete de reintrodução transporta as caixas de transporte do final da linha de volta ao início. Este tapete é crucial para garantir um fluxo contínuo de produção, pois a disponibilidade de caixas no início da linha é essencial para o início do processamento dos artigos. O tempo que uma caixa passa neste tapete impacta diretamente a eficiência da linha, se não houver um número de caixas suficiente para garantir a estabilidade do processo.

### 4.1.3. Parâmetros e Variáveis de Decisão

Os parâmetros são extraídos diretamente das condições reais de produção e são conhecidos de antemão. São predominantemente determinísticos e contínuos, incluindo elementos como o tempo de processamento em cada posto de trabalho, o tempo de transporte entre postos, o tempo total de produção e o número de caixas de transporte disponíveis.

As variáveis de decisão, por outro lado, determinam como a linha de montagem deve operar para alcançar a eficiência desejada. Incluem variáveis contínuas, que representam instantes ou intervalos temporais, como o instante em que um artigo entra ou sai de um posto ou tapete, e variáveis binárias, que indicam se um artigo está ou não num determinado ponto da linha num momento específico. Variáveis inteiras também são utilizadas para quantificar elementos como a quantidade máxima de vezes que cada caixa de transporte é utilizada.

### 4.1.4. Assunções Gerais das Abordagens

Para este trabalho, certas assunções são consideradas. Considera-se que existem  $n$  tarefas de operação única disponíveis para processamento simultâneo desde o momento zero, cujo  $n$  é igual ao número de postos de trabalho  $m$ . Esta assunção será eliminada na última abordagem. Isso significa que, desde o início da operação da linha, todas as tarefas estão prontas para serem processadas, sem atrasos iniciais.

Assume-se que cada máquina pode processar apenas uma tarefa de cada vez, evitando a complexidade adicional de múltiplas tarefas simultâneas. Esta assunção será eliminada na última abordagem.

Além disso, os tempos de preparação das tarefas são considerados independentes da sequência das tarefas e estão incluídos nos tempos de processamento, simplificando a estrutura temporal da abordagem. Outra assunção adotada foi considerar que os postos de trabalho semiautomáticos seriam tratados como postos manuais.

Adicionalmente, os descritores de tarefas são tratados como determinísticos e conhecidos antecipadamente. Assumiu-se também que as máquinas estão continuamente disponíveis, ou seja, não são consideradas avarias ou manutenções, garantindo uma operação constante e ininterrupta. Por último, as máquinas nunca são mantidas à espera, e uma vez iniciada uma operação, esta prossegue sem interrupção.

#### **4.1.5. Relação Iterativa entre Abordagens**

Adotou-se uma abordagem iterativa, evoluindo de abordagens mais simples para mais complexas. Esta progressão metodológica permite não só uma compreensão gradual do sistema em estudo, mas também a verificação da aplicabilidade e eficiência das soluções propostas em diferentes níveis de complexidade. Cada uma destas abordagens tem uma característica principal que as distingue. A abordagem (I) foca-se na simplificação extrema para estabelecer um ponto de partida, a abordagem (II) começa por integrar elementos da realidade operacional e a abordagem (III) aborda a complexidade total da linha de montagem.

A primeira abordagem (I) simplifica a realidade ao considerar tapetes de transporte com capacidade infinita (armazéns) e um número ilimitado de caixas de transporte. Esta assunção elimina a possibilidade de bloqueios na linha e impactos da reintrodução de caixas na produção, oferecendo um ponto de partida para a análise e não inclui o caso especial do tapete de reintrodução.

A segunda abordagem (II) introduz um elemento adicional ao modelar a quantidade finita de caixas de transporte. Esta mudança permite a análise do impacto da reintrodução de caixas na linha, trazendo a abordagem mais próxima das condições reais da linha de montagem.

Finalmente, a terceira abordagem (III) considera tapetes de transporte com capacidade finita (buffers) e que o posto automático executa duas operações, em vez de uma operação. Este ajuste introduz o conceito de bloqueios na produção, um desafio na realidade operacional desta linha. Esta abordagem representa o cenário mais próximo da realidade, fornecendo dados sobre como o fluxo de produção é processado.

## 4.2. Formulação das Abordagens ao Problema

### 4.2.1. Abordagem I

#### 4.2.1.1. Descrição

Considera-se uma linha de montagem mista, composta por dois postos manuais e um posto automático. Pretende-se maximizar a produção durante um intervalo de tempo determinado à partida. As unidades a produzir estão assentes em bases que são reutilizadas durante a produção.

Nesta abordagem (Figura 12) não se considera a reintrodução de caixas na linha de montagem. Assim, a primeira simplificação será considerar caixas infinitas. Para além disso, esta abordagem considera que o posto automático executa uma única operação à unidade a produzir, em vez de duas operações, sendo esta a segunda simplificação desta abordagem.

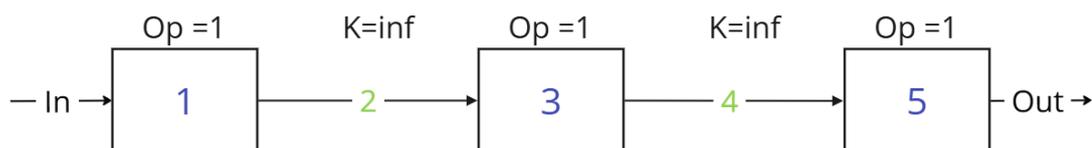


Figura 12. Esquema exemplo da Abordagem I

#### 4.2.1.2. Modelo MILP

##### Índices:

$j, g, l$  índices das posições na linha de montagem,  $(1, \dots, J)$ ,  $g = j + 1$ ,  $l = j - 1$   
 $u, m, v$  índices das unidades a produzir,  $(1, \dots, U)$ ,  $m = u + 1$ ,  $v = u - 1$

##### Parâmetros:

$J$  número de posições reais dentro da linha de montagem,  
 $U$  número de unidades a produzir,  
 $t_j$  tempo de “processamento” para cada posição  $j$ ,  
 $TT$  tempo total de produção.

##### Conjuntos:

$J^r \subset J$  conjunto de posições  $j$  que são postos de trabalho reais,  
 $J^b \subset J$  conjunto de posições  $j$  que são buffers.  
 $|U|$  Conjunto com todas as unidades a produzir  
 $|J|$  Conjunto com todas as posições da linha de montagem

**Variáveis de Decisão:**

$$x_{ju} = \begin{cases} 1, & \text{se unidade } u \text{ está na posição } j \\ 0, & \text{em caso contrário} \end{cases},$$

$s_{ju}$  Contínua. Instante em que a unidade  $u$  entra na posição  $j$ ,

$e_{ju}$  Contínua. Instante em que a unidade  $u$  termina o processamento na posição  $j$ ,

$w_{ju}$  Contínua. Intervalo de tempo, em segundos, que a unidade  $u$  espera dentro da posição  $j$ , após terminar o processamento,

$i_{ju}$  Contínua. Instante de tempo em que a unidade  $u$  deixa a posição  $j$

$T$  Função objetivo. Minimizar tempo de produção da última unidade  $u$ .

O objetivo desta abordagem é garantir que a unidade  $u = U$  é produzida dentro do intervalo total de produção,  $TT$ . Para tal, é necessário descobrir o valor  $U$ , que é um dos objetivos da abordagem. Assim, foi adotada a metodologia IOP (*Iterative Optimization for Parameters*) para descobrir o valor de  $U$  que permite obter a solução ótima da abordagem. Este método é um processo iterativo que diminui o valor de  $U$  caso não tenha sido encontrada uma solução ótima.

Para utilizar este método, é necessário introduzir um valor inicial de  $U$  (*seed*) que, quanto mais próximo estiver da solução ótima, menos iterações serão necessárias para encontrar essa solução. Para calcular o valor de  $U$ , é preciso entender como é calculada a taxa de produção da linha de montagem:

$$T_c = TT/U (=)U = TT/T_c$$

Como a linha de montagem é uma linha não ritmada e assíncrona, impede obter o valor de  $T_c$  à partida. Desse modo, decidiu-se simplificar a linha a uma não ritmada síncrona, o que garante que  $T_c$  seja igual a  $\max \{t_j\}$ . Assim, para esta abordagem, considerou-se:

$$U = TT/T_c = 25$$

**Restrições:**

$$\sum_j x_{ju} = J, \forall u \in U \quad (1)$$

$$e_{ju} = s_{ju} + t_j \times x_{ju}, \forall j \in J, u \in U \quad (2)$$

$$w_{ju} \geq i_{gv} - e_{ju}, \forall g \in J^r, u \in U \quad (3)$$

$$w_{ju} = 0, \forall j \in J^r, u \in U \quad (4)$$

$$i_{ju} = e_{ju} + w_{ju}, \forall j \in J, u \in U \quad (5)$$

$$i_{ju} \leq s_{gu}, \forall j \in J^b, u \in U \quad (6)$$

$$s_{jm} \geq i_{ju}, \forall j \in J^r, u \in U \quad (7)$$

$$e_{ju} \leq TT, \forall j \in J, u \in U \quad (8)$$

$$s_{ju}, e_{ju}, w_{ju}, i_{ju} \geq 0, \forall j \in J, u \in U \quad (9)$$

$$x_{ju} \in \{0, 1\}, \forall j \in J, u \in U \quad (10)$$

A restrição ( 1) garante que qualquer unidade  $u$  passa por todas as posições da linha. Em ( 2), é obtido o instante final do processamento de qualquer unidade  $u$  para qualquer posição  $j$ . As restrições ( 3) e ( 4) determinam o tempo de espera de qualquer unidade  $u$ . Considera-se que só pode existir espera de qualquer unidade  $u$  nos tapetes de transporte. A restrição ( 5) determina o instante em que qualquer unidade  $u$  deixa a posição  $j$ . As restrições ( 6) e ( 7) garantem transições de qualquer unidade  $u$  pelas posições da linha, assegurando a sequência de produção imposta pela configuração *permutation flow shop*. A restrição ( 8) garante que qualquer unidade  $u$  conclui produção dentro do tempo total de produção,  $TT$ . A restrição ( 9) garante a não negatividade das variáveis contínua, enquanto a restrição ( 10) define o domínio da variável binária.

## 4.2.2. Abordagem II

### 4.2.2.1. Descrição

Considera-se uma linha de montagem mista, composta por dois postos manuais e um posto automático (Figura 13). As unidades a produzir estão assentes em bases que são reutilizadas durante a produção. Pretende-se minimizar o número de bases de transporte em linha que permita obter a solução ótima da abordagem I.

É mantida a assunção de que os tapetes de transporte entre postos de trabalho têm capacidade infinita, assim como se mantém a simplificação aplicada ao posto automático.

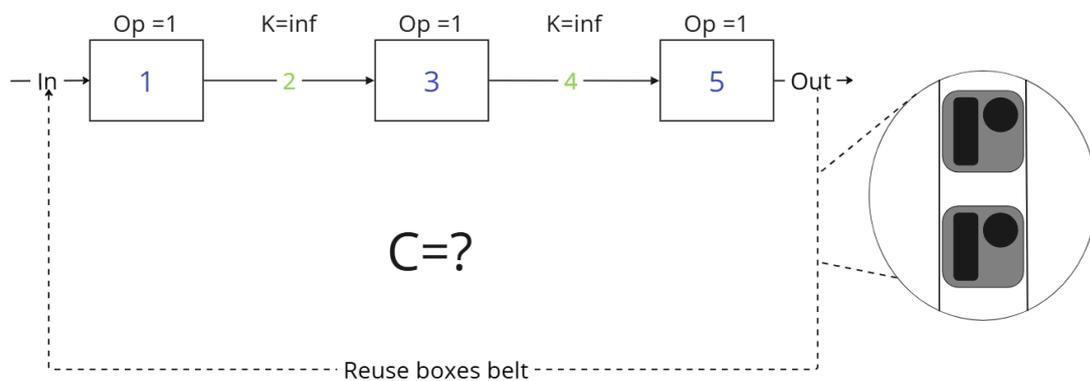


Figura 13. Esquema exemplo da Abordagem II

### 4.2.2.2. Modelo MILP

Em adição aos índices, parâmetros, conjuntos, variáveis de decisão e restrições introduzidos na abordagem I, incluem-se os seguintes para definir a abordagem II.

#### Índices:

- $c$  índice de caixas,  $(1, \dots, C)$
- $y$  índice de repetições,  $(1, \dots, Y)$

#### Parâmetros:

- $C$  Número total de caixas em linhas
- $Y$  Número total de repetições permitidas para cada caixa.  $Y = \lceil U/C \rceil$
- $tr$  tempo de reintrodução das caixas

**Conjuntos:**

$U^1, \forall u \leq C$  grupo de unidades iniciais.

$U^Y, \forall u > C$  grupo de unidades que dependem da reintrodução de caixas

**Variáveis de Decisão:**

$$z_{uc} = \begin{cases} 1, & \text{se unidade } u \text{ está na caixa } c \\ 0, & \text{em caso contrário} \end{cases},$$

$e_{cy}$  instante em que a caixa  $c$  conclui o tempo de reintrodução, na repetição  $y$

$w_{cy}$  intervalo de tempo, em segundos, que a caixa  $c$  espera, após concluir o transporte, na repetição  $y$

$i_{cy}$  instante em que a caixa  $c$  deixa reintrodução, na repetição  $y$

O objetivo da abordagem é garantir que a unidade  $U$ , descoberta na abordagem I, é produzida dentro do tempo total de produção,  $TT$ . Para isso, é importante explicar o conceito de caixa de transporte.

O primeiro posto da linha de produção é um posto de alimentação. Na prática, o operador neste posto coloca os diversos componentes que constituem o sistema chave-fechadura, numa caixa de transporte, que os irá transportar ao longo da linha de montagem. Estas caixas representam um recurso crítico da linha que a empresa pretende otimizar.

Desse modo, interessa obter qual o número mínimo de caixas necessário em linha para garantir que a produção ótima é atingida. Ou seja, garantir que a restrição  $e_{J,U} \leq TT$  seja obedecida. Optou-se por utilizar o mesmo método IOP introduzido na abordagem I. No entanto, nesta abordagem, incrementa-se o valor de  $C$  até obter a solução ótima. Para definir a *seed* do método, considerou-se  $C$  inicial de 1.

**Restrições:**

$$\sum_c z_{uc} = 1, \forall u \in U \quad (11)$$

$$\sum_u z_{uc} \leq Y, \forall c \in C \quad (12)$$

$$z_{uc} = 1, \forall u \in U, c = h \quad (13)$$

$$e_{cy} = e_{jm} + tr, j = 5, m = u - C, \forall u \in U, y \in Y, c \in C \quad (14)$$

$$w_{cy} \geq i_{jv} - e_{cy}, j = 1, \forall v \in U^Y, y \in Y, c \in C \quad (15)$$

$$i_{cy} = e_{cy} + w_{cy}, \forall c \in C, y \in Y \quad (16)$$

$$s_{ju} \geq i_{cy}, j = 1, \forall u \in U^Y, c \in C, y \in Y \quad (17)$$

$$s_{ju} \geq i_{jv}, j = 1, \forall u, v \in U^1 \quad (18)$$

$$e_{cy}, w_{cy}, i_{cy} \geq 0, \forall c \in C, y \in Y \quad (19)$$

$$z_{uc} \in \{0, 1\}, \forall u \in U, c \in C \quad (20)$$

A restrição ( 11) garante que qualquer  $u$  é transportada por uma e uma só caixa  $c$ . A restrição ( 12) garante que qualquer caixa  $c$  é reutilizada, no máximo,  $Y$  vezes. Devido às condições FIFO (*First In First Out*), proveniente da configuração *permutation flow shop*, é possível relacionar quais foram as unidades transportadas por cada caixa  $c$ . Desse modo, a restrição ( 13) garante que  $z_{uc}$  só assuma o valor de 1 caso a regra seja cumprida:  $h = ((u - 1) \bmod C) + 1, h \in C$ . As restrições de ( 14) a ( 16) formulam a reutilização de caixas  $c$ . Assim que uma unidade  $u$  termina produção, a caixa  $c$  que a transportou entra no tapete de reintrodução. As restrições ( 17) e ( 18) modelam o impacto da reutilização de caixas na produção. A restrição ( 19) garante a não negatividade das variáveis contínuas e a restrição ( 20) garante o domínio da variável binária.

### 4.2.3. Abordagem III

#### 4.2.3.1. Descrição

Nesta abordagem, pretende-se medir o impacto do conceito *blocking* na função objetivo. Adicionalmente, considera-se que o posto automático executa duas operações às unidades a processar (Figura 14). A partir da abordagem I, desenvolve-se esta abordagem adaptando as restrições de ( 1) a ( 10). Em adição aos índices, parâmetros, conjuntos e variáveis de decisão introduzidos anteriormente na abordagem I, juntam-se os seguintes.

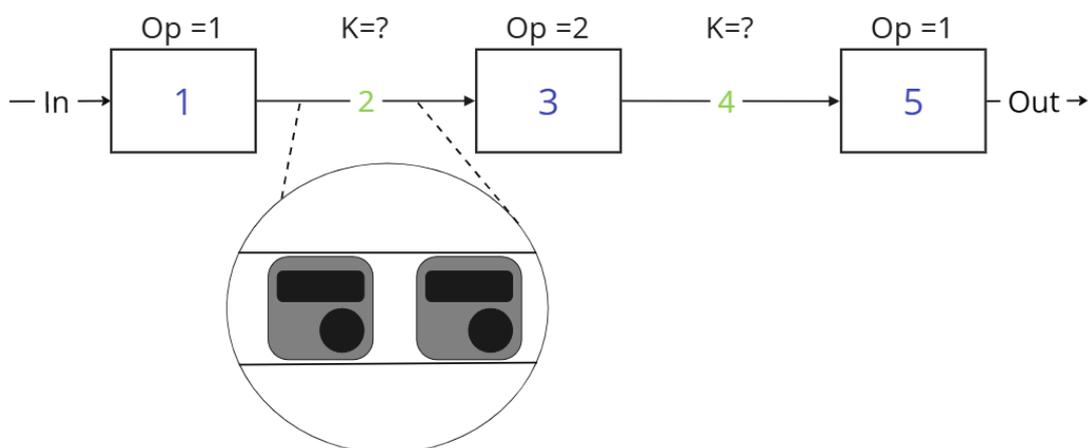


Figura 14. Esquema exemplo da Abordagem III

#### 4.2.3.2. Modelo MILP

##### Índices:

$k, q$  índice de postos fictícios  $(1, \dots, K), q = k + 1$ .

##### Parâmetros:

$K$  número de postos fictícios por buffer,

$t_k$  tempo de processamento para cada posto fictício  $k$ ,

##### Conjuntos:

$F^k \subset J^b$  conjunto de postos fictícios  $k$  que pertencem à posição  $j$ , que é um buffer,

$FK \subset F^k$  primeiro posto de trabalho fictício do buffer  $j$

$LK \subset F^k$  último posto de trabalho fictício do buffer  $j$

**Variáveis de Decisão:**

- $s_{ku}$  Contínua. Instante em que a unidade  $u$  entra no posto fictício  $k$
- $e_{ku}$  Contínua. Instante em que a unidade  $u$  termina o processamento no posto fictício  $k$ ,
- $w_{ku}$  Contínua. Intervalo de tempo, em segundos, que a unidade  $u$  espera dentro do posto  $k$ , após terminar o processamento,
- $i_{ku}$  Contínua. Instante de tempo em que a unidade  $u$  sai do posto fictício  $k$ ,
- $N^k$  Capacidade mínima do buffer, em número de caixas para garantir solução ótima. (IOP),
- $T$  Função objetivo. Minimizar tempo de produção da última unidade  $u$ .

O objetivo desta formulação é garantir que a última unidade  $u$  é produzida dentro do tempo máximo  $TT$ . No entanto, a capacidade máxima  $K$  de cada buffer, é desconhecida à partida. Pode-se definir um problema deste tipo como “*Buffer Allocation Problem*”. Uma das possíveis soluções para problemas deste tipo tem por base num processo iterativo. Este processo consiste em testar a solubilidade do modelo de otimização mista para um dado valor inicial de  $K$ . Caso seja encontrada uma solução ótima, então  $N^k = K$ . Caso contrário, incrementa-se o valor de  $K$  e repete-se o teste à solubilidade iterativamente, até obter uma solução ótima válida.

Para melhor entender o que se passa dentro de um buffer, foi decidido dividir os buffers em diferentes postos de trabalhos fictícios. Deste modo, é possível modelar cada segmento de um buffer e equipará-los a postos de trabalho, com tempos individuais de processamento e com impacto específico na solubilidade. O tempo de processamento dos postos fictícios depende do tempo de processamento dos buffers e da capacidade máxima  $K$ , de cada buffer:  $t_k = \frac{t_j}{K}$ . Foi adotado o mesmo raciocínio para melhor entender o que se passa dentro dos postos automáticos.

**Restrições:**

$$\sum_{k \in F^k} x_{ku} = B \times K, \forall u \in U \quad (21)$$

$$w_{ju} \geq i_{kv} - e_{ju}, \forall j \in J^r, u \in U, k = FK, u > 1, j < J \quad (22)$$

$$w_{ju} = 0, u = 1, \forall j \in J \quad (23)$$

$$w_{ju} = 0, j = J, \forall u \in U \quad (24)$$

$$e_{ku} = s_{ku} + t_k \times x_{ku}, \forall k \in F^k, u \in U \quad (25)$$

$$w_{ku} \geq i_{gv} - e_{ku}, k = LK, \forall j \in J^b, u \in U, u > 1 \quad (26)$$

$$w_{ku} = 0, u = 1, \forall k \in F^k \quad (27)$$

$$i_{ku} = e_{ku} + w_{ku}, \forall k \in F^k, u \in U \quad (28)$$

$$w_{ku} \geq i_{qv} - e_{ku}, \forall k, q \in F^k, u \in U, u > 1 \quad (29)$$

$$w_{ku} \geq i_{gv} - e_{ku}, k = LK, \forall g \in J^r, u \in U, u > 1 \quad (30)$$

$$\sum_{k \in F^k} w_{ku} = w_{ju}, \forall j \in J^b, u \in U \quad (31)$$

$$s_{ku} = i_{ju}, k = LK, \forall j \in J^r, u \in U \quad (32)$$

$$s_{gu} \geq i_{ku}, K = LK, \forall g \in J^r, u \in U \quad (33)$$

$$s_{jr} = i_{ju}, \forall j \in J^r, u \in U, u < U \quad (34)$$

$$s_{qu} \geq i_{ku}, \forall k \in F^k, u \in U, k < LK \quad (35)$$

$$s_{kr} \geq i_{ku}, \forall k \in F^k, u \in U, u < U \quad (36)$$

$$s_{ku}, e_{ku}, w_{ku}, i_{ku} \geq 0, \forall k \in F^k, u \in U \quad (37)$$

$$x_{ku} \in \{0,1\}, \forall k \in F^k, u \in U \quad (38)$$

A restrição ( 21) garante que cada unidade  $u$  passa por todos os postos fictícios  $k$ . As restrições de ( 22) a ( 24) determinam o tempo de espera de cada unidade  $u$  para cada posto de trabalho real. As restrições de ( 25) a ( 28) garantem o correto funcionamento dos postos de trabalho fictícios. As restrições de ( 29) a ( 31) restringem os casos especiais dos tempos de espera nos *buffers* que são responsáveis pela transição de qualquer unidade  $u$  pela linha de montagem. As restrições de ( 32) a ( 36) garantem que as transições de buffers para postos

reais, e vice-versa, acontecem como é suposto. A restrição ( 37) garante a não negatividade das variáveis contínuas e a restrição ( 38) define o domínio da variável binária.

## 5. CASOS DE ESTUDO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1. Solver utilizado e Desempenho Computacional

O *software* utilizado para a resolução dos modelos de otimização desenvolvidos neste estudo foi o *Gurobi Optimizer*, versão *11.0.2 build v11.0.2rc0*, executado no sistema operacional *Windows 11.0 (22H2)*, com a licença acadêmica para uso não comercial. O computador utilizado contém um *CPU Intel Core i5-1135G7 @ 2.40GHz*, com 4 núcleos físicos e 8 processadores lógicos, utilizando até 8 *threads* em simultâneo. Os tempos de computação para cada abordagem encontram-se na Tabela 1.

**Tabela 1.** Tempos de computação dos modelos desenvolvidos

	Abordagem I	Abordagem II	Abordagem III
Tempo total de computação	0,624 segundos	1,041 segundos	2,968 segundos
Tempo de computação do <i>solver</i>	0,025 segundos	0,111 segundos	0,660 segundos

### 5.2. Tratamento de dados de Produção

Nesta secção, descreve-se o processo de recolha, limpeza e tratamento de dados de produção recolhidos ao longo de três semanas de produção contínua.

Foram analisados os dados da secção crítica da linha, que se situa na zona de lubrificação e montagem. Os casos de estudo foram criados contendo três conjuntos de três postos de trabalho em sequência. O elevado grau de automação da linha permite obter dados de produção para todos os postos de trabalho. Durante as semanas de produção, foram processados nesta linha diferentes modelos de sistemas chaves-fechadura. Assim, os dados de produção foram separados por modelo produzido, de modo a facilitar a análise. Foram também calculados os dados relativos aos tapetes de transporte, derivados dos dados relativos aos postos de trabalho.

A recolha de dados foi fornecida pela empresa em formato CSV. Os dados recolhidos contêm os instantes temporais em que uma unidade de produção permanece num posto de trabalho, além de informações sobre a caixa de transporte utilizada e o *status* de produção por posto de trabalho. Foi feita uma extração de dados e reorganização para melhorar a leitura e análise e foram guardados num ficheiro Excel.

De seguida, removeram-se dados referentes a modelos que tivessem um número reduzido de unidades produzidas (inferior a 1000) ou cuja produção não seguisse um modelo de distribuição normal. Para isso, foram criados histogramas de produção para cada posto de trabalho e para cada modelo processado, de modo a conseguir identificar *outliers*, e visualizar a distribuição da produção. Os histogramas foram gerados com recurso ao *Python* e utilizando as bibliotecas *scipy*, *numpy* e *matplotlib*, permitindo visualizar os dados e seleccionar somente os modelos relevantes. Este passo foi importante para reduzir o ruído e focar nos pontos mais importantes do processo de produção.

Na Figura 15 são apresentados dois exemplos de modelos rejeitados. Em (a), observa-se uma distribuição normal dos tempos de processamento, mas o volume de produção associado é inferior a 1000 unidades, o que não atende aos critérios estabelecidos para este estudo. A linha azul representa a curva de densidade de *kernel*, que ajuda a visualizar a distribuição dos dados. Adicionalmente, o gráfico mostra que 5% das unidades processadas estão abaixo do tempo de processamento esperado. Em (b), além do volume de produção ser insuficiente, a distribuição dos tempos de processamento não segue um padrão normal. Estes foram os fatores tidos em conta para exclusão de modelos.

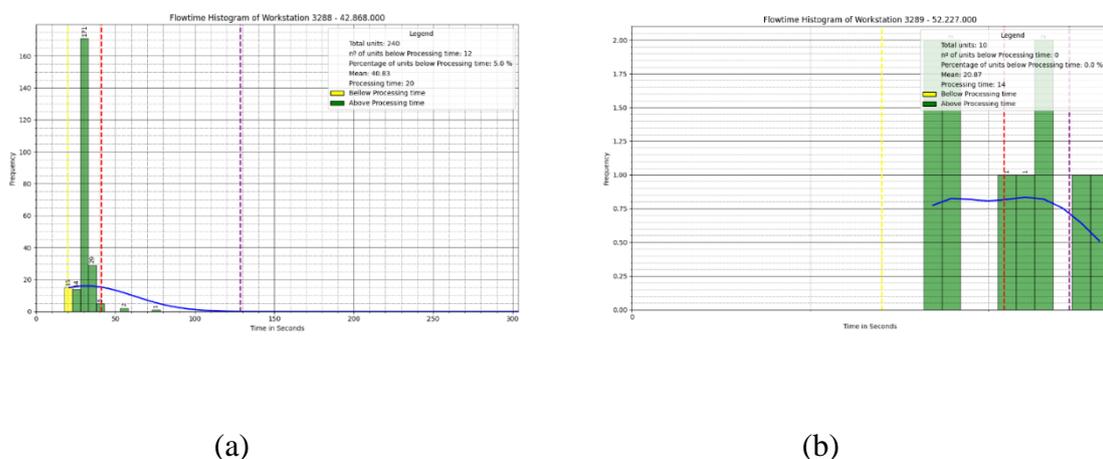
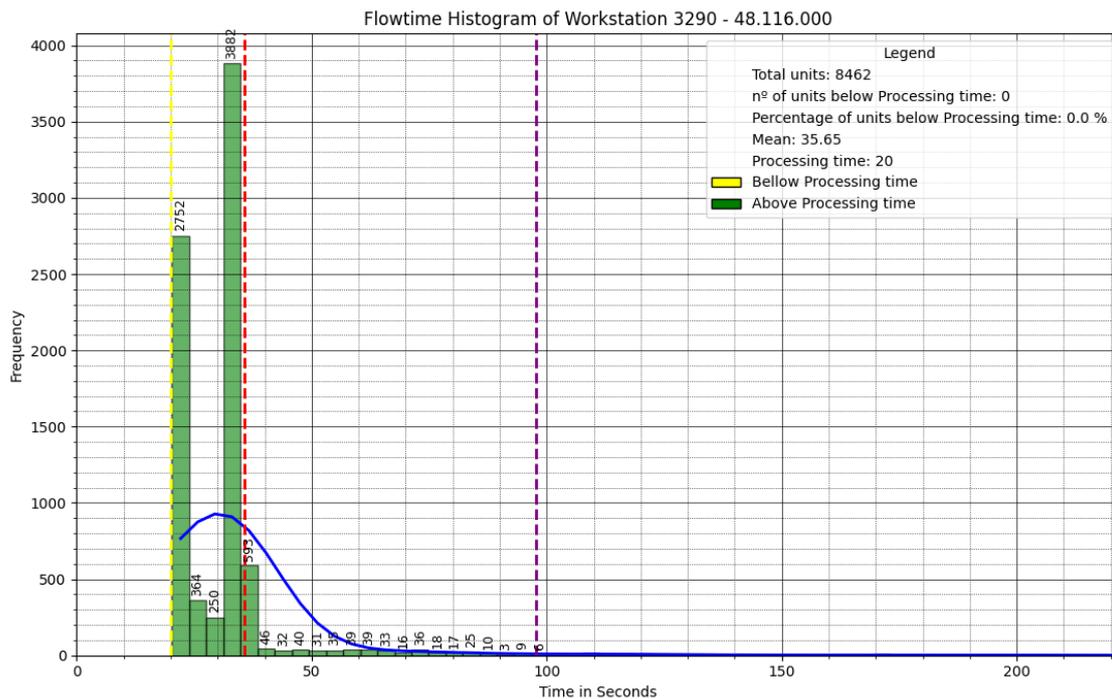


Figura 15. (a) – modelo com baixa produção; (b) – modelo que não apresenta distribuição normal

Na Figura 16, é mostrado um exemplo de um modelo (modelo 48.116.00 no posto de trabalho 3290) que passou no processo de seleção. Este histograma mostra o *flowtime* das unidades produzidas, com um total de 8462 unidades, que ultrapassa o valor mínimo de 1000 unidades. Adicionalmente, verifica-se pela observação da linha azul que representa a curva de densidade de *kernel*, que a produção obedece à distribuição normal, à esquerda e que a maior parte das unidades foi processada entre os 20 e os 40 segundos.



**Figura 16.** Exemplo de modelo que passou pelo processo de seleção

Durante este ponto do tratamento de dados, foi identificado um problema com um dos postos de trabalho, o último desta secção da linha de montagem. Este posto é um posto rotativo que executa quatro operações. Verificou-se que a maioria das unidades processadas neste posto tinham demorado menos tempo dentro do posto de trabalho do que o esperado. O motivo que levou a estes resultados está intrinsecamente ligado com a eficiência de produção. O tempo de processamento igual a 40 segundos considera que o posto de trabalho está totalmente carregado. Isto é, caso o posto tenha quatro unidades para processar em qualquer instante de tempo, então o tempo de processamento ideal seria de 40 segundos. Sendo este posto um posto rotativo, caso a máquina não esteja totalmente cheia, ela irá rodar em falso, o que faz com que o tempo de processamento seja inferior ao esperado e que está diretamente relacionado com o tempo necessário para efetuar cada etapa de operação. A

empresa foi notificada e decidiu-se remover os dados cujo tempo de processamento no equipamento em tempo real tenha sido inferior ao tempo de processamento medido esperado. A Figura 17 é o histograma do posto de trabalho em questão, neste caso aplicado ao modelo 52.967.000. A análise mostra que 62,39% das unidades processadas têm um tempo de processamento inferior aos 40 segundos esperados.

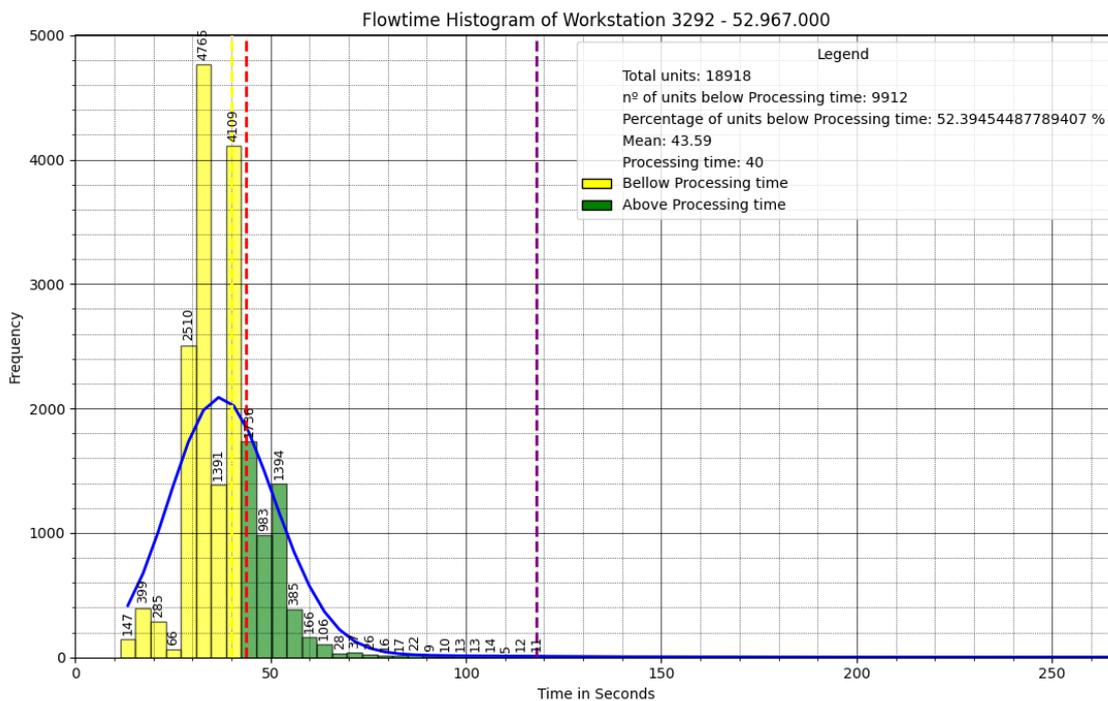


Figura 17. Problema dos dados da máquina rotativa

Uma possível solução para este problema seria aumentar a capacidade do *buffer* que antecede este posto para um mínimo de quatro caixas, de modo que o posto seja alimentado sempre com o número máximo de caixas e aumentar a produtividade. Esta medida iria aumentar o *flowtime* para valores esperados acima do tempo de processamento e iria reduzir o *cycle time*.

Após a criação dos histogramas e seleção dos modelos que não cumpriam os critérios de seleção, foram removidos os dados provenientes dos modelos que não passaram no processo de seleção. Cerca de 10,64% do volume total de dados foi removido neste passo. Enquanto nos restantes postos de trabalho, a taxa de remoção foi abaixo de 2%, no último posto de trabalho, a taxa de remoção foi perto de 50%.

De seguida, foram removidos os modelos não comuns a todos os postos de trabalho, por caso de estudo. Adicionalmente, foram removidas as unidades – identificadas com um número de série – que não eram comuns a todos os postos de trabalho, por caso de estudo. Desta forma, cerca de 43,8% do volume de dados remanescente foi removido. Ao contrário do ponto de seleção anterior, a maioria dos dados eliminados vieram dos outros postos de trabalho.

Contudo, a remoção significativa de dados do último posto de trabalho teve impacto direto nos dados dos restantes postos, refletindo-se na elevada taxa de eliminação global, que ronda os 49,78%.

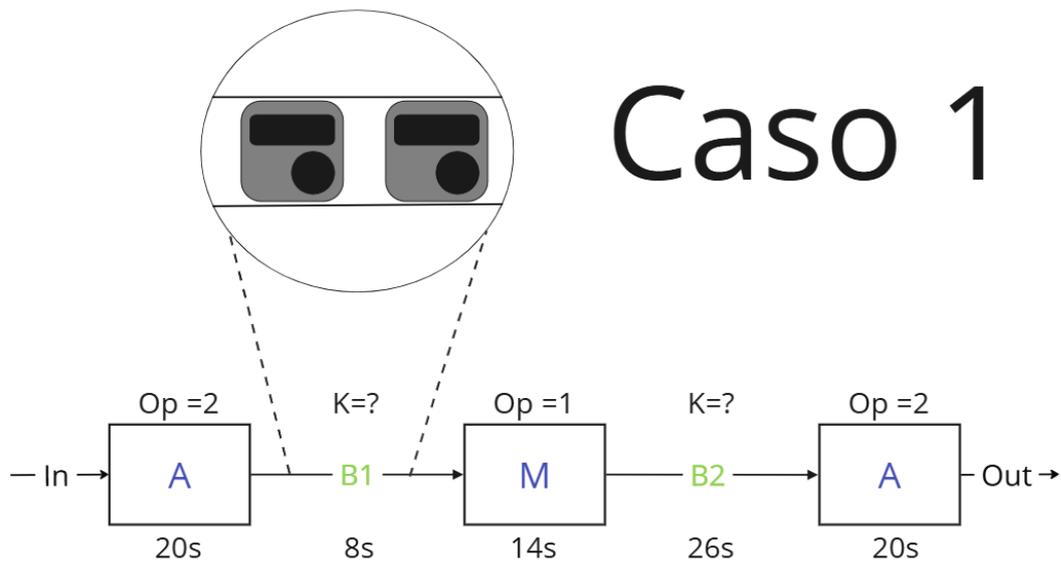
Determinou-se o tempo de fluxo (*flowtime*) e a data de conclusão (*due date*) dos dados que passaram o processo seletivo. O *flowtime* refere-se ao tempo total que uma unidade demora a ser processada num posto de trabalho – e foi este o parâmetro utilizado no processo de seleção dos histogramas. A data de conclusão é calculada com base no tempo do início de processamento acrescido o tempo de processamento esperado.

Foram calculados os dados dos tapetes de transporte através da relação com os tempos de início de processamento e os tempos de fluxo dos postos de trabalho, tendo sido guardados num documento Excel. Por fim, foi criado um documento Excel por caso de estudo, que combina os dados dos postos de trabalho com os dados dos tapetes de transporte.

### **5.3. Casos de Estudo**

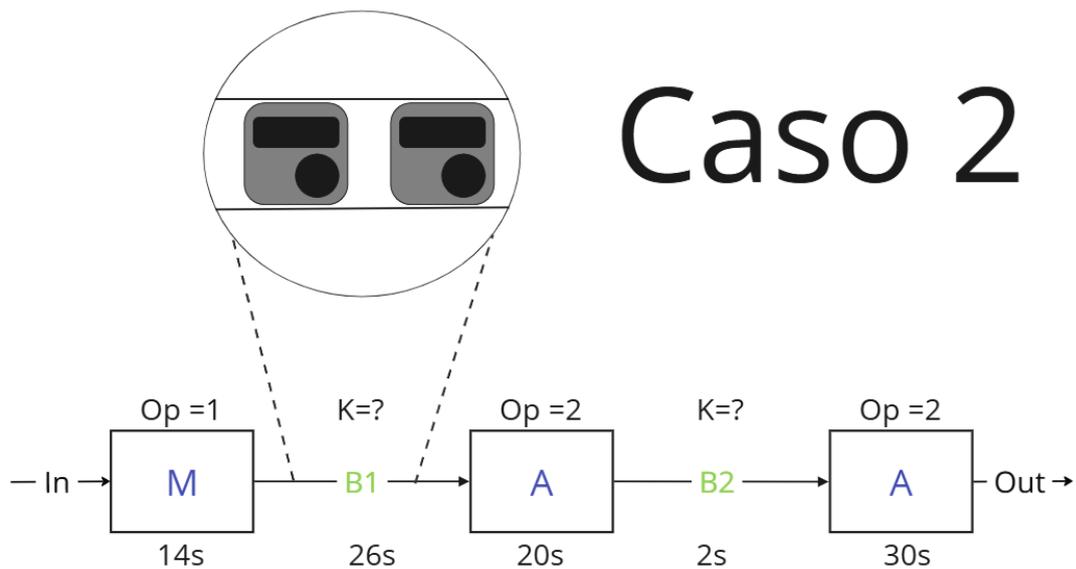
O objetivo dos casos de estudo é analisar e validar as abordagens de otimização propostas, aplicando-as a cenários reais de produção. Estes casos permitem avaliar a eficácia das metodologias desenvolvidas em condições operacionais distintas e sugerir melhorias com base nos resultados obtidos.

Foram selecionados três casos de estudo para análise. O primeiro, demonstrado na Figura 18, marca o início da secção da produção associada à lubrificação intermédia e montagem final. Este caso de estudo começa com um posto automático, seguido de um manual e terminando com um outro automático. O segundo tapete de transporte, devido ao tempo de deslocação entre postos de trabalho, comporta-se como um armazém. O posto manual é caracterizado por realizar apenas uma operação dentro do posto de trabalho, enquanto os postos automáticos realizam duas operações.



**Figura 18.** Esquema representativo do Caso de Estudo 1

No caso seguinte, apresentado na Figura 19, avança-se um posto de trabalho. Neste caso, o segundo tapete de transporte torna-se uma zona crítica à produção. Como o tempo de processamento do último posto é superior ao do segundo posto, haverá unidades que ficarão à espera neste tapete de transporte. Assim, apesar de similar, este caso de estudo apresenta características diferentes do caso anterior.



**Figura 19.** Esquema representativo do Caso de Estudo 2

Por fim, o último caso de estudo, apresentado na Figura 20. Este caso diferencia-se por dois motivos: em primeiro, todos os postos são automáticos; em segundo, o último posto contém um prato rotativo e executa quatro operações dentro dele. Além disso, os tapetes de transporte são rápidos e os tempos de processamento aumentam à medida que se avança no caso de estudo. Todas estas considerações tornam este caso de estudo completamente único.

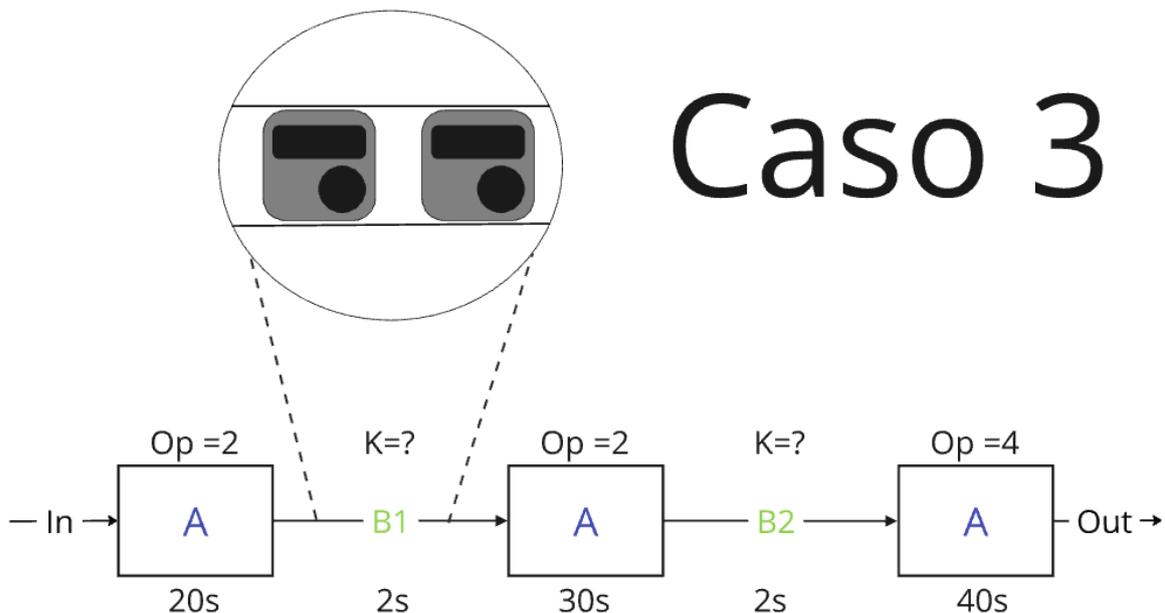


Figura 20. Esquema representativo do Caso de Estudo 3

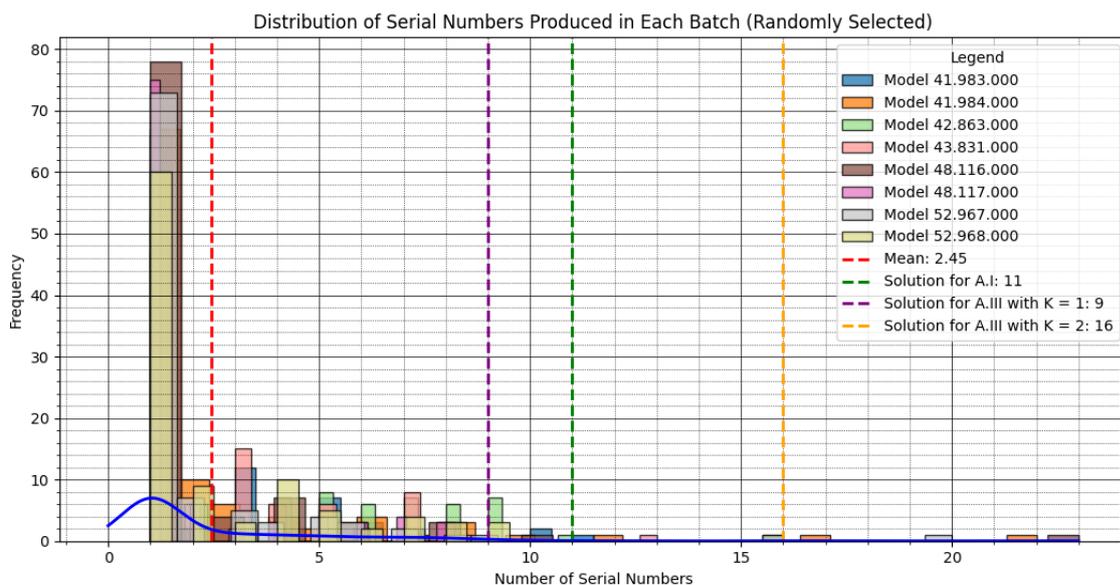
## 5.4. Apresentação e Discussão dos Resultados

A abordagem II não foi considerada em nenhum dos casos de estudo pois, para a aplicar, seria necessário obter informação quanto ao posto de alimentação da linha de montagem e quanto ao posto de embalagem. Como a análise se focou na secção crítica da linha de montagem, – de lubrificação intermédia e montagem final – não foi possível aplicar esta abordagem e comparar com resultados reais.

### 5.4.1. Caso 1:

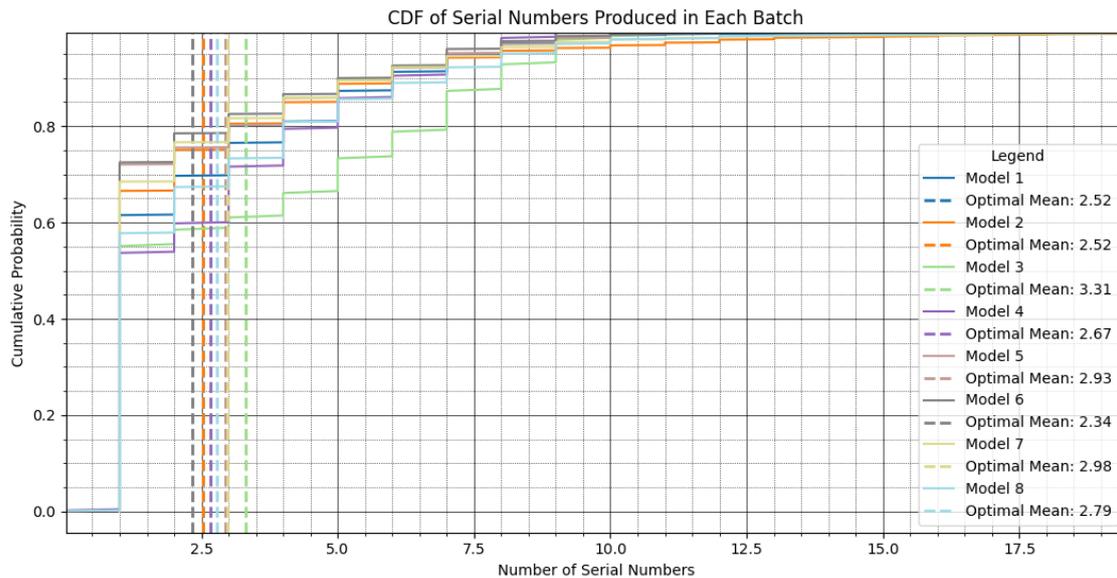
O primeiro gráfico, apresentado na Figura 21, calcula a produção média considerando *batches* de produção de 5 minutos, o mesmo intervalo de tempo considerado para obter os resultados das abordagens de otimização. Para reduzir o tempo de computação, foram escolhidos cem *batches* de forma aleatória, para cada modelo produzido.

Como é possível observar pela linha de distribuição normal, a maioria dos *batches* de 5 minutos de produção real produzem entre uma a duas unidades. De facto, de acordo com os dados reais, a média de produção é de cerca de 2,45 unidades. Por outro lado, os resultados das abordagens de otimização apresentam valores de produção mais elevados. No caso da abordagem I, que considera que todos os postos executam somente uma operação e que os tapetes de transporte se comportam como armazéns de capacidade infinita, obteve-se a solução de 11 unidades produzidas ao fim de 5 minutos de produção. No caso da abordagem III, para este caso de estudo, a solução encontrada considera uma capacidade mínima de duas unidades por tapete de transporte. De facto, para a capacidade de uma unidade, temos uma solução pior que a da abordagem I, com 9 unidades produzidas. Com capacidade de duas unidades, obtemos a solução de 16 unidades produzidas.



**Figura 21.** Distribuição da produção real e comparação com valores obtidos pelas abordagens, para o caso 1

O gráfico da Figura 22 representa a densidade da totalidade do volume de dados, juntamente com o valor médio de produção por cada modelo. Observa-se, portanto, que a maioria dos *batches* – entre 55% a 75%, dependendo do modelo – produz entre duas a quatro unidades. Os valores médios de produção por modelo também vão ao encontro do valor médio indicado para os cem *batches* por modelo selecionados. Desse modo, pode-se afirmar que os cem *batches* escolhidos de forma aleatória para cada modelo seguem as tendências de produção dos restantes *batches*.



**Figura 22.** Distribuição da densidade de volume de dados para o caso 1

De seguida apresentam-se os diagramas de produção real obtidos a partir dos dados fornecidos. Em primeiro lugar, temos os valores de *flowtime* por posto de trabalho para o Caso 1. –Estes diagramas são essenciais para entender a duração total do processo de produção e identificar possíveis gargalos. Seguem-se os dados relativos ao *cycle time*. Estes diagramas permitem avaliar a velocidade com que cada posto completa um ciclo de produção. Além disso, o *cycle time* impacta diretamente a produtividade e a capacidade de resposta da linha de produção.

De acordo com os dados apresentados na Figura 23, verifica-se que o posto manual foi o posto crítico, pois foi o posto que apresentou o maior valor de *flowtime*. No caso do *cycle time*, verifica-se que a linha está relativamente balanceada em torno dos 20 segundos de tempo de ciclo. Verifica-se, também, que o primeiro posto automático do Caso 1 é o mais lento, embora a margem seja muito pequena.

## Caso 1: A → B1 → M → B2 → A

Dados de produção:

*Flowtime:*



*Cycle time:*



**Figura 23.** Dados reais de produção para o caso 1

Os resultados obtidos pela aplicação da Abordagem III encontram-se apresentados na Figura 24, com duas variações de capacidade dos tapetes de transporte:  $K = 1$  e  $K = 2$ .

A comparação dos resultados relativos ao *flowtime* mostra que os dados para a abordagem III, com os tapetes com capacidade mínima de duas unidades ( $K=2$ ), apresentam melhores valores de *flowtime* para todos os postos de trabalho e tapetes de transporte, demonstrando a eficácia dos métodos propostos. Para a capacidade dos tapetes de transporte fixa em uma unidade ( $K=1$ ), o posto que apresentou uma melhoria mais significativa é o último posto automático, cuja redução do *flowtime* foi de 44,96%. No entanto, a redução no primeiro posto automático foi mínima, de apenas 1,65%. O primeiro tapete de transporte teve uma redução de 20,87%, enquanto o segundo teve uma redução de 31,54%. O posto manual teve uma redução de 42,13%. A melhoria média para este cenário ( $K = 1$ ) foi de 28,19%.

Já no caso de  $K = 2$ , a melhoria mais significativa registou-se no posto manual, com 67,16% de redução do *flowtime*. O primeiro posto automático também registou uma redução de 39,14%. O primeiro tapete apresentou uma redução de 12,73% e o segundo uma redução

de 31,57%. O último posto automático manteve a redução verificada no caso de  $K = 1$ , com 44,96%. A melhoria média para este cenário ( $K = 2$ ) foi cerca de 39%.

Quanto à comparação relativa aos dados do tempo de ciclo, verifica-se que, para a capacidade dos tapetes de transporte fixa em uma unidade ( $K=1$ ), o posto que apresentou a menor melhoria foi no primeiro posto automático, com uma redução de apenas 5,07%. Por outro lado, o segundo tapete apresentou um aumento de 32,99%, indicando um gargalo significativo. Outros elementos também apresentaram aumentos nos tempos de ciclo, incluindo o tapete 1, com 13,18%, o posto manual com 25,55% e o segundo posto automático com 31,45%. Esses resultados indicam uma pioria significativa na eficiência da linha para  $K=1$ , resultando num aumento médio do tempo de ciclo de 27,45%.

Para  $K=2$ , todas as posições apresentaram reduções no tempo de ciclo: o primeiro posto automático com uma redução significativa de 36,55%, o tapete 1 com 36,55%, o posto manual com 35,11%, o tapete 2 com 28,39% e o segundo posto automático com 29,22%. Estes resultados demonstram que a configuração com  $K=2$  é altamente eficiente, com uma redução média de 28,18%.

As comparações dos resultados obtidos demonstram dois factos interessantes. Primeiro, e talvez não tão surpreendente, os resultados obtidos para a abordagem III com  $K = 2$  apresentam uma redução do tempo de ciclo médio do Caso 1 de 33,64%. Estes dados indicam uma melhoria significativa na produtividade e na capacidade de resposta da linha de produção. O outro facto é que a Abordagem III com  $K = 1$  apresenta um aumento do tempo de ciclo médio de 27,45%. Adicionalmente, os resultados reforçam a proposta de otimização deste trabalho, em que, ao aumentar a capacidade dos tapetes de transporte, permite aumentar a produtividade da linha de montagem.

## Caso 1: $A \rightarrow B1 \rightarrow M \rightarrow B2 \rightarrow A$

### Dados da abordagem III:

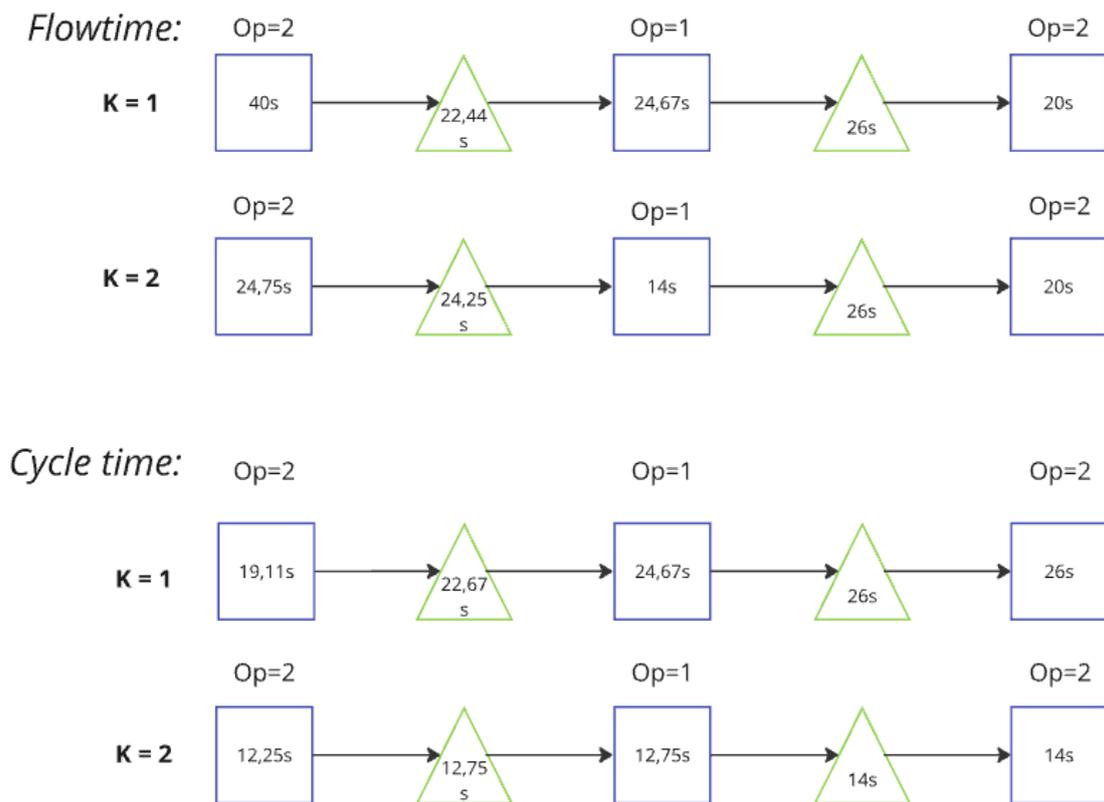


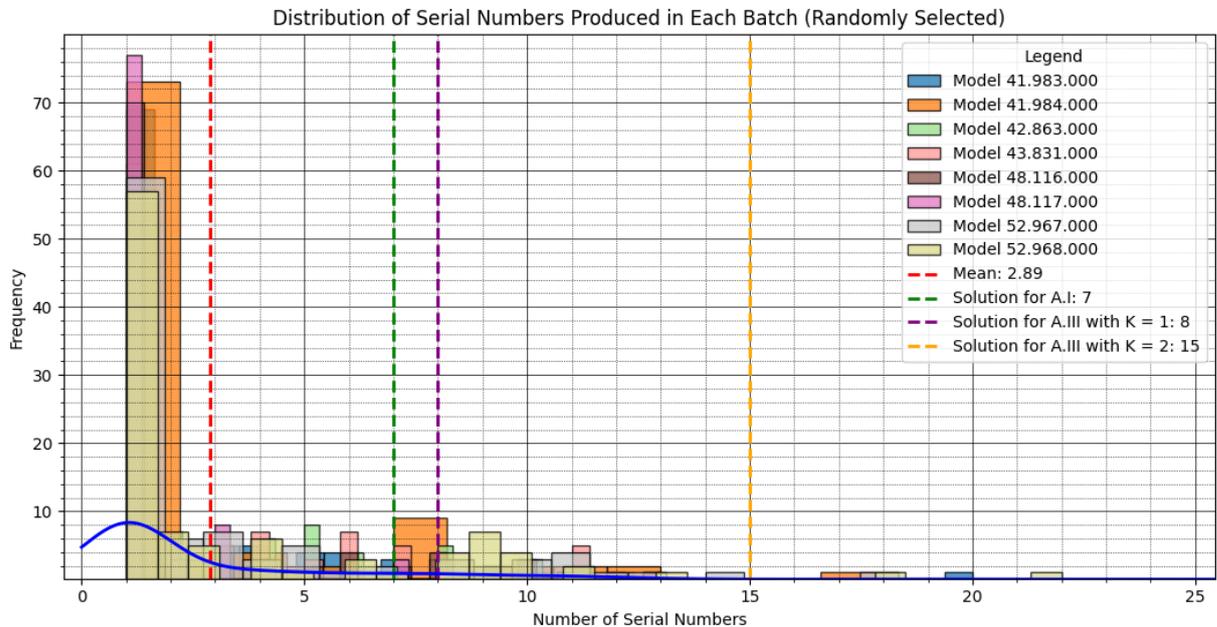
Figura 24. Dados obtidos pela abordagem III, para o caso 1

### 5.4.2. Caso 2:

Tal como no caso 1, o primeiro gráfico (Figura 25) apresentado calcula a produção média considerando com *batches* de produção de 5 minutos por modelo de produção.

Como é possível observar pela linha de distribuição normal, a maioria dos *batches* de 5 minutos de produção real produzem entre duas a três unidades. De facto, de acordo com os dados reais, a média de produção é de cerca de 2,89 unidades. No caso da abordagem I, obteve-se a de 7 unidades produzidas ao fim de 5 minutos de produção. No caso da abordagem III, para este caso de estudo, a solução encontrada considera uma capacidade mínima de duas unidades por tapete de transporte. De facto, para a capacidade de uma

unidade, obtém-se uma solução de 8 unidades produzidas. Com capacidade de duas unidades, obtemos a solução de 15 unidades produzidas.



**Figura 25.** Distribuição da produção real e comparação com valores obtidos pelas abordagens, para o caso 2

O gráfico seguinte (Figura 26), apresenta a densidade da totalidade do volume de dados, juntamente com o valor médio de produção por cada modelo. É possível observar que a maioria dos *batches* produz entre duas a quatro unidades. Os valores médios de produção por modelo também vão ao encontro do valor médio indicado para os cem *batches* por modelo selecionados, sendo superior em alguns modelos, e inferior em outros. Desse modo, pode-se afirmar que os cem *batches* escolhidos aleatoriamente para cada modelo seguem as tendências de produção dos restantes *batches*.

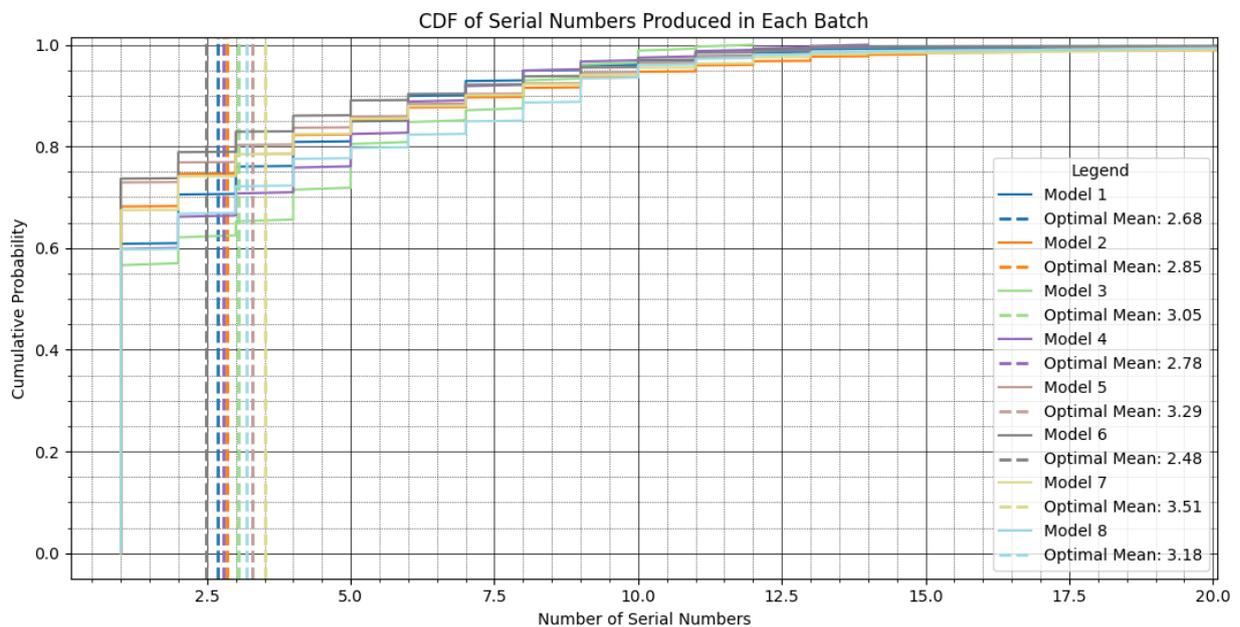


Figura 26. Distribuição da densidade de volume de dados para o caso 2

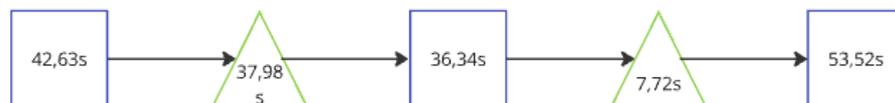
De seguida apresentam-se os diagramas de produção real derivados dos dados fornecidos (Figura 27). A abordagem utilizada e os indicadores avaliados permanecem os mesmos, focando-se no *flowtime* e no *cycle time* para os dados de produção e os dados da Abordagem III para diferentes configurações de capacidade dos tapetes de transporte ( $K = 1$  e  $K = 2$ ).

O caso 2 avança um posto de trabalho em relação ao caso 1. Verifica-se que o posto manual continua a ser o posto crítico. Adicionalmente, verifica-se que o primeiro tapete de transporte se transforma, também, numa zona crítica de produção. Mais uma vez, verifica-se que a linha está relativamente balanceada em torno dos 20 segundos de tempo de ciclo. Para este caso, o primeiro posto automático é o mais lento.

## Caso 2: M → B1 → A → B2 → A

Dados de produção:

*Flowtime:*



*Cycle time:*

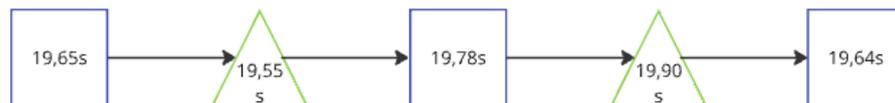


Figura 27. Dados reais de produção para o caso 2

Os resultados obtidos pela aplicação da Abordagem III encontram-se apresentados na Figura 28, com duas variações de capacidade dos tapetes de transporte:  $K = 1$  e  $K = 2$ .

A análise dos resultados para o *flowtime* neste caso de estudo mostra melhorias significativas para ambas as configurações dos tapetes de transporte. Para  $K=1$ , o posto 1 apresentou uma redução de 42,52%, enquanto para  $K=2$ , a redução foi ainda maior, atingindo os 67,16%. O tapete 1 teve uma redução uniforme de 31,54% para ambas as configurações. No primeiro posto automático, a redução foi de 44,96% para ambas as configurações, indicando uma melhoria consistente. O tapete 2, no entanto, apresentou uma melhoria significativa de 74,09% para  $K=1$ , mas um aumento de 16,58% para  $K=2$ , sugerindo que a capacidade de  $K=1$  pode ser mais eficaz neste ponto específico. Finalmente, o segundo posto automático apresentou uma redução de 43,95% para ambas as configurações. Em termos médios, a configuração  $K=1$  resultou numa redução de 47,59%, enquanto  $K=2$  apresentou uma redução média de 34,21%.

Para o tempo de ciclo, os resultados indicam diferentes níveis de eficácia entre as configurações  $K=1$  e  $K=2$ . Para  $K=1$ , verifica-se um aumento no tempo médio de ciclo de 6,15%. No posto manual verificou-se um aumento de 24,68% e no tapete 1 um aumento de 32,99%. No primeiro posto automático e no tapete 2, as piorias foram de 31,45% e 32,99%,

respetivamente. Em contraste, o segundo posto automático melhorou em 29,22%. Para a configuração  $K=2$ , verificou-se uma melhoria significativa com uma redução média de 28,18%. O posto manual teve uma redução de 28,75% e o tapete 1 de 29,65%. O primeiro posto automático melhorou 29,22% e o tapete 2 em 29,64%. Por fim, o segundo posto automático melhorou 23,63%. A comparação destes resultados mostra que os dados para a abordagem III, com os tapetes com capacidade mínima de duas unidades ( $K=2$ ), apresentam melhores valores de *cycle time* para todos os postos de trabalho e tapetes de transporte, demonstrando a eficácia dos métodos propostos. Para a capacidade dos tapetes de transporte fixa em uma unidade ( $K=1$ ), o posto que apresentou uma otimização mais significativa é o último posto automático, cuja redução do *cycle time* foi de 44,96%. No entanto, a redução no primeiro posto automático foi mínima, de apenas 1,65%. O primeiro tapete de transporte teve uma redução de 20,87%, enquanto o segundo teve uma redução de 31,54%. O posto manual teve uma redução de 42,13%. A otimização média para este cenário ( $K = 1$ ) foi de 28,19%.

## Caso 2: $M \rightarrow B1 \rightarrow A \rightarrow B2 \rightarrow A$

Dados da abordagem III:

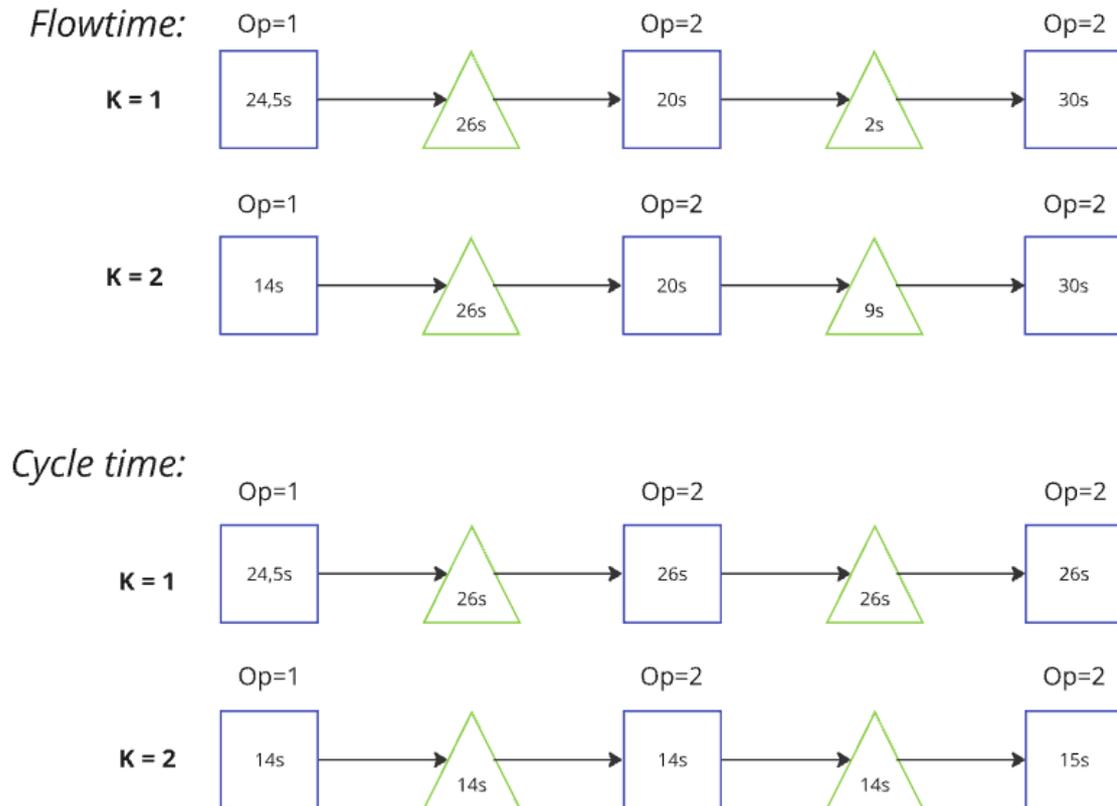


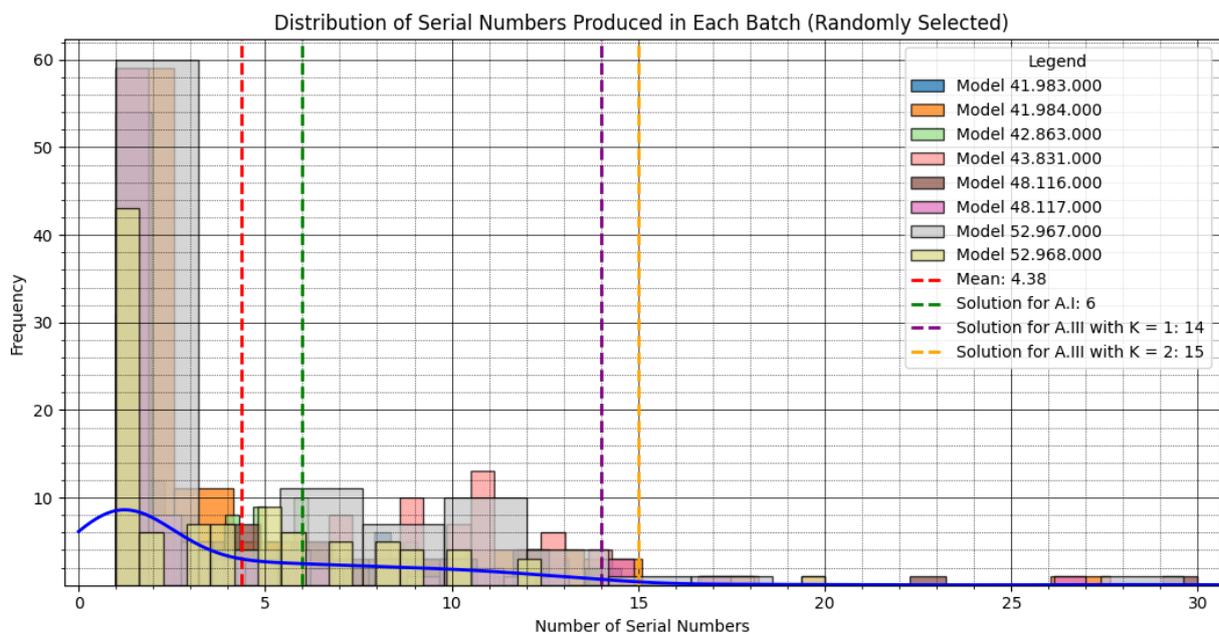
Figura 28. Dados obtidos pela abordagem III, para o caso 2

### 5.4.3. Caso 3:

Este caso de estudo tem a particularidade de o último posto ser um posto de verificação que executa quatro operações dentro do mesmo. Para além disso, neste caso de estudo, todos os postos de trabalho são postos automáticos.

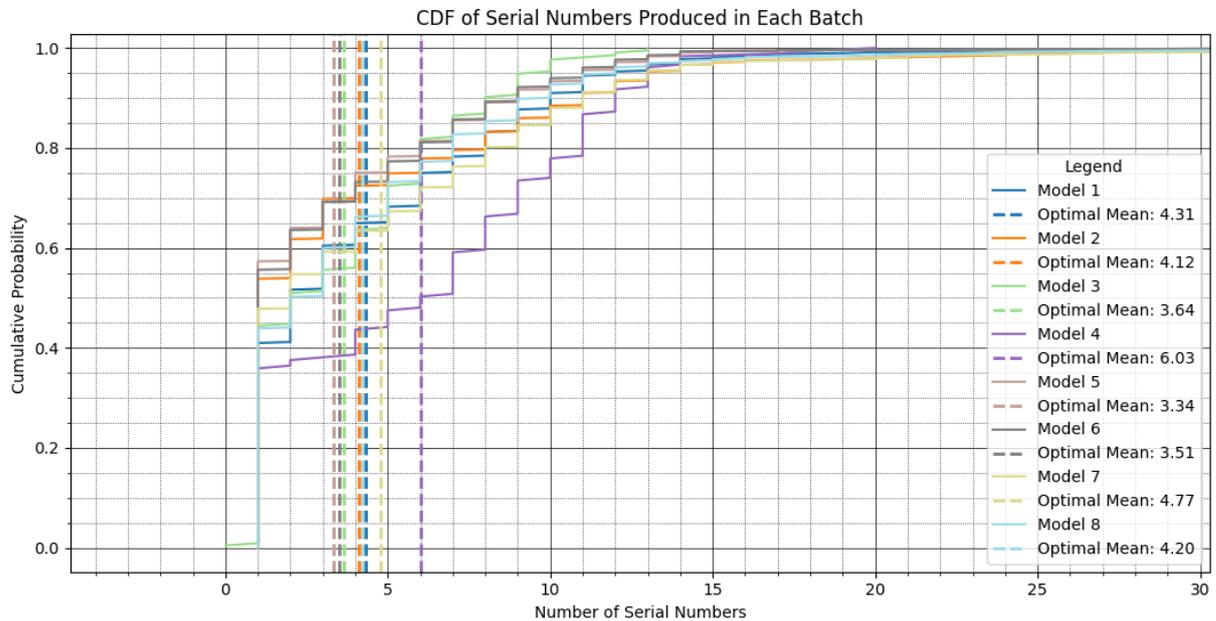
Tal como nos casos anteriores, o primeiro gráfico (Figura 29) apresentado calcula a produção média considerando cem *batches* de produção de 5 minutos por modelo de produção.

Como é possível observar pela linha de distribuição normal, a maioria dos *batches* de 5 minutos de produção real produzem entre duas a cinco unidades. De acordo com os dados reais, a média de produção é de cerca de 4,38 unidades. No caso da abordagem I, obteve-se a solução de 6 unidades produzidas ao fim de 5 minutos de produção. No caso da abordagem III, para este caso de estudo, a solução encontrada considera uma capacidade mínima de duas unidades por tapete de transporte. De facto, para a capacidade de uma unidade, temos uma solução de 14 unidades produzidas. Com capacidade de duas unidades, obtemos a solução de 15 unidades produzidas. Ao contrário dos casos anteriores, a variação da capacidade dos tapetes de transporte não tem um impacto tão significativo na produção.



**Figura 29.** Distribuição da produção real e comparação com valores obtidos pelas abordagens, para o caso 3

O gráfico da Figura 30, apresenta a densidade da totalidade do volume de dados, juntamente com o valor médio de produção por cada modelo. Observa-se, portanto, que a maioria dos *batches* produz entre uma a cinco unidades. Os valores médios de produção por modelo também vão ao encontro do valor médio indicado para os cem *batches* por modelo seleccionados, sendo superior em alguns modelos e inferior noutros. Desse modo, podemos afirmar que os cem *batches* escolhidos ao acaso para cada modelo seguem as tendências de produção dos restantes *batches*.



**Figura 30.** Distribuição da densidade de volume de dados para o caso 3

A seguir, na Figura 31, são apresentados os diagramas de produção real derivados dos dados fornecidos. A abordagem utilizada e os indicadores avaliados permanecem os mesmos, focando-se no *flowtime* e no *cycle time* para os dados de produção e os dados da Abordagem III para diferentes configurações de capacidade dos tapetes de transporte ( $K = 1$  e  $K = 2$ ).

O caso 3 avança um posto de trabalho em relação ao caso 2. Verifica-se que, neste caso, a zona crítica à produção ocorre entre o segundo e o terceiro posto, juntamente com o tapete 2. Mais uma vez, verifica-se que a linha está relativamente balanceada em torno dos 20 segundos de tempo de ciclo.

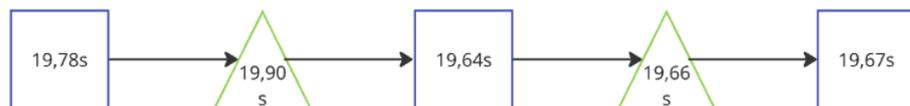
### Caso 3: $A \rightarrow B1 \rightarrow A \rightarrow B2 \rightarrow A$

#### Dados de produção:

*Flowtime:*



*Cycle time:*



**Figura 31.** Dados reais de produção para o caso 3

Os resultados obtidos pela aplicação da Abordagem III encontram-se apresentados na Figura 32, com duas variações de capacidade dos tapetes de transporte:  $K = 1$  e  $K = 2$ .

A análise dos resultados para o *flowtime* para este caso de estudo, demonstra que o primeiro posto apresentou uma melhoria de 27,71% para  $K=1$  e uma redução de 35,23% para  $K=2$ . O tapete 1 mostrou uma pioria significativa de 65,93% para  $K=1$  e um aumento ainda pior para  $K=2$ , com 179,02%. Para o segundo posto, a redução foi de 43,95% para ambas as configurações. O tapete 2 apresentou melhorias de 92,88% para ambas as configurações. O último posto de trabalho teve uma redução de 30,95% para ambas as configurações. Em termos médios, a configuração de  $K=1$  resultou numa melhoria de 25,93%, enquanto  $K=2$  apresentou uma melhoria média de 48,18%.

Para o tempo de ciclo, a configuração  $K=1$  apresentou uma melhoria média de 25,18%, com o primeiro posto apresentando uma redução de 4,78% e o tapete 1 uma melhoria de 20,55%. No segundo posto e tapete 2, as melhorias foram de 23,63% e 23,70%, respetivamente. O último posto teve uma melhoria de 23,74%. Para a configuração de  $K=2$ , obteve-se uma melhoria ainda mais significativa, com uma redução média de 30,03%. O primeiro posto teve uma redução significativa de 41,66% e o tapete 1 de 37,44%. Os valores

para o segundo posto, tapete 2 e último posto foram os mesmos que para a configuração K=1, 23,63%, 23,70% e 23,74%, respetivamente.

### Caso 3: $A \rightarrow B1 \rightarrow A \rightarrow B2 \rightarrow A$

Dados da abordagem III:

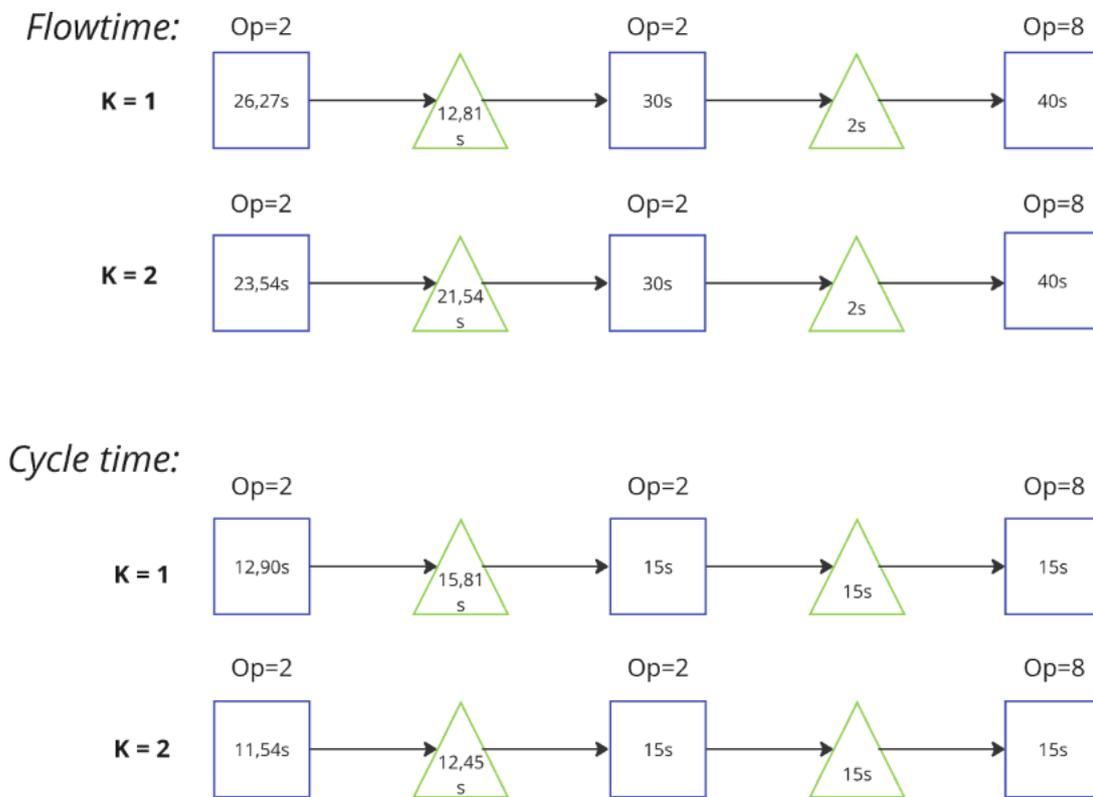


Figura 32 Dados obtidos pela abordagem III, para o caso 3



## 6. CONCLUSÃO

### 6.1. Principais contributos

Ao longo deste trabalho, foi explorado o impacto da adoção de modelos de otimização de linhas de montagem na indústria automóvel, com foco na transição da Indústria 4.0 para a Indústria 5.0. Este estudo destacou a importância da integração de abordagens de programação linear para melhorar a eficiência operacional de uma linha de montagem, no contexto da Huf Portuguesa.

Inicialmente, a revisão de literatura proporcionou um panorama abrangente sobre as revoluções industriais, enfatizando como a I4.0 e I5.0 estão a remodelar a produção industrial, juntamente com uma análise detalhada dos diferentes tipos de otimização de produção aplicados às diversas linhas de montagem. Importa realçar que não existe, de acordo com o nosso melhor conhecimento, nenhum trabalho que analisasse uma linha de montagem com as especificidades consideradas neste problema, demonstrando uma lacuna na literatura que motivou este trabalho.

A metodologia adotada envolveu a recolha e o tratamento de dados de produção real, juntamente com o desenvolvimento e aplicação de modelos de programação inteira mista para otimizar a linha de montagem. Foi adotada a estratégia de decomposição para analisar somente a secção crítica da linha. Foram propostas três abordagens distintas, utilizando um processo iterativo entre elas e aumentando a sua complexidade.

Os casos de estudo foram essenciais para validar a eficácia das abordagens propostas. Os resultados demonstram que, para a configuração da capacidade mínima de duas unidades por tapete de transporte, se verificam reduções consideráveis no tempo de fluxo e tempo de ciclo de todos os postos de trabalho e tapetes de transporte, aumentando a eficiência de produção da linha de montagem. A análise dos gráficos de distribuição e função de distribuição acumulada corroborou a validade dos dados selecionados.

Este estudo não só contribuiu para a otimização da linha de montagem da Huf Portuguesa, como também apresentou uma metodologia que pode ser aplicada a outros contextos industriais. A abordagem iterativa permitiu uma compreensão aprofundada das

dinâmicas de produção e das possibilidades de otimização, oferecendo uma base sólida para futuras investigações.

## 6.2. Trabalhos Futuros

O trabalho efetuado permitiu abrir várias linhas de investigação futura. Em primeiro lugar, recomenda-se a aplicação das abordagens desenvolvidas às restantes secções da linha de montagem e a comparação com os valores de produção reais. Após a modelação matemática aplicada à totalidade da linha de montagem, recomenda-se a análise da estratégia de otimização da força de trabalho, tornando-a variável. Atualmente, a relação da força de trabalho para postos manuais é de 1:1, ou seja, um operador por posto. A proposta é explorar a possibilidade de reduzir o número de operadores, ajustando esta relação. Isto permitirá obter uma visão holística da produção e identificar o impacto que esta variação tem sobre a eficiência operacional.

Outra direção promissora é a integração de algoritmos *machine learning* para criar um CPS. Este sistema permitirá a otimização em tempo real da linha de montagem, aprendendo e ajustando continuamente os parâmetros operacionais para melhorar a eficiência e a produtividade. A implementação de um CPS proporcionará uma camada adicional de inteligência e adaptabilidade ao processo de produção, facilitando a identificação de padrões e a tomada de decisões informadas.

Por fim, expandir a aplicação das abordagens desenvolvidas para diferentes contextos industriais pode fornecer *insights* e contribuir para a evolução contínua das estratégias de otimização. A replicação/adaptação deste estudo noutras indústrias permitirá validar a eficácia dos métodos e adaptar as soluções às especificidades de cada setor.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “How automotive organizations can maximize the smart factory potential”. Accessed: Jul. 14, 2024. [Online]. Available: [Report---Auto-Smart-Factories.pdf \(capgemini.com\)](#)
- [2] “The challenges and opportunities of new technology for the automotive industry State of Smart Manufacturing Report: Automotive Edition”. Accessed: Jul. 14, 2024. [Online]. Available: [info-br028\\_en-p.pdf \(rockwellautomation.com\)](#)
- [3] Y. Lu, “Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues,” *J Ind Inf Integr*, vol. 6, pp. 1–10, Jun. 2017, doi: 10.1016/J.JII.2017.04.005.
- [4] H. Yang, S. Kumara, S. T. S. Bukkapatnam, and F. Tsung, “The internet of things for smart manufacturing: A review,” *IISE Trans*, vol. 51, no. 11, pp. 1190–1216, 2019, doi: 10.1080/24725854.2018.1555383.
- [5] F. Iafrate, “A journey from big data to smart data,” *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 261, pp. 25–33, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-04313-5\_3/COVER.
- [6] J. Zhou, P. Li, Y. Zhou, B. Wang, J. Zang, and L. Meng, “Toward New-Generation Intelligent Manufacturing,” *Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 11–20, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.ENG.2018.01.002.
- [7] J. Wang, Y. Li, R. X. Gao, and F. Zhang, “Hybrid physics-based and data-driven models for smart manufacturing: Modelling, simulation, and explainability,” *J Manuf Syst*, vol. 63, pp. 381–391, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.JMSY.2022.04.004.
- [8] T. Ruppert and J. Abonyi, “Integration of real-time locating systems into digital twins,” *J Ind Inf Integr*, vol. 20, p. 100174, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.JII.2020.100174.
- [9] J. Leng, H. Zhang, D. Yan, Q. Liu, X. Chen, and D. Zhang, “Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop,” *J Ambient Intell Humaniz Comput*, vol. 10, no. 3, pp. 1155–1166, Mar. 2019, doi: 10.1007/S12652-018-0881-5/FIGURES/11.
- [10] J. Zhang *et al.*, “A survey for solving mixed integer programming via machine learning,” *Neurocomputing*, vol. 519, pp. 205–217, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.NEUCOM.2022.11.024.
- [11] N. Boysen, M. Fliedner, and A. Scholl, “Assembly line balancing: Which model to use when?,” *Int J Prod Econ*, vol. 111, no. 2, pp. 509–528, Feb. 2008, doi: 10.1016/J.IJPE.2007.02.026.
- [12] O. Battaïa and A. Dolgui, “A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches,” *Int J Prod Econ*, vol. 142, no. 2, pp. 259–277, Apr. 2013, doi: 10.1016/J.IJPE.2012.10.020.
- [13] N. Boysen, M. Fliedner, and A. Scholl, “A classification of assembly line balancing problems,” *Eur J Oper Res*, vol. 183, no. 2, pp. 674–693, Dec. 2007, doi: 10.1016/J.EJOR.2006.10.010.
- [14] B. Crowder, “Minimizing the makespan in a flexible flowshop with sequence dependent setup times, uniform machines, and limited buffers,” *Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports*, Jan. 2006, doi: <https://doi.org/10.33915/etd.4220>.

- 
- [15] A. Dolgui, A. Ereemeev, M. Y. Kovalyov, and V. Sigaev, “Complexity of Buffer Capacity Allocation Problems for Production Lines with Unreliable Machines,” *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, vol. 12, no. 2, pp. 155–165, Jun. 2013, doi: 10.1007/S10852-012-9199-Z/METRICS.
- [16] G. Liberopoulos, “Performance evaluation of a production line operated under an echelon buffer policy,” *IIE Trans*, vol. 50, no. 3, pp. 161–177, Mar. 2018, doi: 10.1080/24725854.2017.1390800.
- [17] K. R. Baker, D. Trietsch (2018), “Principles of Sequencing and Scheduling.” 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley and Sons, doi: 10.1002/9781119262602.
- [18] S. Martinez, S. Dauzère-Pérès, C. Guéret, Y. Mati, and N. Sauer, “Complexity of flowshop scheduling problems with a new blocking constraint,” *Eur J Oper Res*, vol. 169, no. 3, pp. 855–864, Mar. 2006, doi: 10.1016/J.EJOR.2004.08.046.
- [19] H. H. Miyata and M. S. Nagano, “The blocking flow shop scheduling problem: A comprehensive and conceptual review,” *Expert Syst Appl*, vol. 137, pp. 130–156, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.ESWA.2019.06.069.
- [20] C. Y. Cheng, S. W. Lin, P. Pourhejazy, K. C. Ying, and J. W. Zheng, “Minimizing Total Completion Time in Mixed-Blocking Permutation Flowshops,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 142065–142075, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3014106.
- [21] S. Xi, J. M. G. Smith, Q. Chen, N. Mao, H. Zhang, and A. Yu, “Simultaneous machine selection and buffer allocation in large unbalanced series-parallel production lines,” *Int J Prod Res*, vol. 60, no. 7, pp. 2103–2125, Apr. 2022, doi: 10.1080/00207543.2021.1884306.
- [22] T. Sawik, “Mixed integer programming for scheduling flexible flow lines with limited intermediate buffers,” *Math Comput Model*, vol. 31, no. 13, pp. 39–52, Jun. 2000, doi: 10.1016/S0895-7177(00)00110-2.
- [23] J. V. Frasc, S. O. Krumke, and S. Westphal, “MIP formulations for flowshop scheduling with limited buffers,” *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 6595 LNCS, pp. 127–138, 2011, doi: 10.1007/978-3-642-19754-3\_14/COVER.
- [24] S. Helber, K. Schimmelpfeng, R. Stolletz, and S. Lagershausen, “Using linear programming to analyze and optimize stochastic flow lines,” *Ann Oper Res*, vol. 182, no. 1, pp. 193–211, Jan. 2011, doi: 10.1007/S10479-010-0692-3/METRICS.
- [25] J. Bautista-Valhondo and R. Alfaro-Pozo, “Mixed integer linear programming models for Flow Shop Scheduling with a demand plan of job types,” *Cent Eur J Oper Res*, vol. 28, no. 1, pp. 5–23, Mar. 2020, doi: 10.1007/S10100-018-0553-8/TABLES/8.
- [26] S. Toumi, B. Jarboui, M. Eddaly, and A. Rebai, “Branch and bound algorithm for solving blocking flowshop scheduling problem with total completion time,” *2013 International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2013*, pp. 746–749, 2013, doi: 10.1109/CODIT.2013.6689635.
- [27] A. Gonçalves De Souza, M. Seido Nagano, H. Hissashi Miyata, and L. Ribeiro De Abreu, “Bounded dynamic programming approach to minimize makespan in the blocking flowshop problem with sequence dependent setup times,” *Journal of Project Management*, vol. 8, pp. 99–118, 2023, doi: 10.5267/j.jpmm.2022.12.001.
-

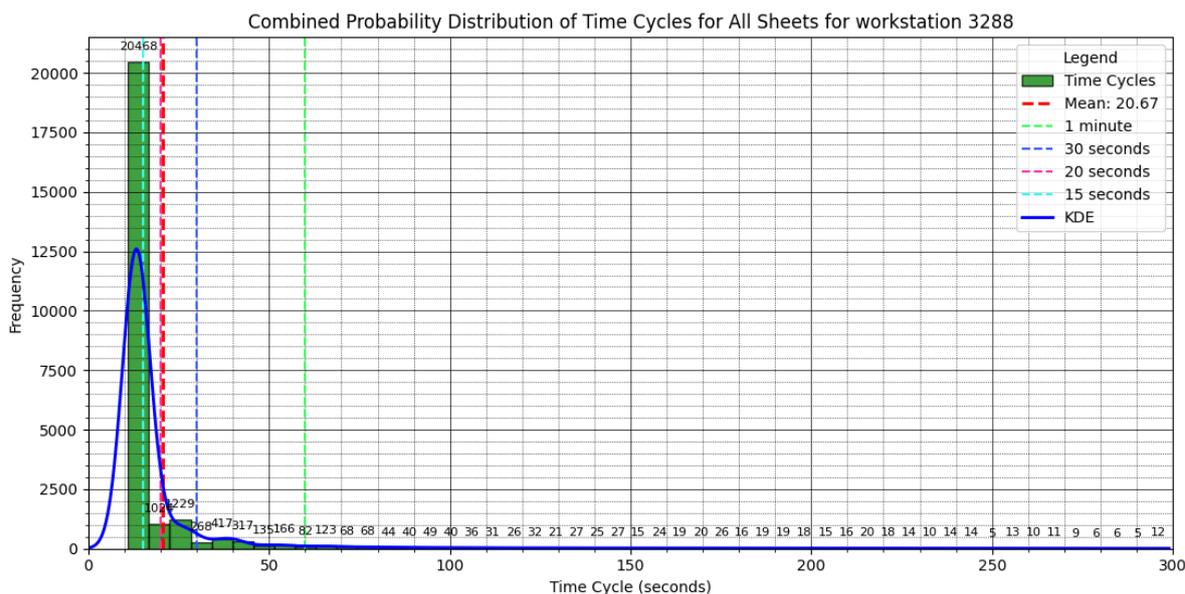
- 
- [28] D. P. Ronconi, “A note on constructive heuristics for the flowshop problem with blocking,” *Int J Prod Econ*, vol. 87, no. 1, pp. 39–48, Jan. 2004, doi: 10.1016/S0925-5273(03)00065-3.
- [29] J. Q. Li and Q. K. Pan, “Solving the large-scale hybrid flow shop scheduling problem with limited buffers by a hybrid artificial bee colony algorithm,” *Inf Sci (N Y)*, vol. 316, pp. 487–502, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.INS.2014.10.009.
- [30] H. Yilmaz and M. Yilmaz, “A mathematical model and tabu search algorithm for multi-manned assembly line balancing problems with assignment restrictions,” *Engineering Optimization*, vol. 52, no. 5, pp. 856–874, May 2020, doi: 10.1080/0305215X.2019.1618288.
- [31] S. Gao, “A Bottleneck Detection-Based Tabu Search Algorithm for the Buffer Allocation Problem in Manufacturing Systems,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 60507–60520, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3181134.
- [32] Q. Wei, Y. Wu, Y. Jiang, and T. C. E. Cheng, “Two-machine hybrid flowshop scheduling with identical jobs: Solution algorithms and analysis of hybrid benefits,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 70, no. 5, pp. 817–826, May 2019, doi: 10.1080/01605682.2018.1458018.
- [33] M. Meselhi, R. Sarker, D. Essam, and S. Elsayed, “A decomposition approach for large-scale non-separable optimization problems,” *Appl Soft Comput*, vol. 115, p. 108168, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.ASOC.2021.108168.
- [34] Z. Xiong, X. Wang, Y. Li, W. Feng, and Y. Liu, “A problem transformation-based and decomposition-based evolutionary algorithm for large-scale multiobjective optimization,” *Appl Soft Comput*, vol. 150, p. 111081, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.ASOC.2023.111081.
- [35] Y. Dong, Y. Liu, L. Zhao, C. Tian, and Z. Duan, “Neuron importance based verification of neural networks via divide and conquer,” *Neurocomputing*, vol. 565, p. 126995, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.NEUCOM.2023.126995.
- [36] “Huf Group - Automotive Supplier.” Accessed: Feb. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.huf-group.com/en>



## APÊNDICE A – QUESTÃO RELATIVA AOS TEMPOS DE CICLO

Após entregar a dissertação, foi levantado pela empresa uma questão pertinente sobre os tempos de ciclo. Os tempos de ciclo obtidos através do tratamento de dados utilizados nesta dissertação não traduzem a realidade da empresa. Se o tempo de ciclo rondasse os 20 segundos, como apresentado anteriormente nos casos de estudo, a empresa não conseguiria alcançar os valores de produção que obtém atualmente. De acordo com a empresa, os valores esperados para o tempo de ciclo rondam os 12 ou 13 segundos. Neste apêndice, pretende-se entender a discrepância entre os valores para o tempo de ciclo obtidos no tratamento de dados e os valores indicados pela empresa.

Em primeiro, foram criados histogramas do tempo de ciclo por posto de trabalho, a partir dos dados que passaram pelo processo de seleção de dados. A Figura 33 mostra todos os dados de tempo ciclo do posto 3288 com um tempo de ciclo inferior a 5 minutos, critério utilizado na seleção de dados durante a análise aos dados de produção reais por caso de estudo.

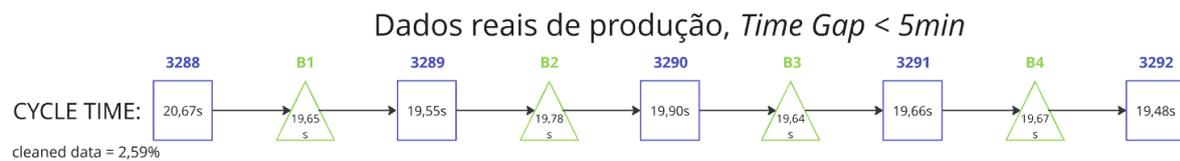


**Figura 33.** Histograma dos tempos de ciclo inferiores a 5 minutos, do posto de trabalho 3288

Observa-se que a maioria das unidades processadas neste posto de trabalho, apresentam um tempo de ciclo inferior à média. No entanto, existem casos, embora em

pequena percentagem, com valores de tempo de ciclo muito superiores à média, o que aumenta o valor médio.

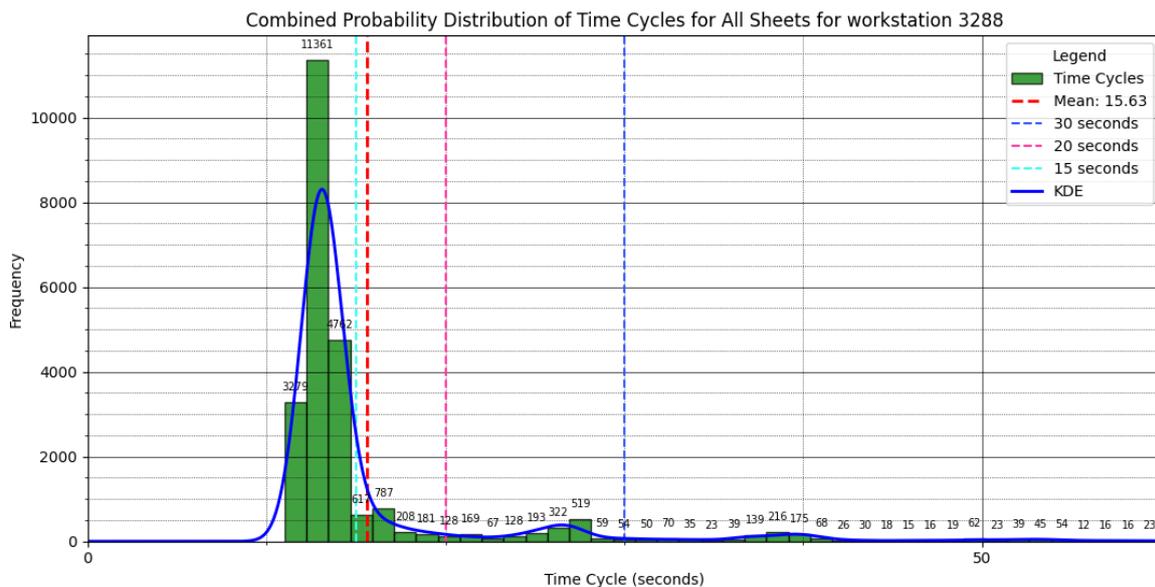
O mesmo processo foi aplicado o mesmo processo aos restantes postos de trabalho. A Figura 34 apresenta os tempos médios de ciclo obtidos para cada posto e para cada tapete de transporte. Ao restringir os dados àqueles cujo tempo de ciclo era inferior a 5 minutos, cerca de 2,59% dos dados totais foram eliminados.



**Figura 34.** Dados reais do tempo de ciclo inferiores a 5 minutos

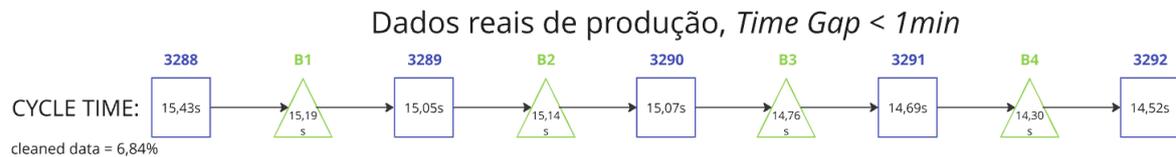
Ficou claro que a restrição de limpeza de dados, considerando tempos de ciclo inferior a 5 minutos, apesar de eficaz na remoção de *outliers*, não representa a realidade de produção. Assim, qual deve o valor da restrição de limpeza para atingir os valores de tempos de ciclo apontados pela empresa?

Foi decidido diminuir a restrição de limpeza para 1 minuto. Na Figura 35, verifica-se a alteração no histograma relativo ao primeiro posto de trabalho, 3288.



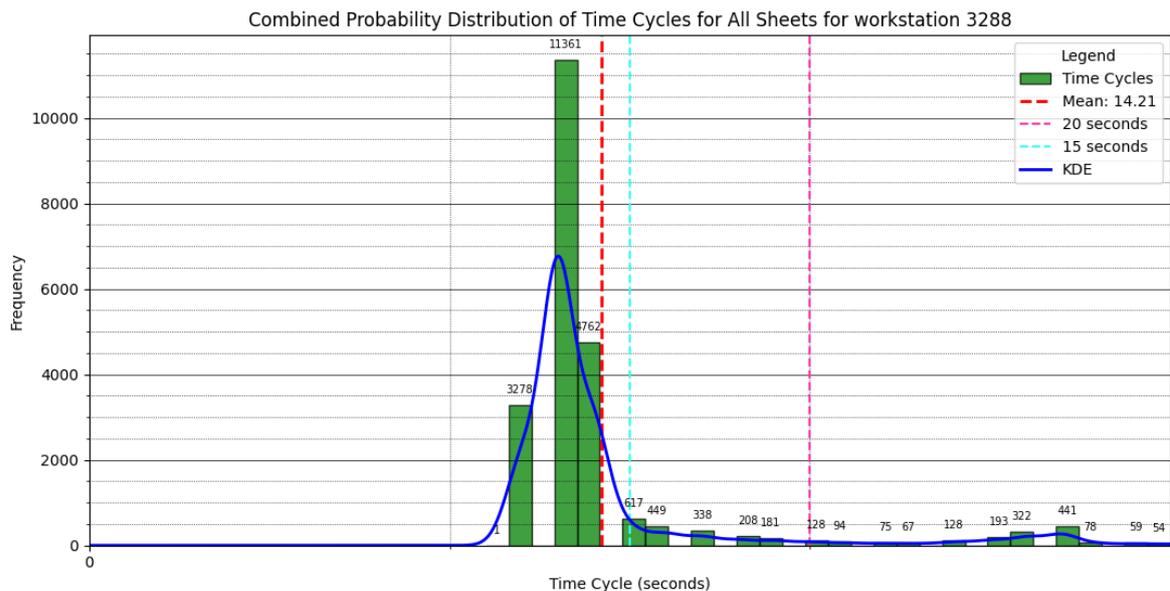
**Figura 35.** Histograma dos tempos de ciclo inferiores a 1 minuto, do posto de trabalho 3288

A Figura 36 apresenta os tempos de ciclo médios para cada posto de trabalho e tapete de produção. Foram eliminados cerca de 6,84% dos dados e ainda não se atingiram os valores indicados pela empresa.



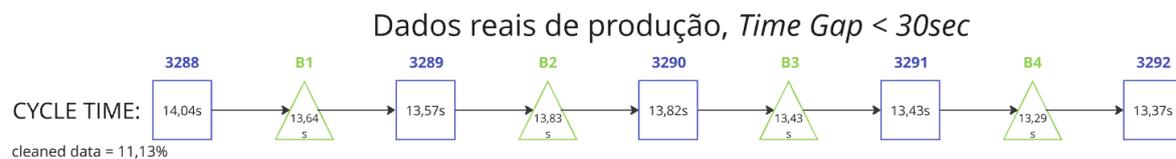
**Figura 36.** Valores médios do tempo de ciclo de produção para intervalos inferiores a 1 minuto

Como os valores ainda não foram atingidos, a restrição de limpeza foi reduzida para 30 segundos. A Figura 37, mostra a alteração no histograma relativo ao primeiro posto de trabalho, 3288.



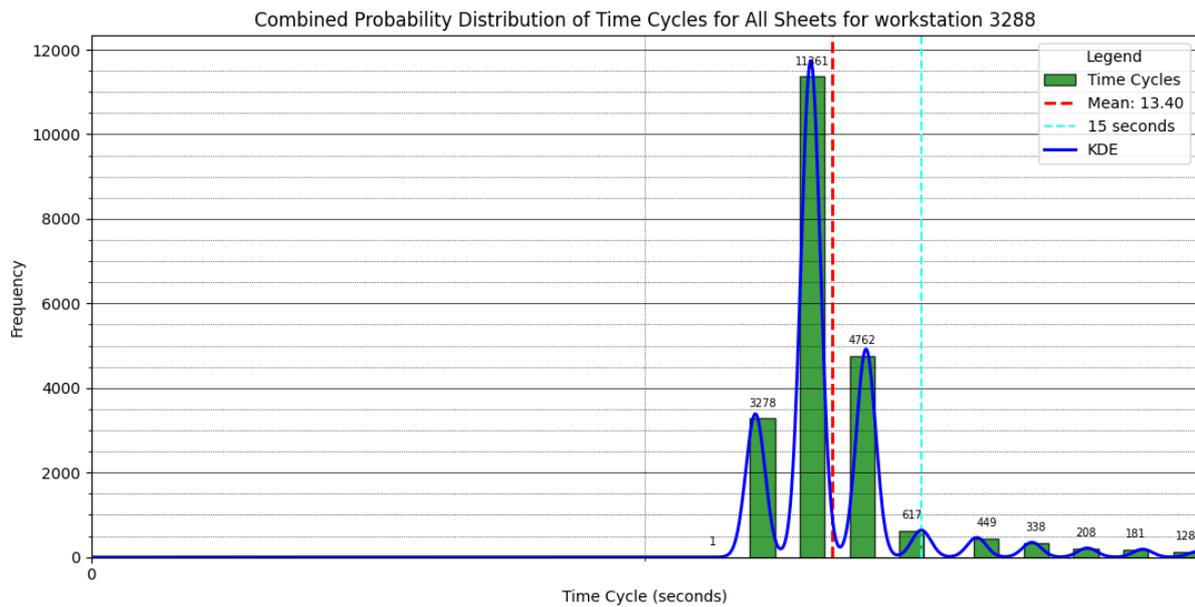
**Figura 37.** Dados do tempo de ciclo no posto 3288, com intervalos inferiores a 30 segundos

A Figura 38 apresenta os tempos de ciclo médios para cada posto de trabalho e tapete de produção. Foram eliminados cerca de 11,13% dos dados e ainda não se atingiram os valores da empresa.



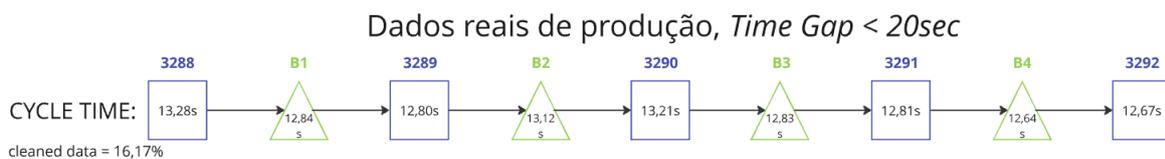
**Figura 38.** Valores médios do tempo de ciclo de produção para intervalos inferiores a 30 segundos

Em seguida, a restrição de limpeza foi reduzida para 20 segundos. A Figura 39 mostra a alteração no histograma de dados do posto 3288.



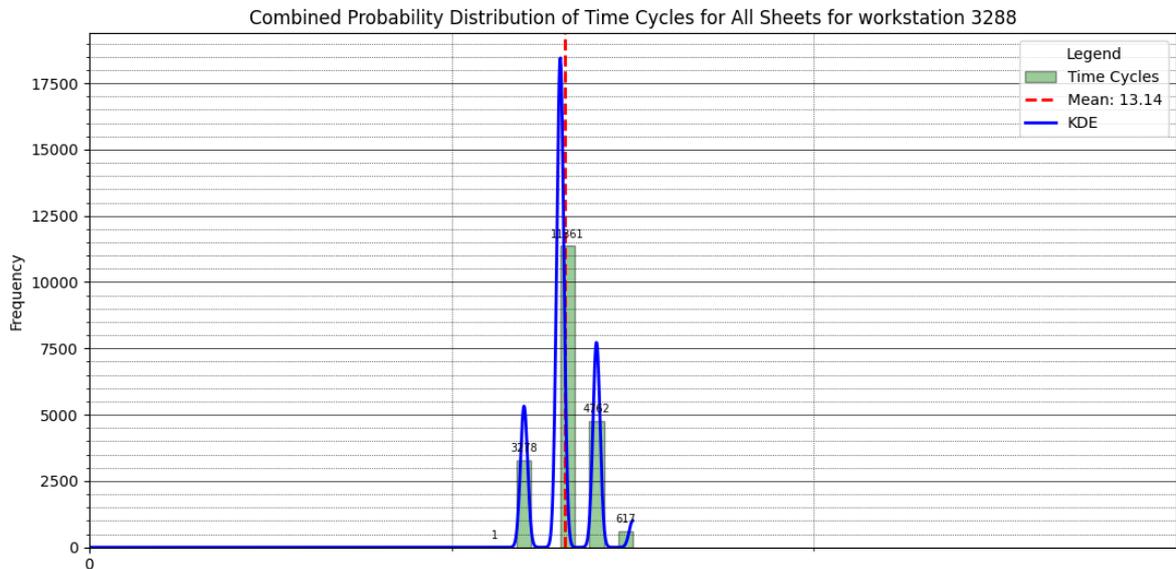
**Figura 39.** Dados do tempo de ciclo no posto 3288, com intervalos inferiores a 20 segundos

A Figura 40 apresenta os tempos de ciclo médios para cada posto de trabalho e tapete de produção. Foram eliminados cerca de 16,17% dos dados totais de produção. Finalmente, os valores obtidos aproximam-se do pretendido pela empresa, embora ainda haja espaço para melhorias, conforme observado na Figura 39.



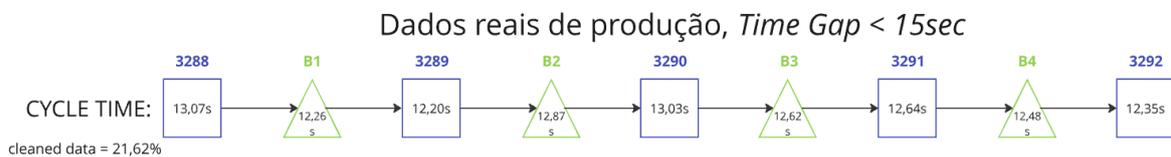
**Figura 40.** Valores médios do tempo de ciclo de produção para intervalos inferiores a 20 segundos

Finalmente, a restrição de limpeza foi reduzida para 15 segundos. A Figura 41 mostra a alteração no histograma de dados do posto 3288.



**Figura 41.** Dados do tempo de ciclo no posto 3288, com intervalos inferiores a 15 segundos

A Figura 42 apresenta os tempos de ciclo médios para cada posto de trabalho e tapete de produção. Foram eliminados cerca de 21,62% dos dados totais de produção e finalmente foram obtidos os valores de referência da empresa, entre os 12 e os 13 segundos de tempo de ciclo.



**Figura 42.** Valores médios do tempo de ciclo de produção para intervalos inferiores a 15 segundos

Conclui-se que o tempo de ciclo de produção médio da secção crítica da linha de montagem é, durante 78,38% do tempo, inferior a 13 segundos. Outra conclusão importante é que a linha apresenta uma ineficiência de produção de 21,62%. Adicionalmente, a análise demonstra que a restrição de limpeza de dados tem um impacto significativo na precisão dos tempos de ciclo.